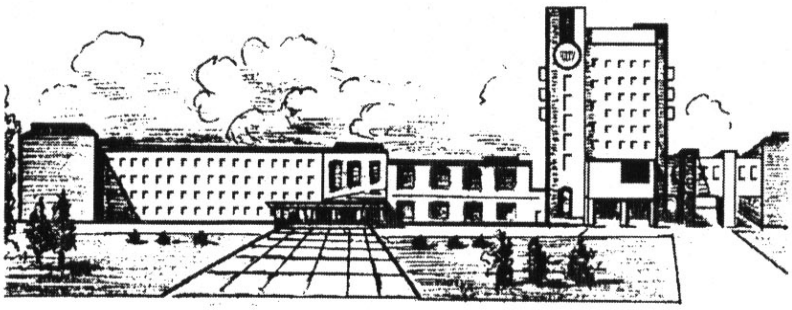
ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



# *ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ*

***НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ***

***№ 1 (19)***

До 60-річного ювілею ЧНТУ
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
1960-2020

Чернігів 2020

УДК 62:67.05
Т38
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)

Друкується за рішенням вченої ради Чернігівського національного технологічного університету (протокол № 3 від 27.04.2020 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975, відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Т38 **Технічні** науки та технології : науковий журнал / Чернігів. нац. технол. ун-т. – Чернігів : ЧНТУ, 2020. – № 1 (19). – 346 с.

У цьому випуску журналу «Технічні науки та технології» вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, енергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

**УДК 62:67.05**

***Головний редактор:***
Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

***Заступник головного редактора:***
Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет.

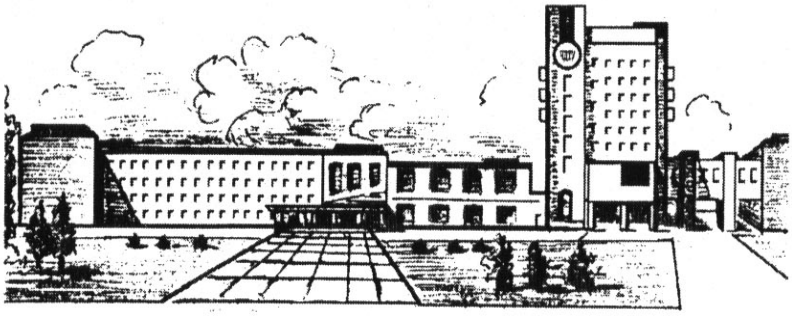
***Члени редакційної колегії:***
Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування
Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;
Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Дубенець В. Г., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;
Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Новомлинець О. О., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.
Інформаційно- комп`ютерні технології
Азаров О. Д,. доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;
Вархола Міхал, доктор технічних наук, професор, Технічний університет в Кошице (Словаччина);
Джон Н. Девис, доктор технічних наук, професор, університет Глиндор, Рексем, Великобританія;
Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;
Литвинов В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.
Енергетика, електротехніка та електромеханіка
Вінніков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);
Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;
Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);
Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;
Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Ромеро-Кадавал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);
Скоробогатова В. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.
Хімічні та харчові технології
Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;
Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;
Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет.
Будівництво та геодезія
Вінніков Ю. Л., доктор технічних наук, професор, Полтавський національний технічний університет;
Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури.

Заснований у 1996 році. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21269-11069 ПР від 12.03.2015.

© Чернігівський національний технологічний університет, 2020

ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE**
**CHERNIHIV NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



# *TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES*

***SCIENTIFIC JOURNAL***

***ISSUE № 1 (19)***

Chernihiv 2020

UDC 62:67.05
DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv National University of Technology (protocol № 3 dated 27.24.2020). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975. according to which magazine is assigned a category «B».

**Technical** sciences and technologies: scientific journal / Chernihiv National University of Technology. – Chernihiv : Chernihiv National University of Technology, 2020. – № 1 (19). – 346 p.

This issue of the journal "Technical sciences and technologies" contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences" by specialties: applied mechanics, materials science and machine building, information and computer technologies, power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering, chemical and food technologies, construction and geodesy. The articles are reviewed by leading scientists in relevant fields of knowledge.

Journal "Technical sciences and technologies" will be useful for the scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

**UDC 62:67.05**

***Editor in chief:***
Kazymyr V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv National University of Technology (ChNUT).

***Deputy Editor in chief:***
Sapon S. P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT.

***Members of the Editorial Board:***
Applied mechanics, materials science and machine building
Boyko S. V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT;
Bolotov H. P., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;
Dubenets V. H., Doctor of Technical Sciences, Professor, ChNUT;
Yeroshenko A. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT.
Kalchenko V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;
Kalchenko V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;
Novomlynets O. O., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;
Pilipenko O. I., Doctor of Technical Sciences, Professor, ChNUT.
Information and computer technologies
Azarov O. D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University;
Varchola Michal, Professor, President of the Academic society of Michal Baludansky, Slovakia;
John N. Davies, Professor, Department of Computer Science, Glyndwr University, Wrexham, U.K;
Zaitsev S. V., Doctor of Technical Sciences, ChNUT;
Lytvynov V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT.
Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering
Vinnikov D., Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;
Volkov I. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine;
Galkin I., Doctor of Science, Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia;
Husev O. O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT;
Denysov Yu. A., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;
Romero-Cadaval E., Doctor of Science, Professor, University of Extremadura, Badajoz, Spain;
Skorobohatova V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT.
Chemical and food technologies
Samokhvalova O. V., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade;
Syza O. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;
Tsybulia S. D., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;
CheliabiievaV. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, ChNUT.
Construction and geodesy
Vynnykov Y. L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;
Shults R. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv national university of construction and architecture.

Founded in 1996. Certificate of State registration
KV № 21269-11069 PR of 12.03.2015.

© Chernihiv National University of Technology, 2020

# ЗМІСТ

## РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

***Болотов М., Болотов Г.*** Визначення меж енергетичної стабільності тліючого розряду в умовах зварювального нагріву ..... 9

***Пилипенко О,. Колесник Д., Березняк А.*** Точність та погрішності зубчастих передач вертольотних редукторів ..... 18

***Лебедєв В., Дубовий О., Лой С.*** Особливості формування (структуроутворення) та властивості теплозахисних покриттів при плазмовому напиленні ..... 32

***Мурашковська В., Подзолкіна А., Скляр В., Сиводід О.*** Аналіз тенденцій розвитку міського громадського транспортного середовища ..... 42

***Борак К.*** Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів для забезпечення надійної експлуатації робочих органів ..... 53

***Захарова І., Роянов В.*** Обґрунтування конструктивних особливостей пульсатора для забезпечення пульсуючого розпилюючого потоку повітря при дуговій металізації ..... 65

***Кальченко В., Кальченко В., Венжега В., Винник В.*** Модернізація універсально-заточувального верстата з ЧПК ВЗ208Ф3 для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання ..... 72

***Литвин О., Паньков С.*** Роботизовані маніпулятори особливого призначення ..... 81

***Стельмах Н., Сапон С., Рижук Я.*** Вибір оптимального технологічного процесу на базі автоматизованої оцінки його техніко-економічних параметрів ..... 89

## РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

***Стеценко І., Савчук В.*** Метод автоматизації тестування на проникнення вебатак ..... 98

***Смірнова Т.В.*** Формалізація та реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи ..... 104

***Хорошко В., Шелест М., Ткач Ю.*** Багатокритеріальна оцінка ефективності проєктів із забезпечення кібербезпеки ..... 114

***Lytvynov V., Dorosh M., Bilous I., Voitsekhovska M., Nekhai V.*** Development of the automated information system for organization's information security culture level assessment ..... 124

***Дубягін О., Гур'єв В., Фірсова І.*** Ефективність керуючого впливу на структурований об'єкт як числова характеристика міжрівневого балансу ..... 133

***Корнієнко С., Корнієнко І., Дмитрієв В., Павленко А., Камак Д.*** Формування кількісних характеристик випробувань для одержання точкових оцінок заданої якості ..... 140

## РОЗДІЛ ІІІ. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

***Сатюков А., Приступа А., Мошель М.*** Результати експериментальних досліджень впливу вологості дерев'яних матеріалів на проходження сигналів НВЧ діапазону ..... 156

***Сінчук О., Бойко С., Городній О., Некрасов А., Онищенко А., Ножнова М.*** Аспекти впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств ..... 168

***Єршов Р., Войтенко В.*** Частотно-імпульсний модулятор з адаптивною корекцією тривалості імпульсу ..... 177

***Sobianin I., Skonechnyi V., Yarova I.*** Portable electrocardiograph with GSM module for telemedicine ..... 191

***Abdulhamid M., Peter D.*** Remote health monitoring: fall detection ..... 199

***Губаревич О., Гулак С., Горобченко О., Скляренко І.*** Уточнений підхід до розрахунку втрат тягового двигуна пульсуючого струму ..... 206

## РОЗДІЛ ІV. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

***Миколенко С., Захаренко А.*** Дослідження впливу амарантового та льняного борошна на якість печива ..... 228

***Процан Н., Ткаченко Л.*** Активація ферментів під час розварювання житніх замісів підвищеної концентрації ..... 241
***Trembus I., Semenenko N.*** Oxidative-organosolvent delegification of wheat straw ..... 250
***Іщенко О.*** Плівки медичного призначення на основі полісахаридів..... 257
***Фролова Л., Бутиріна Т.*** Дослідження колірних та антикорозійних властивостей пігментів в системі Fe-Al-Mg-O ..... 264
***Скиба М., Воробйова В.*** Дослідження титану (IV) оксиду модифікованого наночастинками срібла для очищення стічних вод текстильних виробництв..... 272
***Челябієва В., Щерба Л., Оляченко Т.*** Використання житньої закваски в технології кисломолочних продуктів ..... 280
***Лялик А., Покотило О., Кухтин М., Бейко Л.*** Органолептичний і сенсорний аналіз сиркової пасти з лляною олією..... 287

**РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ**

***Антонова Д.*** Определение прогибов обычных и поврежденных железобетонных балок, усиленных углепластиком..... 296
***Крячок С.*** Сучасний стан геодезичного моніторингу аеродромних покриттів в Україні..... 305
***Дубельт Т.*** Дослідження впливу організаційно-технологічних факторів на тривалість реконструкції житлових будинків..... 315
***Бідаков А., Пустовойтова О., Распопов Є., Страшко Б.*** Порівняльний аналіз експериментальних досліджень та чисельних розрахунків міцності вклеєних стержнів у CLT панелях..... 321
***Іванишин В., Бугай М., Корзаченко М.*** Вивчення інженерно-геологічних умов ділянки під будівництво двоповерхової будівлі магазину квітів на пальовому фундаменті на вулиці Незалежності ..... 329
***Менейлюк І., Руссий В.*** Багатокритеріальний аналіз для вибору рішення укріплення схилу ..... 337

**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ**..... 345

# CONTENT

## SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE AND MACHINE BUILDING

***Bolotov M., Bolotov G.*** Criteria determination of the borders of glow discharge energy stability in the welding heating conditions ..... 9

***Pilipenko O., Kolesnik D., Berezniak A.*** Exactness and errors of gearing of helicopter reduxing gears ..... 18

***Lebediev V., Dubovyi O., Loi S.*** Formation (structuring) features and properties of heat protective coatings for plasma spraying ..... 32

***Murashkovska V., Podzolkina A., Sklyar V., Syvodid O.*** Analysis of the development trends of city public transport environment ..... 42

***Borak K.*** The prognostication of the change in soils abrasive properties to ensure the reliable operation of working bodies ..... 53

***Zakharova I., Royanov V.*** Objective reasoning of pulsator design features for the provision of pulsating spraying air flow during arc metallization ..... 65

***Kalchenko V., Kalchenko V., Venzhega V., Vinnik V.*** Modernization of the universal-binding machine with chpc VZ208F3 with the purpose of extension of technological possibilities for high-speed fresh machine ..... 72

***Litvin O., Pankov S.*** Robotic manipulators special purpose ..... 81

***Stelmakh N., Sapon S., Ryzhuk Ya.*** Selection of optimal technological process on the basis of automated assessment of its technical and economic parameters ..... 89

## SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

***Stetsenko I., Savchuk V.*** Automating web attack penetration testing method ..... 98

***Smirnova T.*** Formalization and implementation of the structure of the technological process of electric ARC spraying for the optimization experts system ..... 104

***Khoroshko V., Shelest M., Tkach Yu.*** Multi-criteria assessment of the project efficiency of cyber security provisions ..... 114

***Lytvynov V., Dorosh M., Bilous I., Voitsekhovska M., Nekhai V.*** Development of the automated information system for organization's information security culture level assessment ..... 124

***Dubyagin A., Guryev V., Firsova I.*** Efficiency of managing impact on a structured object as a numerical characteristic of inter-level balance ..... 133

***Korniienko S., Korniienko I., Dmytriiev V., Pavlenko A., Kamak D.*** Formation of tests quantitative characteristics to obtain point quality assessments ..... 140

## SECTION III. POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICAL ENGINEERING

***Satukov A., Prystupa A., Moshel M.*** Results of experimental research on the influence of wood material moisture on the transmission of UHF band signals ..... 156

***Sinchuk O., Boiko S., Gorodny O., Nekrasov A., Onishchenko A., Nozhnova M.*** Aspects of implementation of solar power plants in the conditions of mining enterprises ..... 168

***Yershov R., Voytenko V.*** Pulse-frequency modulator with adaptive pulse duration correction ..... 177

***Sobianin I., Skonechnyi V., Yarova I.*** Portable electrocardiograph with GSM module for telemedicine ..... 191

***Abdulhamid M., Peter D.*** Remote health monitoring: fall detection ..... 199

***Gubarevych O., Goolak S., Gorobchenko O., Skliarenko I.*** Refined approach to the losses calculation of pulsating current traction engine ..... 206

## SECTION IV. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

***Mykolenko S., Zaharenko A.*** Effect of amaranth and flaxseed flour on cookies quality ..... 228

***Protsan N., Tkachenko L.*** Activating of enzymes while tenderizing of rye batches of high concentration while while tenderizing of rye batches of rye batches ..... 241

***Trembus I., Semenenko N.*** Oxidative-organosolvent delegification of wheat straw ..... 250
***Ishchenko O.*** Medical purpose films based on polysaccharides..... 257
***Frolova L., Butyrina T.*** Research of color and anti-corrosion properties of pigments in the Fe-Al-Mg-O-H system ..... 264
***Skiba M., Vorobyova V.*** Investigation titanium (IV) oxide modified by silver nanoparticles for textile wastewater treatment..... 272
***Cheliabiieva V., Shcherba L., Oliachenko T.*** Use of rye flour sourdough in the technology of dairy products ..... 280
***Lialyk A., Pokotulo O., Kukhtyn M., Beyko L.*** Organoleptic and sensory analysis of flaxseed cheese paste ..... 287

**SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY**

***Antonova D.*** Determination of deflections of conventional and damaged reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber ..... 296
***Kryachok S.*** Current status of aerodrome coatings geodetic monitoring in Ukraine ..... 305
***Dubelt T.*** The study of impact of technological and organizational factors on the durability of the reconstruction of the dwellings..... 315
***Bidakov A., Pustovoitova O., Raspopov Ie., Strashko B.*** Comparative analysis of experimental research and numerical calculations of glued-in steel rods strength in clt panels ..... 321
***Ivanyshyn V., Buhay V., Korzachenko M.*** Study of the engineering and geological conditions of the site for the construction of a two-story building of a flower shop on pile foundations on nezalezhnosti street ..... 329
***Meneiliuk I., Russyi V.*** Multi-criteria analysis for the selection of the decision for strengthening the slope ..... 337

**BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES** ..... 345

# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

*УДК 621.791.4:539.378.3*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-9-17*

*Максим Болотов, Геннадій Болотов*

## ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ В УМОВАХ ЗВАРЮВАЛЬНОГО НАГРІВУ

***Актуальність теми дослідження.*** *Для отримання зварних з'єднань із високолегованих сталей, тугоплавких та активних металів, твердих та надтвердих сплавів ефективно застосовують способи зварювання тиском, зокрема, дифузійне зварювання, яке має суттєві переваги поряд з іншими видами зварювання та дозволяє отримувати зварні конструкції складної форми з мінімальними деформаціями.*

***Постановка проблеми.*** *Серед джерел енергії, що застосовують для дифузійного зварювання, найбільш перспективним є нагрів тліючим розрядом, що горить у середовищі інертних або активних газів при їх тиску нижче за атмосферний і який забезпечує можливість регулювати в широких межах інтенсивність і локальність нагріву. Однак суттєвим недоліком тліючого розряду є його недостатня стабільність і здатність переходити в дугову форму, що може призводити до оплавлення і руйнування деталей.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Широка номенклатура зварних виробів визначає необхідність регулювання енергетичних характеристик розряду в значних межах. У цих умовах проблема керованості тліючого розряду стає безпосередньо пов'язаною із проблемою забезпечення його стабільності. Питанню підвищення стійкості тліючого розряду присвячена значна кількість досліджень, однак у своїй більшості вони відносяться до процесів хіміко-термічної або лазерної обробки матеріалів і не відповідають режимам горіння тліючого розряду, що застосовуються в умовах зварювання.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *До теперішнього часу, всі спроби забезпечити стабільне існування потужнострумового тліючого розряду в межах обраної форми в різних технологічних процесах не є вельми ефективними, оскільки не беруть до уваги мультифакторність проблеми, головним чином зосереджуючись лише на енергетичних аспектах.*

***Постановка завдання.*** *Метою роботи є вдосконалення методів керування і стабілізації потужнострумового тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Для забезпечення стабільності тліючого розряду в роботі запропоновано використовувати певний критерій, який поєднує параметри режиму горіння розряду з умовами переходу його в електричну дугу. Таким критерієм у роботі обрано співвідношення середньої напруги на розрядному проміжку, що визначається частотою виникнення дугових пробоїв, до напруги горіння стабільного тліючого розряду. За відсутності дугових пробоїв значення критерію наближається до максимального К = 1, зі збільшенням частоти імпульсів дуги величина К поступово знижується.*

*Оскільки стійкість тліючого розряду суттєво залежить від основних параметрів режиму, у роботі визначено інтегральний показник, який поєднаний із критерієм стійкості. У ролі такого показника застосовано добуток струму розряду та тиску газу. Встановлено аналітичну залежність критерію стійкості від обраного показника. Розроблено схему автоматичного пристрою переривання процесу нагрівання за умови, якщо фактичне значення коефіцієнта стійкості опуститься нижче його заданого значення.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Оптимальне регулювання тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання за умов забезпечення його стабільності може ефективно здійснюватися на основі критерію стійкості, що визначається як співвідношення середнього значення напруги на розрядному проміжку до напруги горіння стабільного тліючого розряду, і величина якого при оптимальному процесі становить 0,5…1.*

***Ключові слова****: дифузійне зварювання; тліючий розряд; стійкість розряду.*
*Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 14.*

**Актуальність теми дослідження.** У багатьох галузях промисловості створення нових конструкцій і машин супроводжується дедалі більш широким застосуванням металів і сплавів, що володіють високими механічними властивостями при різних температурах та навантаженнях, корозійною та ерозійною стійкістю в різних середовищах. До таких матеріалів належать високолеговані корозійностійкі та жароміцні сталі та сплави, тугоплавкі й активні метали, тверді та надтверді сплави. Більшість з цих матеріалів є вартісними, малопластичними, мають високу температуру плавлення і твердість. З'єднання цих матеріалів здебільшого пов'язане з певними труднощами.

© Болотов М. Г., Болотов Г. П., 2020

Для отримання зварних з'єднань таких матеріалів у однорідних та різнорідних сполученнях ефективно застосовують способи зварювання тиском, зокрема дифузійне зварювання. У порівнянні з іншими видами зварювання воно має суттєві переваги: відносно низьку температуру нагрівання виробів, обмежене зусилля стискання в процесі зварювання, що дає можливість отримувати зварні конструкції складної форми з мінімальними деформаціями.

**Постановка проблеми.** Для дифузійного зварювання застосовують різні види джерел нагріву, що відрізняються способом перетворення електричної енергії в теплову, інтенсивністю і локальністю нагріву. Широка номенклатура зварних з'єднань висуває до джерел енергії комплекс специфічних вимог, що стосуються їх прийнятності до будь-яких матеріалів, точності регулювання як повної, так і питомої потужності та температури нагріву.

Серед джерел енергії, що використовують для дифузійного зварювання, найбільш повно вказаним вимогам відповідає нагрівання тліючим розрядом, що горить у середовищі інертних або активних газів при їх тиску нижче за атмосферний і який забезпечує можливість регулювання в широких межах інтенсивності й локальності нагріву та розподіл теплової енергії у виробі [1].

Однак у виробничих умовах можуть скластися різні поєднання умов на поверхні виробу, який водночас є одним з електродів розряду – заземленим катодом, які можуть негативно впливати на стабільність горіння розряду й викликати його перехід у електричну дугу. Нагрівання із розподіленого стає концентрованим, що може призводити до оплавлення і руйнування зварюваного виробу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Подальший розвиток і розширення промислового застосування тліючого розряду як джерела енергії для процесів дифузійного зварювання вимагають вирішення проблем, пов'язаних із вдосконаленням способів керування технологічними параметрами розряду. Насамперед це викликано необхідністю автоматизації процесів нагріву металу (зварюваних деталей). Широкий діапазон зварних виробів – масою від одиниць грамів до десятків кілограмів визначає необхідність регулювання потужності розряду в значних межах. У цих умовах проблема керованості тліючого розряду стає безпосередньо пов'язаною з проблемою забезпечення стабільності його горіння. Основним завданням при цьому є визначення припустимих меж регулювання основних енергетичних характеристик тліючого розряду, що забезпечують високу продуктивність процесу при стійкому горінні розряду.

У роботі [2] оптимізація процесу дифузійного зварювання в тліючому розряді здійснюється на основі розробленої детермінованої динамічної моделі іонного нагріву, що дозволяє визначати значення основних параметрів режиму залежно від характеристик зварюваних деталей, але без їх зв'язку з умовами стабільності існування тліючого розряду. У роботах [3; 4; 5] здійснена спроба поєднати стабільність тліючого розряду з його енергетичними характеристиками, однак як параметри регулювання обраний лише один – струм розряду, і не береться до уваги, що процес іонного нагріву є багатофакторним. У роботі [4] сформульовані основні вимоги до керування параметрами нагріву тліючим розрядом та забезпечення стабільності його існування, але без практичних рекомендацій для їх реалізації. У робітах [6; 7] наведені результати застосування технічних засобів для стабілізації та керування тліючим розрядом для конкретних технологічних умов, що не дає змоги їх узагальнення.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Таким чином, до теперішнього часу, всі спроби забезпечити стабільне існування потужнострумового тліючого розряду в межах обраної форми в різних технологічних процесах, включаючи зварювання, паяння та поверхневу обробку матеріалів, не є вельми ефективними, оскільки вони не беруть до уваги мультифакторність проблеми, головним чином зосереджуючись лише на енергетичних аспектах. Це потребує подальших, більш ретельних досліджень цього питання.

**Метою роботи** є вдосконалення методів керування і стабілізації горіння потужнострумового тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання.

**Виклад основного матеріалу.** Зварювання здійснюється в режимі нормального тліючого розряду при підвищених тисках газу 2…15 кПа і струмах розряду 1…20 А. У цьому режимі величина катодного падіння потенціалу залежить лише від роду газу та зварюваного матеріалу, а густина струму на катоді (зварюваних деталях), при достатньо значній площі катода, залежить від роду газу і прямо пропорційна квадрату тиску газу (закон Геля). При збільшенні струму розряду площа катодної плями (площа тліючого світіння) на поверхні зварюваних деталей зростає пропорційно струму до заповнення всієї площі поверхні катода, після чого починається збільшення катодного падіння потенціалу (режим аномального тліючого розряду). При деякому повному струмі цей режим стає нестабільним, а на поверхні катода утворюється катодна пляма дуги, тобто режим горіння розряду з тліючого переходить у дуговий [8].

Аналогічне явище спостерігається і при підвищенні тиску газу, яке супроводжується збільшенням густини струму в катодній плямі нормального тліючого розряду. Зі збільшенням тиску газу зростає чутливість розряду до стану поверхні катода. У цих умовах на стабільність горіння тліючого розряду суттєво впливає емісійна неоднорідність поверхні катода, тобто його здатність емітувати електрони в результаті бомбардування іонами, обумовлена наявністю на поверхні зварюваних деталей забруднень різного роду, що мають меншу, ніж у металі, роботу виходу електронів [9]. На стабільність горіння тліючого розряду впливає також мікрорельєф поверхні катода, оскільки із підвищенням тиску газу висота шорсткості стає порівняною з протяжністю області катодного падіння потенціалу, що викликає найбільш суттєве викривлення електричного поля в поверхні катода. Це супроводжується виникненням мікродугових розрядів на вершинах мікронерівностей [10].

Підвищення тиску газу поряд зі збільшенням густини струму на катоді, призводить також до зростання питомої об'ємної потужності в позитивному стовпі розряду $jE$, де $j$ – густина струму в перерізі позитивного стовпа, а E – поздовжня напруженість електричного поля в стовпі. Збільшення $jE$ обмежене можливістю контракції (стискання) тліючого розряду й переходу його у шнурову форму. У шнуровому режимі напруга горіння розряду знижується, а зі зростанням струму або тиску газу шнур перетворюється в дуговий розряд [11].

При відносно незначних струмах і тисках газу переходи тліючого розряду у дуговий здійснюються епізодично і тривають обмежений час – 1…2 напівперіоди (рис. 1, *б*), після чого самовільно загасають. Частота таких дугових пробоїв визначається як характеристиками поверхні катода, так і режимом горіння розряду. Із підвищенням питомих енергетичних характеристик розряду частота таких пробоїв зростає (табл. 1) [12], і після досягнення певних значень струму і тиску газу тліючий розряд переходить у дугову форму (рис. 1, *в*).

Таблиця 1

*Порівняльна характеристика джерел живлення тліючого розряду*

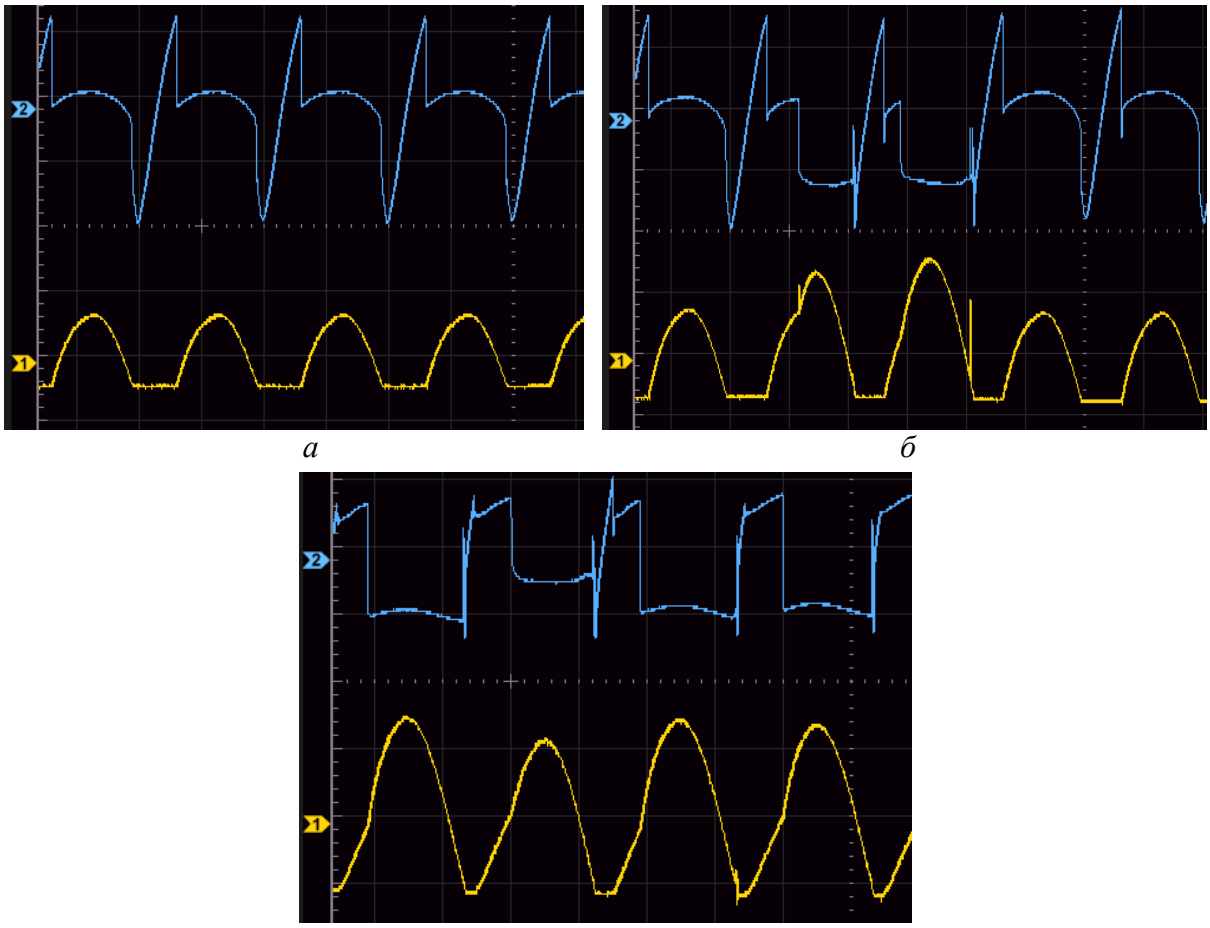
| **Вид тліючого розряду** | **Кількість дуг за 1 хв при струмі розряду, А** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 1,5 | 2 | 2,35 | 2,5 | 2,8 | 3 | 4 | 5 |
| З ІЄП* | 0,1 | | 0,2 | | 0,23 | | 0,25 | 2 | 4,75 |
| з $R_b$** | 0,1 | 0,25 | | 1,25 | | 5 | | 11 | 18 |

*– джерело живлення на основі індуктивно-ємнісного перетворювача (зовнішня характеристика наближається до вертикальної);

**– джерело живлення із стабілізуючим активним опором у колі розряду (зовнішня характеристика круто спадаюча).

У зв'язку з цим при зварюванні в тліючому розряді, особливо при автоматичному керуванні процесом, дуже важливим стає визначення меж зміни енергетичних параметрів тліючого розряду, що забезпечують високу продуктивність нагріву і водночас за-

хист виробів від оплавлення концентрованими дуговими розрядами. Для цього необхідно виділити будь-який показник (критерій), який дозволив би поєднати параметри горіння тліючого розряду з імовірністю переходу його в електричну дугу.



*а* *б* *в*

*Рис. 1. Осцилограми напруги (зверху) та струму тліючого розряду при стабільному (а) та перехідних (б, в) режимах горіння*

Найбільш характерною і однозначною ознакою переходу тліючого розряду в дуговий є значне зниження падіння напруги на розрядному проміжку. Це викликано насамперед, що падіння потенціалу в катодній області тліючого розряду (150…400 В) значно перевищує аналогічне значення в електричній дузі (10…30 В).

У цьому випадку як критерій стійкості горіння тліючого розряду можливо прийняти відношення:

$$K = \frac{U_{\text{р.ср}}}{U_{\text{р.о}}}, \tag{1}$$

де $U_{р.ср.}$ – середнє значення напруги на розрядному проміжку за контрольний період, що визначається частотою виникнення дугових пробоїв;

$U_{р.о.}$ – напруга стабільного горіння тліючого розряду при заданих параметрах режиму.

У свою чергу, співвідношення (1) буде пропорційним такому співвідношенню:

$$\frac{U_{\text{р.ср}}}{U_{\text{р.о}}} \sim \frac{\tau_{\text{р}}}{\tau_{\text{р}} + \tau_{\text{д}}}, \tag{2}$$

де $\tau_р$ – тривалість горіння тліючого розряду за контрольний проміжок часу;

$\tau_д$ – тривалість дугових пробоїв, що виникають у міжелектродному проміжку за той самий період.

За відсутності дугових пробоїв, коли нагрів здійснюється стабільним тліючим розрядом, тобто $\tau_д$ =0, а середня напруга на розряді $U_{p.ср}$ дорівнює $U_{p.o}$, критерій стійкості наближається до максимального значення $K$ =1. Зі збільшенням частоти імпульсів дуги або їх тривалості величина $K$ поступово знижується.

Як свідчать результати осцилографування перехідних процесів у тліючому розряді (рис. 1), формування електричної дуги в напівперіодах струму здійснюється через стадію тліючого розряду, тому середнє значення напруги на розрядному проміжку буде становити орієнтовно:

$$U_{\text{р.ср}} \approx \frac{U_{\text{р.о}}+U_{\text{д}}}{2}. \quad (3)$$

Зі збільшенням потужності тліючого розряду момент формування електричної дуги зміщується ближче до початку напівперіоду і при певних струмах розряду дугові пробої починають займати більшу його частину. У цих умовах критерій стійкості прагне до деякого мінімального значення Uд/Up.o (де Uд – падіння напруги на розрядному проміжку при дугових пробоях), тобто К → min.

Беручи до уваги різні наслідки для зварюваних деталей від дії дугових розрядів різної потужності та частоти виникнення, величину критерія стійкості можна варіювати в деяких межах. Електричні дуги, що виникають при горінні тліючого розряду малої потужності (малоамперного розряду), також будуть малопотужними і не забезпечать критичного впливу на зварювані деталі, тому можна прийняти К < 1. Зі збільшенням потужності виникаючих дугових розрядів та/або їх частоти критерій стійкості необхідно підвищувати К → 1.

Оскільки стійкість тліючого розряду, як вказано вище, великою мірою залежить від основних параметрів режиму його горіння – струму та тиску газу, доцільно визначити деякий інтегральний показник, що характеризує режим горіння тліючого розряду, і пов’язати його з критерієм стійкості К.

У роботі [13] у ролі такого показника прийнято струм розряду. Оскільки стійкість тліючого розряду визначається не тільки абсолютними значеннями його потужності, а й питомими енергетичними характеристиками в плямі нагріву та об’ємі розряду, які визначаються тиском газу, такий показник не можна вважати адекватним. У роботі [14] як інтегральний показник стійкості приймається критична величина добутку струму розряду і тиску газу $(I \cdot P)_{кр}$. Однак у цій роботі розглядається стійкість протяжного циліндричного та малоамперного тліючого розряду (струм менше 1 А) у трубках обмеженого діаметра. При цьому, як випливає з наведеного критерію, між струмом і тиском газу обраний лінійний зв’язок.

При зварюванні тліючий розряд не обмежується стінками і при зміні струму розряду і тиску газу може природним чином змінювати свої поперечні розміри. У таких умовах залежність між струмом і тиском газу, що характеризує стійкість розряду, має більш складний характер. На рис. 2 наведено отримані експериментально значення параметрів режиму, що відповідають початку появи дугових пробоїв (початку нестабільності розряду) $P_{нн}$, та стабільного переходу тліючого розряду в дуговий $P_{кр}$ для декількох газових середовищ – гелію, аргону, азоту.

Обробка кривих, наведених на рис. 2, свідчить, що в цьому випадку (для вільного тліючого розряду) інтегральний показник, що поєднує граничні значення струму розряду і тиску газу може бути представлений у вигляді добутку $(I^{1/2} \cdot P)_{кр}$. При цьому, згідно з рис. 2, гранична величина цього добутку становить для гелію – 82, аргону – 39, азоту – 26,6 $А^{1/2} \cdot$кПа.

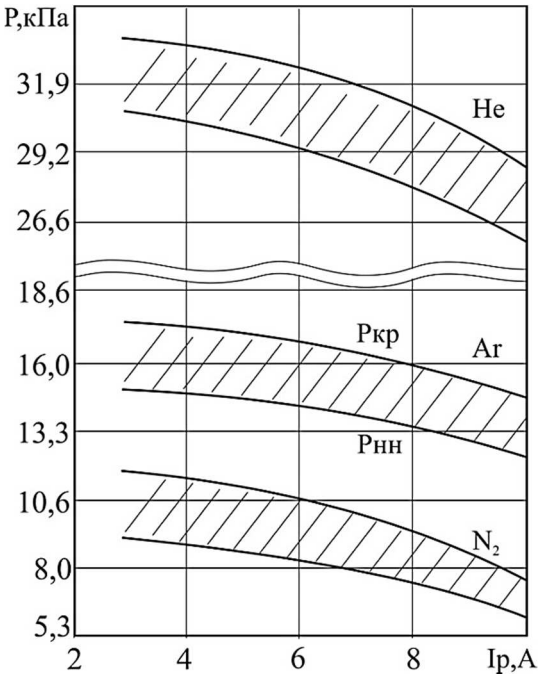



*Рис. 2. Експериментальні залежності граничних значень тиску газу (аргону, азоту та гелію) у робочій камері від струму тліючого розряду Ір. (Рнн – тиск газу, що відповідає початку появи нестабільностей тліючого розряду, Ркр – критичні значення тиску газу, при яких спостерігається перехід тліючого розряду у дуговий)*

Граничну величину критерію стійкості процесу нагріву, як було вказано, можливо задавати попередньо, зважаючи на конструктивні особливості зварюваних деталей – маси, товщини, форми перерізу. На рис. 3 наведена орієнтовна залежність граничних значень цього критерію від параметра $(I^{1/2}\cdot p)$ при зварюванні в середовищі азоту. При зварюванні на режимах, що суттєво нижче критичних $(I^{1/2}\cdot p) << (I^{1/2}\cdot p)_{кр}$, можливо помітно знизити значення критерію стійкості (до 0,5…0,6).

Водночас підвищення продуктивності нагріву вимагає проведення процесу на режимах, коли значення параметра $(I^{1/2}\cdot p)$ наближається до критичних, тобто нагрів здійснюється на значних струмах розряду.

У цих умовах навіть короткочасний вплив потужних дуг на виріб здатний призвести до його оплавлення, тому вимоги до критерію стійкості зростають, що проявляється в підвищенні його значення до 0,9…0,95.

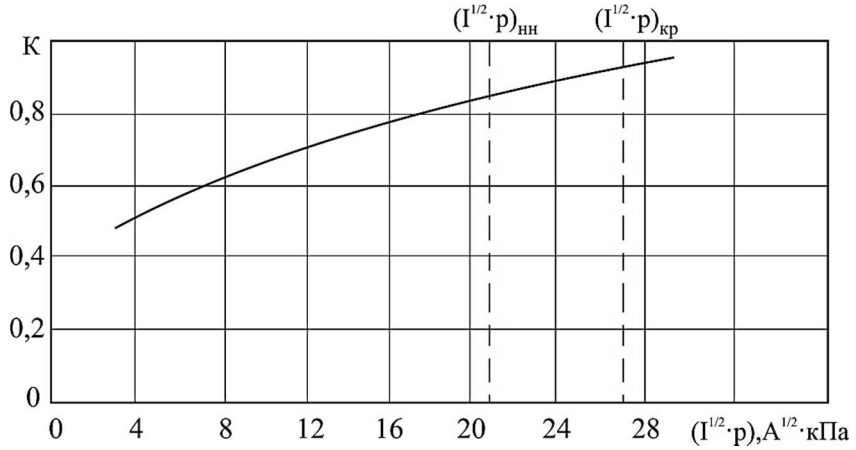



*Рис. 3. Залежність граничних значень критерію стійкості тліючого розряду К від інтегрального параметра $(I^{1/2}\cdot p)$*

Якщо в процесі зварювання фактична величина К опуститься нижче заданого рівня, процес нагріву повинен бути перерваним для попередження руйнування деталей, або при незмінному тиску газу здійснено зниження струму розряду до значень, коли $(I^{1/2}\cdot p) < (I^{1/2}\cdot p)_{кр}$.

Ця операція може бути здійснена як оператором, так і автоматично. На рис. 4 наведено структурну схему автоматичного виконання цієї операції.

На один із входів порівняльного елементу *1* подається задана напруга К·Up.o, яка дорівнює припустимому для цього процесу значенню середньої напруги на розряді Up.ср, визначеному з урахуванням заданої величини критерію стійкості (рис. 3). На другий вхід цього елемента через датчик напруги *5* та інтегратор *6* поступає фактичне значення Up.ср. Інтегратор забезпечує реєстрацію не миттєвих значень напруги на розрядному проміжку Up, а деякого середнього значення з урахуванням короткочасних перехідних процесів, що супроводжуються стрибками напруги.

Величина напруги горіння тліючого розряду Up.o може бути визначена попередньо, оскільки вона залежить переважно від роду й тиску газу *p* та міжелектродної відстані *l* і меншою мірою від струму розряду. Для визначення орієнтовної величини цієї напруги можна скористатись залежністю $Up.o = Ap_{mln}$, де A, m, n – емпіричні коефіцієнти, значення яких становлять для аргону 531; 0,12 та 0,11, а для азоту – 812; 0,19 та 0,15 відповідно.

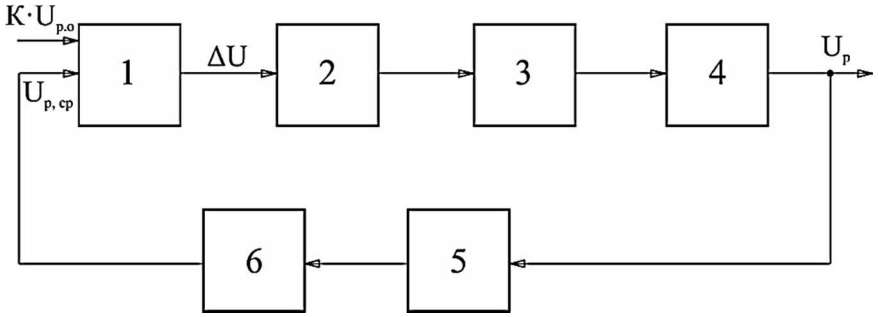



*Рис. 4. Структурна схема автоматичної стабілізації тліючого розряду на основі критеріальної оцінки межі стійкості горіння*

Якщо в процесі зварювання фактичне значення середньої напруги опуститься нижче заданого значення, пороговий елемент 2 відключить тиристорний випрямляч *3* живлення тліючого розряду *4*, або за допомогою фазорегулятора на його вході змінить кут відкривання тиристорів у бік зменшення струму розряду.

**Висновки відповідно до статті.** Оптимальне регулювання тліючого розряду в процесах дифузійного зварювання за умов забезпечення його стабільності може ефективно здійснюватися на основі критерія стійкості, що визначається як співвідношення середнього значення напруги на розрядному проміжку до напруги горіння стабільного тліючого розряду, і величина якого при оптимальному процесі становить 0,5…1.

**Список використаних джерел**

1. Котельников Д. И. Сварка давлением в тлеющем разряде. Москва: Металлургия, 1981. 116 с.
2. Болотов М. Г. Аналіз основних нестабільностей тліючого розряду середніх тисків в умовах обробки матеріалів. *Технічні науки та технології.* 2018. № 2 (12). С. 103–116.
3. Сиваков А. Л. Управление процессом диффузионной сварки. *Обмен опытом в радиопромышленности*. 1987. № 5. С. 58–62.
4. Котельников Д. И. Технологические особенности применения тлеющего разряда при сварке. *Технология и организация производства*. 1976. № 7. С. 57–59.
5. Напартович А. Л., Старостин А. Н. Механизмы неустойчивости тлеющего разряда повышенного давления. *Химия плазмы*. 1979. Вып. 6. С. 153.

6. Bolotov G. P., Bolotov M. G. Determination of external stabilizing resistor value in the glow discharge power supply while welding. *IEEE 37th International Conference «Electronics and Nanotechnology ELNANO'2017».* April 2017. P. 365–369.

7. Bolotov G. P., Bolotov M. G., Yushchenko S. M. Stabilization of high-current glow discharge under the welding conditions. *IEEE 38th International Conference «Electronics and Nanotechnology ELNANO'2018»*. April 2018. P. 521-525

8. Абильсиитов Г. А., Велихов Е. П., Голубев В. С., Лебедев Ф. В. Мощные газоразрядные $CO_2$-лазеры. Москва: Наука, 1984. 106 с.

9. Елецкий А. В., Рахимов А. Т. Неустойчивости в плазме газового разряда. *Химия плазмы*. 1974. Вып. 4. С. 123.

10. Котельников Д. И. Применение оборудования для сварки и пайки в тлеющем разряде. Чернигов: Облсовет НТО, 1980. 56 с.

11. Недоспасов А. В., Хайт В. Д. Колебания и неустойчивости низкотемпературной плазмы. Москва: Наука. 1979. 189 с.

12. Гайсин Ф. М., Саттаров Р. К., Халиков Р. А. Исследование перехода тлеющего разряда в электрическую дугу при высоких температурах. Казань: КАИ, 1975. 12 с.

13. Ульянов К. Н. Теория нормального тлеющего разряда при среднем давлении. *Теплофизика высоких температур*. 1972. Т. 10, № 5. С. 931.

14. Ecker, G., Kroll W., Zoller O. Thermal Instability of the plasma column. *Phys. Fluids*. 1964. V. 7, № 12. P. 2001.

## References

1. Kotelnikovб D. I. (1981) *Svarka davleniem v tleyuschem razryade [Glow discharge welding]*. Moscow: Metallurgiia [in Russian].

2. Bolotov, M. G. (2018). Analiz osnovnih nestabilnostei tliiuchoho rozriadu serednikh tiskiv v umovakh obrobki materialiv [Analysis of the main instabilities of medium pressure glow discharge in the conditions of materials treatment]. *Tekhnichni nauki ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies,* 2 (12), 103–116 [in Ukrainian].

3. Sivakov, A. L. (1987). Upravlenie protsessom diffuzionnoi svarki [Diffusion welding process control]. *Obmen opyitom v radiopromyishlennosti – Exchange of experience in the radio industry*, 5, 58–62 [in Russian].

4. Kotelnikov, D. I. (1976). Tekhnologicheskie osobennosti primenenisa tlesushcheho razriada pri svarke [Technological peculiarities of application of glow discharge during welding]. T*ekhnologiia i organizatsiia proizvodstva – Technology and organization of production*, 7, 57–59 [in Russian].

5. Napartovich, A. L., Starostin, A. N. (1979). Mekhanizmy neustoichivosti tleiushchego razriada povyshennogo davleniia [Mechanisms of instability of glow discharge of high pressure]. *Khimiia plazmy – Chemistry of plasma,* 6, 153 [in Russian].

6. Bolotov, G. P., Bolotov M. G. (2017). Determination of external stabilizing resistor value in the glow discharge power supply while welding. *IEEE 37th International Conference «Electronics and Nanotechnology ELNANO'2017»* (pp. 365–369). Kyiv [in Ukrainian].

7. Bolotov, G. P., Bolotov M. G., Yushchenko, S. M. (2018). Stabilization of high-current glow discharge under the welding conditions. I*EEE 38th International Conference «Electronics and Nanotechnology ELNANO'2018»* (pp. 521-525). Kyiv [in Ukrainian].

8. Abilsiitov, H. A., Velikhov, E. P., Golubev, V. S., Lebedev, F. V. (1984). *Moschnyie gazorazryadnyie SO2-lazeryi [Powerful CO2 discharge lasers]*. Moscow: Nauka [in Russian].

9. Eletskii, A. V., Rakhimov, A. T. (1974). Neustoichivosti v plazme gazovogo razriada [Instabilities in plasma gas discharge]. *Khimiia plazmy – Chemistry of plasma*, 4, 123 [in Russian].

10. Kotelnikov, D. I. (1980). *Primenenie oborudovaniya dlya svarki i payki v tleyuschem razryade [The use of equipment for welding and soldering in a glow discharge]*. Chernigov: Oblsovet NTO [in Russian].

11. Nedospasov, A. V., Khait V. D. (1979). *Kolebaniia i neustoichivosti nizkotemperaturnoi plazmy [Oscillations and instability of low-temperature plasma]*. Moscow: Nauka [in Russian].

12. Gaysin, F. M., Sattarov, R. K., Khalikov, R. A (1975). *Issledovanie perekhoda tleiushchego razriada v elektricheskuiu dugu pri vysokikh temperaturakh [Investigation of the transition of a glow discharge into an electric arc at high temperatures]*. Kazan: KAI [in Russian].

13. Ulianov, K. N. (1972). Teoriia normalnogo tleiushchego razriada pri srednem davlenii [The theory of normal glow discharge at average pressure] // Teplofizika vysokikh temperatur – Thermophysics of high temperatures, 10 (5), 931 [in Russian].

14. Ecker, G., Kroll W., Zoller O. (1964). *Thermal Instability of the plasma column*. *Phys. Fluids*, 7 (12), 2001.

*UDC 621.791.4:539.378.3*

*Maksym Bolotov, Gennady Bolotov*

# CRITERIA DETERMINATION OF THE BORDERS OF GLOW DISCHARGE ENERGY STABILITY IN THE WELDING HEATING CONDITIONS

***Introduction.*** *To obtain welded joints from high-alloy steels, refractory and active metals, hard and superhard alloys, pressure welding methods, in particular, diffusion welding, which has significant advantages along with other types of welding and allows to obtain complex-shaped welded structures with minimal deformations, are effectively used.*

***Problem statement.*** *Among the energy sources used for diffusion welding, the most promising is the heating by a glow discharge, which burns in an environment of inert or active gases at their pressure below atmospheric, and which makes it possible to regulate the intensity and locality of heating over wide limits. However, a significant drawback of a glow discharge is its lack of stability and the ability to transform into an arc shape, which can lead to the melting and destruction of parts.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *A wide range of welded products determines the need to regulate the energy characteristics of the discharge in considerable limits. Under these conditions, the problem of controllability of a glow discharge becomes directly related to the problem of ensuring its stability. A significant amount of research is devoted to the issue of increasing the stability of a glow discharge, but most of them are related to the processes of chemical-thermal or laser processing of materials and do not correspond to the burning discharge glow regimes used under welding conditions.*

***The research objective.*** *The aim of the work is to improve the management and stabilization of a high-current glow discharge in the processes of diffusion welding.*

***The statement of basic materials.*** *To ensure the stability of a glow discharge in the work, it was proposed to use a certain criterion that combines the parameters of the discharge mode with the conditions for its transition into an electric arc. The ratio of the average voltage across the discharge gap, which is determined by the frequency of occurrence of arc breakdowns, to the burning voltage of a stable glow discharge, is chosen as such a criterion. In the absence of arc breakdowns, the criterion value approaches the maximum K = 1, with an increase in the frequency of arc pulses, the K value gradually decreases.*

*Since the stability of a glow discharge significantly depends on the basic parameters of the mode, an integral index is defined in the work, which is connected to the stability criterion. As such an indicator, the product of discharge current and gas pressure was used. The analytical dependence of the stability criterion on the selected indicator is established. A scheme has been developed for an automatic device for interrupting the heating process, provided that the actual value of the stability coefficient drops below its specified value.*

***Conclusions.*** *Optimal regulation of a glow discharge in diffusion welding processes, provided that it is stable, can be effectively carried out on the basis of the stability criterion, defined as the ratio of the average value of the voltage across the discharge gap to the burning voltage of a stable glow discharge, and its value at the optimal process is 0.5 ... 1.*

***Keywords:*** *diffuse welding; glow discharge; discharge stability.*

*Fig.: 4. Table: 1. References: 9.*

**Болотов Максим Геннадійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Bolotov Maksym** – PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Welding Technology and CAD/CAM/CAE Systems of Building Structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** bolotovmg@gmail.com

**Scopus:** 57190377278

**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0915-4132

**Болотов Геннадій Павлович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Bolotov Gennady –** Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technology and CAD/CAM/CAE systems of building structures, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** bolotovgp@mail.ua

**ResearcherID:** H-5304-2014

**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0305-2917

Болотов М., Болотов Г. Визначення меж енергетичної стабільності тліючого розряду в умовах зварювального нагріву. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 9-17.

*УДК 629.735.45*
*DOI: 10.25140/2411-5363-20209-1(19)-18-31*

*Олег Пилипенко, Денис Колесник, Анатолій Березняк*

# ТОЧНІСТЬ ТА ПОГРІШНОСТІ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ВЕРТОЛЬОТНИХ РЕДУКТОРІВ

***Актуальність теми дослідження.*** *Якість робочих поверхонь зубчастих коліс формується під впливом конструктивних факторів (модуля, числа зубців і матеріалу коліс, твердості матеріалу заготовок та їх фізико-механічних властивостей) і технологічних факторів (швидкості та глибини різання, подачі, ступеня зношуваності інструменту). Зубчасту передачу можна виконати тільки з деяким наближенням до функціонально точної, оскільки елементи зубчастої передачі не можуть бути виготовлені без відхилень. Рівень цих відхилень визначається не тільки технічною, але й економічною доцільністю, а також можливостями виробництва.*

***Постановка проблеми.*** *Виявлення можливості збільшення ресурсів зубчастих передач, зокрема головного, проміжного і хвостового редукторів вертольотів Ми-8 та їх модифікацій.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що основними факторами, що формують якість робочих поверхонь зубчастих коліс, є конструктивні та технологічні. Сучасні досягнення у сфері конструювання та виробництва сприяють підвищенню точності та зменшенню погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Виявити основні причини виникнення погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів, взаємозв'язок факторів виробництва й параметрів точності зубчастих коліс та можливості керування точністю поверхонь зубців ще на стадії проєктування.*

***Мета статті.*** *Розглянути точність та погрішності зубчастих передач вертольотних редукторів.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Розглянуті показники точності зубчастих коліс за нормами кінематичної точності, плавності, контакту зубців та бокового зазору, вплив технології виробництва на якість зубчастих коліс. Функціональна точність забезпечується двома шляхами – конструктивним і технологічним. Приведені основні причини виникнення погрішності операції зубофрезерування, можливості керування точністю та якістю поверхонь зубців ще на стадії проєктування, взаємозв'язок факторів виробництва й параметрів точності зубчастих коліс.*

*Наведені приклади кінематограм показують неприйнятність кінематичного принципу нормування і контролю точності напружених зубчастих передач та передач з модифікованими поверхнями зубців. Тому нормування та оцінювання точності авіаційних зубчастих коліс здійснюють виключно за елементними показниками точності.*

*Показано, що колеса необхідно контролювати по накопиченій погрішності кроку, а не по биттю. Розглянуто контроль за допомогою плям контакту для конічних передач із прямими і круговими зубцями.*

***Висновок відповідно до статті.*** *Збільшення ресурсу передач здійснюється, поза іншими способами, підвищенням точності виготовлення зубчастих коліс, яка у високоресурсних і високонапружених передачах досягає 4-го ступеня точності за нормами плавності та контакту.*

*У багатьох випадках подальше підвищення точності при збільшенні ресурсу не є доцільним, оскільки висока навантаженість коліс на всіх режимах роботи забезпечує статичний розподіл навантаження між спряженими зубцями, що призводить до зменшення динамічного зусилля. Тут прослідковується основний принцип призначення точності авіаційних передач: точність призначається з урахуванням фактичної навантаженості та жорсткості спряжених зубців і всієї пружної системи загалом.*

***Ключові слова:*** *зубчасті передачі та колеса вертольотних редукторів; показники точності; погрішності.*
*Рис.: 11. Табл.: 1. Бібл.: 10.*

**Актуальність теми дослідження.** Якість робочих поверхонь зубчастих коліс формується під впливом конструктивних факторів (модуля, числа зубців і матеріалу коліс, твердості матеріалу заготовок та їх фізико-механічних властивостей) і технологічних факторів (швидкості та глибини різання, подачі, ступеня зношуваності інструменту.

Зубчасту передачу можна виконати тільки з деяким наближенням до функціонально точної, оскільки елементи зубчастої передачі не можуть бути виготовлені без відхилень. Рівень цих відхилень визначається не тільки технічною, але й економічною доцільністю, а також можливостями виробництва.

Зубчасті колеса передач повинні володіти достатньо високою міцністю, зносостійкістю і поверхневою твердістю, щоб забезпечити надійну роботу зубчастої передачі при найменших габаритах і масі.

**Постановка проблеми.** Виявлення можливості збільшення ресурсів зубчастих передач, зокрема головного, проміжного і хвостового редукторів вертольотів Ми-8 та їх модифікацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що основними факторами, що формують якість робочих поверхонь зубчастих коліс, є конструктивні та технологічні. Сучасні досягнення у сфері конструювання та виробництва сприяють підвищенню точності та зменшенню погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів.

© Пилипенко О. І., Колесник Д. М., Березняк А. М., 2020

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Виявити основні причини виникнення погрішностей зубчастих передач вертольотних редукторів, взаємозв'язок факторів виробництва й параметрів точності зубчастих коліс та можливості керування точністю поверхонь зубців ще на стадії проєктування.

**Мета статті.** Розглянути точність та погрішності зубчастих передач вертольотних редукторів.

**Виклад основного матеріалу. Показники точності.** За ГОСТ 1643-81 регламентується контроль 34 параметрів, які характеризуються 42 відхиленнями: кінематична точність, плавність роботи, контакт зубців, бічний зазор (таблиця) [1].

Таблиця

*Показники точності циліндричних зубчастих коліс (ГОСТ 1643-81)*

| Показники | Позначення | Ступінь точності | Об'єкт | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Шестерня і колесо | Зубчаста пара |
| **За нормами кінематичної точності** | | | | |
| Найбільша кінематична погрішність зубчастого колеса | $F_{ir}'$ | 3 … 8 | * | |
| Накопичена погрішність кроку зубчастого колеса | $F_{pr}$ | 3 … 8 | * | |
| Накопичення погрішності до *k* кроків | $F_{pkr}$ | 3 … 8 | * | |
| Погрішність обкату | $F_{cr}$ | 3 … 8 | * | * |
| Радіальне биття зубчастого вінця | $F_{rr}$ | 3 … 12 | * | |
| Коливання довжини загальної нормалі | $F_{Uwr}$ | 5 … 8 | | * |
| Коливання вимірювальної міжосьової відстані за оберт колеса | $F_{ir}''$ | 5 … 12 | | * |
| **За нормами плавності** | | | | |
| Місцева кінематична погрішність | $f_{ir}'$ | 3 … 8 | | |
| Циклічна погрішність зубцевої частоти | $f_{zzr}$ | 3 … 8 | * | * |
| Відхилення кроку зубчастого колеса | $f_{pb}$ | 3 … 12 | * | |
| Відхилення кроку зачеплення | $f_{ptr}$ | 3 … 12 | * | * |
| Погрішність профілю зуба | $f_{fr}$ | 3 … 8 | * | |
| Коливання вимірювальної міжосьової відстані на одному зубі | $f_{ir}''$ | 5 … 12 | | * |
| **За нормами контакту зубців** | | | | |
| Погрішність напрямку зуба | $F_{\beta r}$ | 3 … 12 | * | * |
| Сумарна погрішність контактної лінії колеса | $F_{kr}$ | 3 … 12 | | * |
| Відхилення відносних розмірів сумарної зони дотику | $F_{shr}'$ | 4 … 12 | | * |
| Відхилення відносних розмірів сумарної плями контакту передачі | $F_{shr}$ | 3 … 11 | | * |
| **За нормами бічного зазору** | | | | |
| Гарантований бічний зазор | $j_{n,\,min}$ | Усі види спряжень | | * |
| Найменше додаткове зміщення початкового контуру і допуск | $E_{Hs}$, $T_H$ | | | * |
| Найменше відхилення середньої довжини загальної нормалі і допуск | $E_{Wms}$, $T_{Wm}$ | | | * |
| Найменше відхилення довжини загальної нормалі і допуск | $E_{Ws}$, $T_W$ | | | * |
| Найменше відхилення товщини загальної нормалі і допуск | $E_{cs}$, $T_c$ | | | * |
| Граничне відхилення вимірювальної міжосьової відстані | $E_{as}''$, $E_{ai}''$ | | | * |
| Найменше відхилення розміру по роликах і допуск | $E_{Ms}$, $T_M$ | | * | |
| Відхилення міжосьової відстані | $f_{ar}$ | | | * |

Для прикладу виконання авіаційного зубчастого колеса на рис. 1 показане креслення з характеристиками точності за матеріалами швейцарської фірми «Рейсхауер» [2].

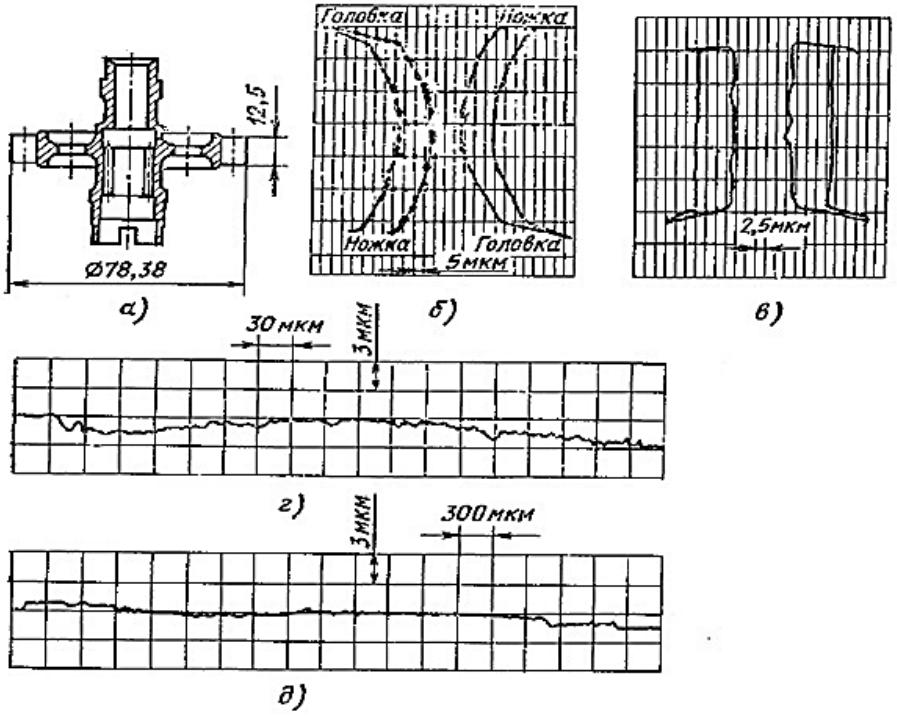



*Рис. 1. Зубчасте колесо з модифікованим профілем (m = 3,06 мм, z = 23, $\alpha = 20^0$, $\beta = 0^0$) та його параметри якості*:

*а – креслення колеса; б – діаграма профілю зубців; в – діаграма напрямку зубців; г – діаграма шорсткості по профілю; д – діаграма шорсткості по напрямку*

Як видно з рис. 1, профіль такого колеса не являє собою евольвенту, тобто він підданий повній модифікації, що під час зачеплення не забезпечує кінематично точного обертання, але добре компенсує шкідливий вплив деформацій, які виникають під експлуатаційним навантаженням.

Всі зубчасті колеса із заданою якістю виготовлення, незалежно від розміру зуба і модуля зачеплення, мають приблизно однаковий розмір погрішностей передачі, що робить порівняння відносно простим (зазвичай близько 5 мікрометрів) [3]. Похибка передачі переважно приймається як незалежна від розміру зубчастої передачі, що робить діаметр зубчастої передачі несуттєвою змінною, яку можна за необхідності відрегулювати. Щоб мати уявлення про діапазон значень ПЗ (Похибка зачеплення передачі), очікуваних від зубчастої пари, з літературних джерел [3; 4] можна резюмувати, що значення погрішності передачі від піку до піку ( ПППЗ) вище 10 мікрометрів вважаються типовими для грубих і дуже погано спроєктованих передач. На другому кінці спектра для високоточної зубчастої пари ПППЗ в 1 мікрометр було б дуже добре, але в дійсності рідко досягається [3]. Середні та дрібні зубчасті колеса здебільшого будуть цілком задовільними: при ПППЗ менше 3–4 мікрометрів на 1 зуб, і цей рівень досягається за допомогою якісних зубчастих коліс. Похибка передачі – це різниця між теоретичним вихідним кутовим обертанням і фактичним, і може бути записана алгебраїчно, з погляду кутового обертання, як $ПЗ(\mu м) = r_1 p\omega_1 - r_2 p\frac{z_2}{z_1}\omega_2$ [3]. Похибка відсутня, коли $r_1\omega_1 = r_2\omega_2$.

На рис. 2, 3, 4, 5 показані графіки залежності статичної похибки зачеплення від частоти обертання, передаточного числа, вплив частоти обертання на динамічну похибку зачеплення, а також залежність кутової швидкості від кута повороту.

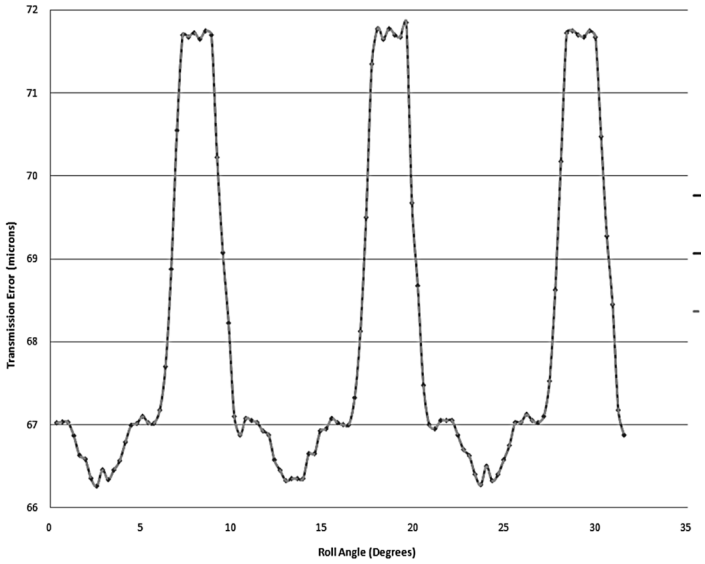



*Рис. 2. Статична похибка зачеплення при частоті обертання 1000 хв$^{-1}$*

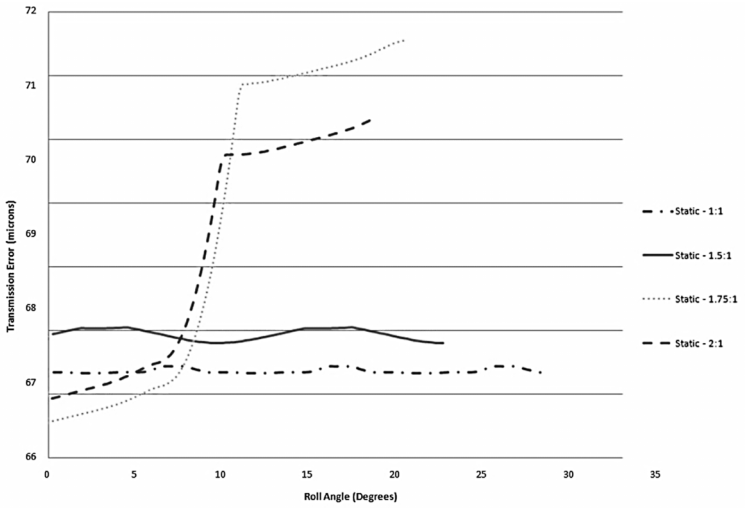



*Рис. 3. Залежність статичної похибки зачеплення від передаточного числа*

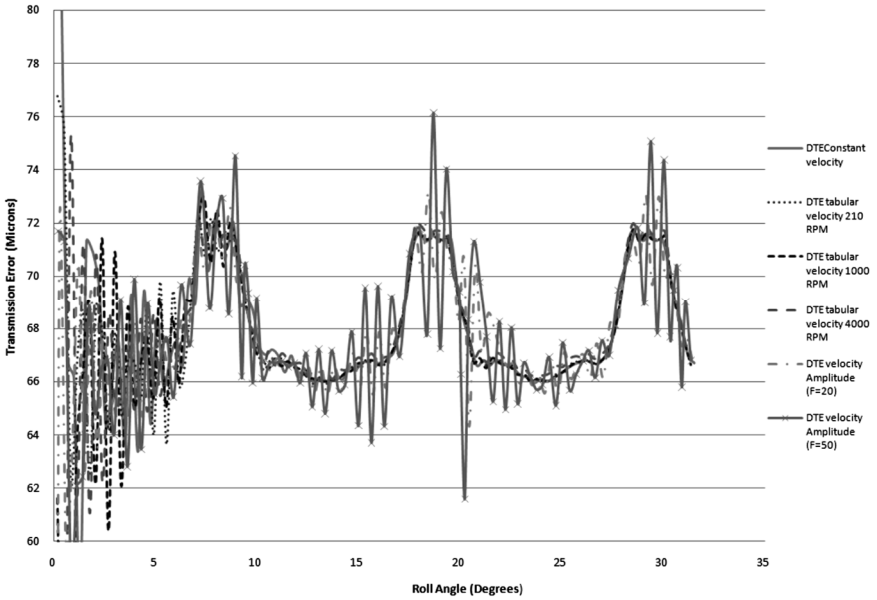



*Рис. 4. Вплив швидкості на динамічну похибку зачеплення*

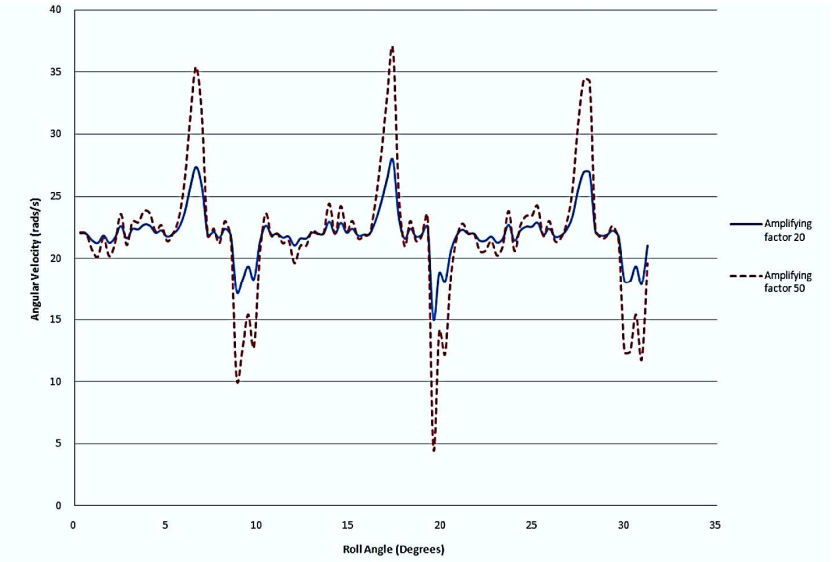



*Рис. 5. Кутова швидкість в залежності від кута повороту*

Загальною тенденцією є підвищення якості робочих поверхонь і підвищення вимог до точності формоутворення (рис. 6).

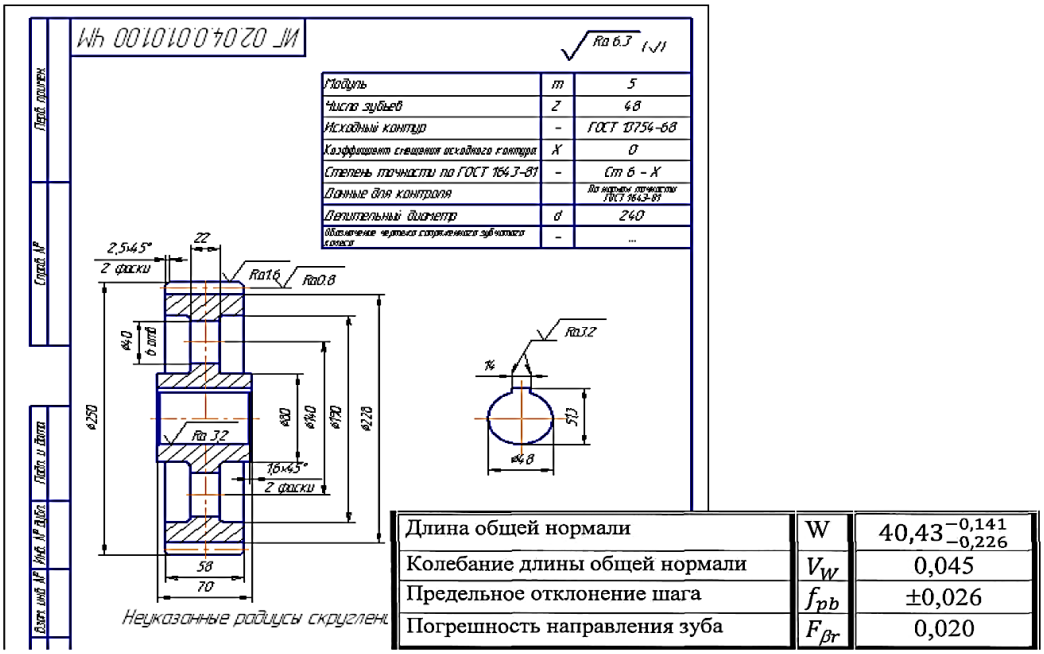



*Рис. 6. Креслення зубчастого колеса з параметрами контролю*

Кінематична точність зубчастого колеса – величина повної погрішності його повороту за один оберт, виникає в результаті непостійності радіального положення осей заготовки та інструменту, а також у результаті погрішностей обкату зубооброблювального верстату [5].

Плавність роботи передачі визначається похибками профілю і кроку зубців, що залежать від точності зуборізного інструменту і зубооброблювального обладнання.

Бічний зазор зубчастої передачі – відстань між бічними поверхнями зубців зубчастих коліс, яка визначає вільний поворот одного з зубчастих коліс при нерухомому парному зубчастому колесі. Залежить від точності багатьох параметрів зубчастих коліс (кроку зачеплення, профілю робочої поверхні зуба, ексцентриситету ділильного кола та ін.), а також від неточності монтажу передачі і температури в зоні контакту [5].

**Вплив технології виробництва.** Важливими показниками якості виготовлення зубчастих коліс також є фізико-механічні властивості матеріалів (твердість робочої поверхні, хімічний склад, глибина цементації, мікро- і макроструктура), вимоги до геометричної точності деталі та якості поверхні – шорсткість поверхні, величини наклепу, залишкових напружень.

Таким чином, точність і якість робочих поверхонь зубчастих коліс формуються протягом всього технологічного процесу обробки, тобто залежать від окремих характеристик якості, придбаних на різних операціях обробки. Великий вплив на точність зубчастих коліс спричиняє технологічна система, тобто стан зубооброблювального устаткування, призначення режимів обробки, вибір оснащення і різального інструменту [6]:

- зношування зуборізного інструменту, збільшує погрішність профілю зуба і висоту мікронерівностей;
- не оптимальні режими різання впливають на висоту нерівностей оброблюваного матеріалу;
- нерівномірна схема різання (наприклад, при роботі стандартною черв'ячно-модульною фрезою, у якої одночасно працюють дві або три різальні крайки, які зрізають шари різної товщини) породжує різне зношування різальних крайок;
- велика подача різального інструменту сприяє виникненню на оброблюваній поверхні хвилястості і гребінців – виникає відхилення евольвентного профілю зуба по висоті;
- при великій товщині зрізаного шару збільшуються інтенсивність зношування різального інструменту, сили різання і нарост;
- точність елементів технологічної системи операцій зубообробки впливає на: радіальні погрішності, що залежать від розташування заготовки та інструменту; тангенціальні погрішності, що залежать від порушення обкату інструменту і заготовки або від неточності ділення; осьові погрішності, що залежать від порушення точності переміщення інструменту вздовж осі заготовки, від погрішності робочої поверхні різального інструменту (похибки його проєктування, виготовлення і заточки) та ін. [6].

Функціональна точність забезпечується двома шляхами: конструктивним і технологічним, які слід застосовувати одночасно. Конструктивне рішення, що забезпечує функціональну точність, – це модифікація поверхонь зубців. Модифікація полягає в умисних відхиленнях поверхні зуба від евольвентної поверхні, дозволяє покращити експлуатаційні характеристики передачі за рахунок компенсації впливу погрішностей виготовлення і деформації зубців під навантаженням. Нині модифікацію профілів зубців застосовують у високошвидкісних, важконавантажених зубчастих передачах, якими є зубчасті передачі авіаційних редукторів.

Технологічні рішення – раціональна побудова технології на базі високоточного обладнання та інструменту, широке застосування зубошліфування, зубохонінгування, що забезпечують точність виконання форми і розмірів деталей. Наприклад, за допомогою даних про погрішності профілю зуба (рис. 7) [7] можна визначити наступні основні причини виникнення погрішності операції зубофрезерування:

- радіальні погрішності, що характеризуються зміною радіальної відстані між заготовкою та інструментом: биття фрези на оправці (може бути викликане дефектами різального інструменту, дефектами оправки);
- погрішності робочої поверхні різального інструменту – похибки проєктування, виготовлення, неправильна заточка фрези (може бути викликана установкою фрези на оправку з перекосом або неправильною установкою оправки в заточний верстат);
- тангенціальні погрішності, що характеризуються неточністю ділення або порушенням обкатування інструменту та виробу;
- осьові погрішності, що характеризуються порушенням точності переміщення інструменту вздовж осі виробу (великий люфт шпинделя фрези зубофрезерного верстату);

- погрішності розташування базового торця деталі, погрішності центрування деталі, погрішності вивірки пристосування – дефекти оправки (слабе закріплення оправки у верстаті або знос оправки), погрішності стола верстату (великий люфт стола зубофрезерного верстата).

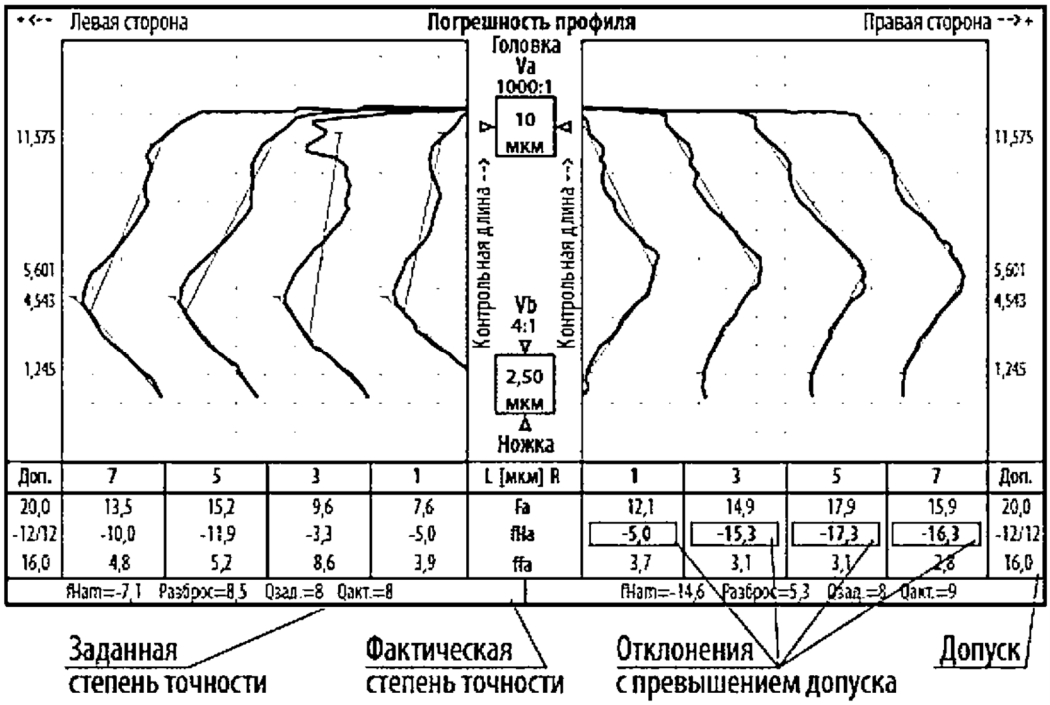



*Рис. 7. Приклад протоколу вимірювання погрішності зуба*

Результати досліджень показали [7], що ще на стадії проєктування зубчастих коліс можна керувати їх точністю та якістю поверхневого шару. Для цього в кожному конкретному випадку за допомогою моделювання технології виготовлення треба знаходити найбільш прийнятний варіант зменшення розмаху погрішностей (кінематичної погрішності – допуск на коливання довжини загальної нормалі $F_{Uwr}$ і плавності роботи – граничне відхилення кроку $f_{pb}$) [8], а також забезпечити необхідний параметр шорсткості робочих поверхонь $R_a$, глибини дефектного шару $X_M$, оскільки шорсткість робочих поверхонь зубців має великий вплив на стійкість проти заїдання.

При цьому необхідно прогнозувати параметри точності та якості поверхневого шару при різних методах обробки, призначати режими механічної обробки, що забезпечуватимуть отримання заданих параметрів, причому з найбільшою продуктивністю (рис. 8) [7].

На рис. 8 $f_{pb}$ – відхилення зубчастого колеса; $f_f$ – допуск на погрішність профілю зуба; $f_{pt}$ – граничне відхилення кроку; $F_\beta$ – допуск на погрішність напрямку зуба; $F_r$ – допуск на радіальне биття зубчастого вінця; $H$ – бічний зазор; $F_i$ – допуск на коливання вимірювальної міжосьової відстані за оберт зубчастого колеса; $f_i$ – допуск на коливання вимірювальної міжосьової відстані на одному зубі.

За останні 30 років суттєво змінилася технологія обробки зубчастих коліс, яка дозволяє реалізувати більш високі вимоги до точності коліс і суттєво збільшити продуктивність. Застосування цифрових систем управління дозволяє напряму використати результати виміру: при виготовленні на верстатах з ЧПУ вводяться коректори значення погрішності обробленої деталі та при обробці наступної деталі погрішності вже будуть скомпенсовані. Відмінною особливістю цих верстатів є комп'ютерне управління, вбудована вимірювальна система і гнучка система управління геометрією зубчастих коліс.

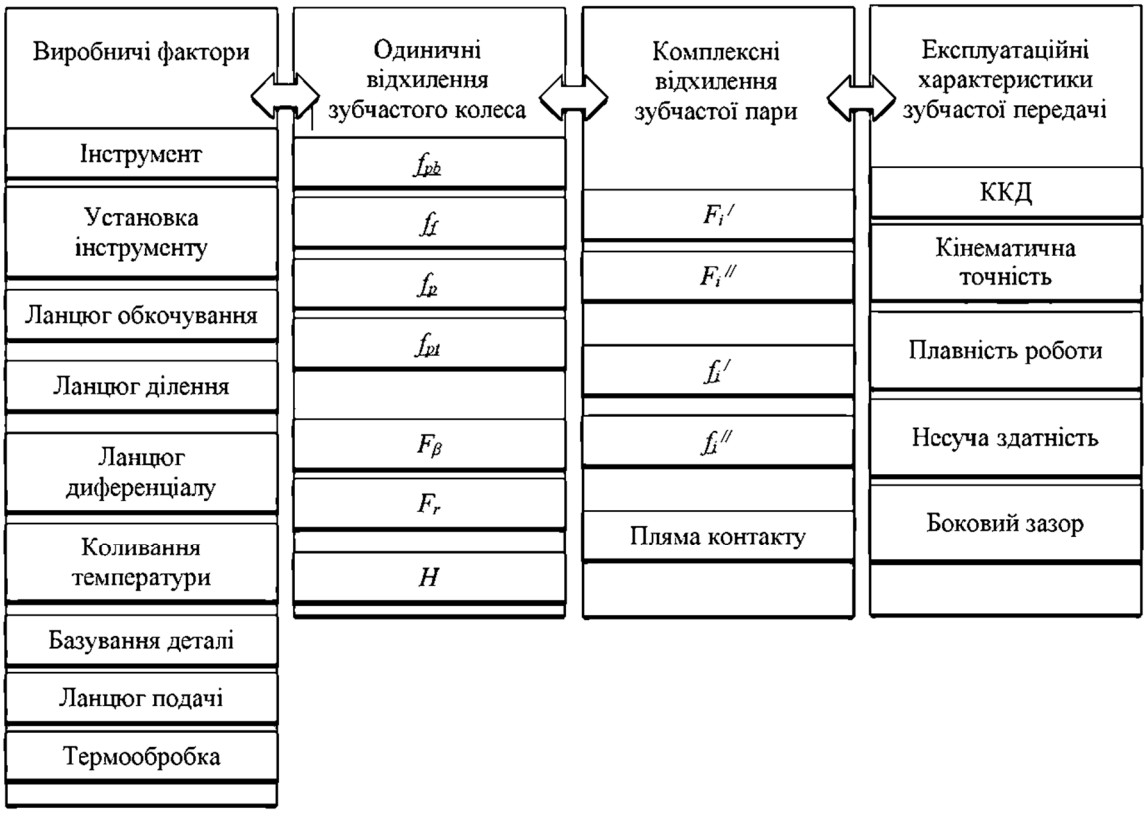



*Рис. 8. Взаємозв'язок факторів виробництва і параметрів точності зубчастих коліс*

Виробничий процес організовується так, щоб можливо було отримувати не тільки готові зубчасті колеса, але і інформацію про зміну погрішностей, на основі якої можна було б вводити в процес механічної обробки відповідне коректування і приймати оптимальні технологічні рішення. При цьому, паралельно з розрахунком геометричних параметрів зубчастих коліс пари, здійснюється розрахунок базових налагоджувальних установок верстатів для зубонарізання та зубошліфування і розрахунок математичного еталону для контрольно-вимірювальної машини. Застосування зубовимірювальних машин, які є засобами аналітичного контролю відхилень зубчастого вінця, дозволяє отримати інформацію про причини виникнення погрішностей і дає можливість також швидко здійснити коректування технології виготовлення, внести корективи в налагоджувальні установки верстату.

У [7] показано, що в процесі зубофрезерування черв'ячною фрезою відхилення радіусів евольвент по висоті профілю зуба $V_{\rho fr}$ залежать від: погрішностей інструменту, геометричного ексцентриситету різальних граней фрези, торцевого ексцентриситету фрези, коливання величини радіальних і тангенціальних відтиснень.

Технологічний процес зубообробки містить в своєму складі багатократну зміну технологічних баз, що призводить до виникнення великих погрішностей зубчастого вінця. Базовими поверхнями (в залежності від конструктивних особливостей зубчастих коліс) при обробці заготовок циліндричних зубчастих коліс можуть бути: для коліс з маточиною – отвір (подвійна напрямна база) і базовий торець (опорна база); для плоских зубчастих коліс – базовий торець (установочна база) і отвір (подвійна опорна база).

Конструкція колеса (вінці, з маточиною або колеса-вали) суттєво впливає на послідовність обробки і підбір необхідного обладнання. Технологічні процеси виготовлення зубчастих коліс (шевінгування, обкочування, зубохонінгування), що використовують метод вільного обкату відрізняються особливою нестабільністю вихідних параметрів точності внаслідок складних механізмів утворення, спадкування і перерозподілу погрішностей.

Для забезпечення і підвищення точності технологічних систем зубообробки необхідно виявити фактори, що суттєво впливають на величину погрішності при обробці, встановити механізми формування погрішностей, виявити технологічні джерела їх утворення, застосовуючи метод технологічного наслідування. Такий аналіз призводить, як правило, до вирішення багатоваріантної технологічної задачі й до багатократної зміні раніше прийнятих рішень.

Задача забезпечення необхідної точності зубчастих коліс в процесі їх виготовлення є найбільш складною задачею, що впливає на надійність зубчастої передачі, водночас необхідна точність коліс впливає на технологію їх обробки (головним чином на технологію обробних операцій, що визначають можливі погрішності виготовлення робочих поверхонь).

**Кінематограми і кінематична точність.** Звичайно точною за кінематикою і плавністю вважається та передача, кінематична погрішність якої являє собою пряму, яка співпадає з віссю абсцис. Такий графік показаний в довіднику [2] на рис. 10.2, *а*, тобто під час контролю така передача повинна обертатись ідеально плавно, забезпечуючи заданий закон руху без відхилень.

В авіаційній передачі під час роботи завдяки деформаціям зубців відбувається порушення ідеального закону руху, передача буде працювати не плавно, будуть мати місце шкідливі крайкові удари та контакти. Кінематограма, яка показана в довіднику [2] на рис. 10.2, *б*, віддзеркалює ці явища. Таким чином, передача, яка оцінена за ГОСТ 1643-72 та іншими державними стандартами під час контролю як точна, у роботі буде проявляти себе як неточна.

Обернена картина спостерігається на рис. 10.3 [2]. Якщо прийняти конструктивні заходи, що компенсують деформації зубців під час роботи, наприклад, різноконтурність (умисна різниця кроків зачеплення), то під час контролю у відповідності, наприклад, з ГОСТ 1643-72 і СТ СЭВ 186-75 передача буде оцінена як неточна (рис. 10.3, *а*) [2], але під час роботи виявить себе як ідеально точна (рис. 10.3, *б*). Передачі з повністю модифікованими поверхнями зубців (наприклад, конічне зачеплення) завжди будуть оцінюватися як неточні.

Наведені приклади показують неприйнятність кінематичного принципу нормування і контролю точності напружених зубчастих передач та передач з модифікованими поверхнями зубців. Цей принцип прийнятний для оцінки й нормування точності малонапружених зубчастих передач, наприклад, для передач загального машинобудування з робочими поверхнями зубців невеликої твердості.

Тому нормування і оцінку точності авіаційних зубчастих коліс здійснюють виключно за елементними показниками точності. Розвитком поелементної системи точності та контролю є введення поняття про перервну кінематичну погрішність (рис. 10.4, 10.5 [2]).

Для евольвентного прямозубого колеса – це евольвентограми однойменних профілів зубців, розташовані послідовно згідно з їх дійсним положенням на колесі. За графіком перервної кінематичної погрішності можна прослідкувати всі складові та їх взаємодію, по якому можна судити найбільш повно про ступінь точності виконання зубчастого колеса або пари зубчастих коліс з будь-якими формами профілів і ліній зубців на всій їх активній довжині:

$f_{ir}$ – погрішність профілю на всій активній довжині; для пари зубчастих коліс сумарна погрішність профілів двох зубців, що знаходяться у зачепленні, віддзеркалює показник $f_{iOr}$.

Для косозубих коліс з $\varepsilon_\beta > 1{,}25$ (які досить рідко застосовуються в авіатехніці) функцію передачі руху здійснюють в основному лінії зубців внаслідок «Ефекту косозубості» [6], тому введені показники $f_{br}$ ($f_{bOr}$) – кінематична погрішність лінії зуба (пари зубців). Взаємодія зубців у зонах переспряження (плавність, робота крайок)

відображається показниками $f_{ir}(f_{iOr})$. Широко застосовуваний показник точності, який на додаток є основним критерієм точності під час міцністних розрахунків, це відхилення кроку зачеплення – $f_{pbr}(f_{pbOr})$.

Кінематична точність зубчастих коліс і пар за перервною кінематичною погрішністю оцінюється показниками $F_{pkr}(F_{pkOr})$ і $F_{pr}(F_{pOr})$. Перший показник дозволяє судити про погрішність повороту колеса (пари) на частині оберту. Це дуже важливо для високошвидкісних зубчастих передач, якими і є в більшості випадків авіаційні передачі.

Відмінною особливістю коліс (пар), що мають повністю модифіковані профілі (для прямозубих зачеплень), або лінії зубців для конічних пар з круговими зубцями, в яких $\varepsilon_\beta$ > 1,5, є криволінійна форма поля допуску на профіль (лінію зуба). Це вирішує проблему зв'язку свідомого спотворення профілів (ліній) зубців з метою підвищення експлуатаційних властивостей передачі з технологічною точністю, тобто відкривається можливість будь-яких конструктивних рішень без ускладнення задач технології по забезпеченню певної точності виготовлення [2]. Яку форму не приймав би профіль, технолог має одні й ті ж границі, в яких допускаються погрішності. Державні стандарти такої можливості не дають. Допуски на показники точності є в галузевих стандартах.

Особливого підходу вимагає для оцінки точності використання елементних показників – биття зубчастого вінця *Frr* і коливання довжини загальної нормалі *FvWr* [5]. Під час шліфування зубчастих коліс на зубошліфувальних верстатах фірми «Мааг» у більшості випадків застосовується так званий «нульовий» метод, тобто шліфувальні круги встановлюються під нульовим кутом профілю оброблюваної рейки на відстані, що дорівнює довжині загальної нормалі (рис. 9).

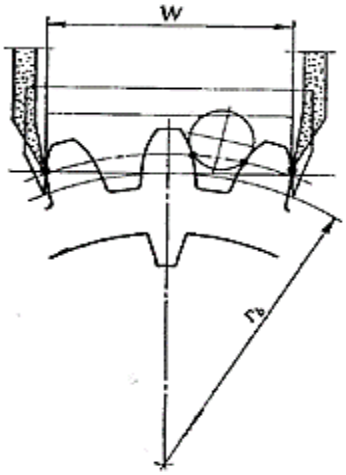



*Рис. 9. Схема обробки і вимірювання зубчастих коліс, шліфованих нульовим методом*

Під час шліфування нульовим методом коливання довжини загальної нормалі відсутні, оскільки відстань між шліфувальними кругами незмінна.

Протилежна картина в цьому випадку спостерігається з биттям. Ролик, що закладається у западини під час контролю, займає положення (виявляє биття) в залежності не тільки від геометричного ексцентриситету зубчастого вінця, як це має місце при цьому виді контролю, але і від погрішностей ділильного механізму верстату, тому що профілі, на які опирається ролик, оброблялися в різних положеннях (на різних пазах) ділильного диску. Накладання погрішностей двох джерел робить оцінку точності хибною. У такому випадку можуть бути забраковані придатні деталі та пропущені непридатні.

Такий самий результат може бути при виборі биття зубчастого вінця (*Frr*) як показника для конічних зубчастих коліс з круговими зубцями, оброблюваних однобічним методом, здебільшого на різних верстатах і відповідно при різних

установках. Звідси, коли кулька під час контролю биття лягає на бокові різноіменні поверхні зубців, то результат складається з чотирьох складових: погрішностей двох верстатів і двох установок на верстати, які складаються випадковим чином і по фазах, і по амплітудах погрішностей. Тому такі колеса необхідно контролювати по накопиченій погрішності кроку, а не по биттю [2].

Контроль по перервній кінематичній погрішності прямозубих і вузьких косозубих циліндричних коліс полягає у послідовному запису погрішностей евольвентних профілів.

**Плями контакту зубців.** Особливе питання стосується нормування плями контакту. В СТ СЭВ 186-75 і ГОСТ 1643-72 вона нормується відносними розмірами плями контакту у відсотках. Це вірно тільки для косозубих коліс, але для прямозубих коліс це невірно.

Під час контролю плями контакту пари зубчастих коліс на зубці ведучого або вимірювального колеса наноситься фарба, а потім при обкочуванні з парним колесом виходять відбитки на його зубцях, по яких судять про якість контакту. Під час контролю контакт пари зубців продовжується не більше, ніж на довжині кроку зачеплення. У той же час у будь-якій передачі конструктивно забезпечується перекриття профілів значно більше одиниці. Звідси випливає, що під час контролю профілі контактують один з одним тільки на обмежених ділянках, тобто по голівках зубців колеса або по ніжках. Причому візуально можна переконатися, що пляма на ніжці суттєво менше, ніж на голівці. І це при однакових погрішностях кроку зачеплення, тобто при однаковому рівні точності. Для $z$ = 20 різниця в розмірах досягає 40 %, а величина плями на ніжці дорівнює 36 %, тоді як, наприклад, по ГОСТ 1643-72 для 6-го ступеня точності оговорюється мінімум в 45 %. У той же час при ймовірному іншому поєднанні кроків зачеплення пляма розташовується на голівках зубців колеса і її величина буде дорівнювати 76%, тобто при будь-яких, навіть грубих погрішностях, пляма контакту буде відповідати самим високим рівням точності, зокрема, 3-му ступеню точності по ГОСТ 1643-72 [2].

Самим суттєвим є те, що для більшості випадків (окрім прецизійних передач порядку 3-4-го ступеня точності) розміри плями контакту по висоті зуба практично не залежать від точності виготовлення зубчастих коліс, а залежать від геометричних параметрів зачеплення і від поєднання погрішностей. Так, в прямозубих зачепленнях критерієм якості контакту повинна бути тільки довжина відбитку фарби. В такій же мірі це відноситься до модифікованих зачеплень, де висота плями контакту ще залежить і від розмірів модифікації. Тому норми на пляму контакту слід встановлювати в залежності від конкретних геометричних і конструктивних параметрів зубчастих коліс, а також повинні враховуватись конструкція і умови експлуатації зубчастої передачі. Це пов'язано з тим, що, наприклад, конічні колеса під навантаженням деформуються і переміщуються один відносно другого по причині нежорсткості корпусів, температурних деформацій і т. ін. На рис. 10 показано типове нормування плями контакту в прямозубому конічному зачепленні, а на рис. 11 – з круговими зубцями при осьовому перекритті з $\varepsilon_\beta < 1{,}5$ [2].

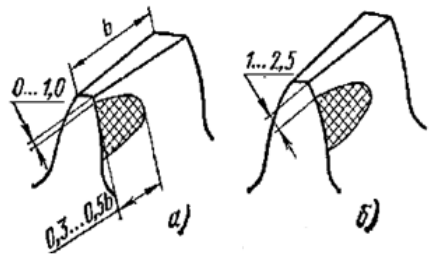



*Рис. 10. Пляма контакту в прямозубих конічних коліс:*
*а – ведуче колесо; б – ведене*

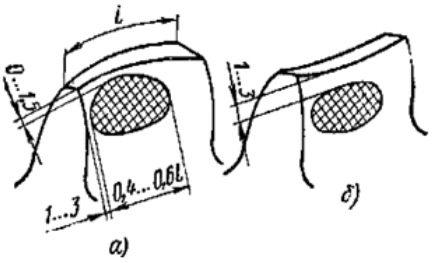



*Рис. 11. Пляма контакту у конічних коліс з круговими зубцями:*
*а– ведуче колесо; б – ведене*

Виключна увага при нормуванні плями контакту в конічних передачах приділяється величині відривів плями від вершини зуба, тому що ці відриви характеризують контакт в момент переспряження зубців. При виконанні правила – відриви на веденому колесі повинні бути рівними або більше відривів на ведучому – здійснюється варіант, коли розвантажується кромка на вході в зачеплення, створюється запас різності кроків для компенсації деформацій та переміщень конічних коліс.

Часто в літературі та в практиці пов'язують пляму контакту з плавністю роботи передачі. Такий зв'язок можна прослідкувати тільки в особливих випадках. В загальному випадку пляма не віддзеркалює плавність роботи ні в прямозубій конічній передачі, ні в передачі з круговими зубцями.

Збільшення ресурсу передач здійснюється, поза іншими способами, підвищенням точності виготовлення зубчастих коліс, яка у високоресурсних і високонапружених передачах досягає 4-го ступеня точності за нормами плавності та контакту. Наприклад, у разі підвищення ресурсу редуктора турбовентиляторного двигуна з 1000 до 4000 годин похибки основного кроку зменшились більше, ніж у три рази. В цьому випадку параметр $\psi$ навантаженості передачі [9; 10] зменшується у три-п'ять разів [2].

В цілому ряді випадків подальше підвищення точності при збільшенні ресурсу не є доцільним, оскільки висока навантаженість коліс на всіх режимах роботи забезпечує статичний розподіл навантаження між спряженими зубцями, що призводить до зменшення динамічного зусилля. Тут прослідковується основний принцип призначення точності авіаційних передач: точність призначається з врахуванням фактичної навантаженості та жорсткості спряжених зубців і всієї пружної системи в цілому. Зубчасті передачі середньої навантаженості виготовляються з точністю 6-5-5В або навіть 7-6-6В згідно ГОСТ 1643-72 [2].

**Висновки відповідно до статті.** Збільшення ресурсу передач здійснюється, поза іншими способами, підвищенням точності виготовлення зубчастих коліс, яка у високоресурсних і високонапружених передачах досягає 4-ого ступеня точності за нормами плавності та контакту.

У багатьох випадках подальше підвищення точності при збільшенні ресурсу не є доцільним, оскільки висока навантаженість коліс на всіх режимах роботи забезпечує статичний розподіл навантаження між спряженими зубцями, що призводить до зменшення динамічного зусилля. Тут прослідковується основний принцип призначення точності авіаційних передач: точність призначається з врахуванням фактичної навантаженості та жорсткості спряжених зубців і всієї пружної системи загалом.

## Список використаних джерел

1. ГОСТ *1643-81* Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Москва*:* Изд-во стандартов*, 1981. 45 с.*

2. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: спрвочник / под ред. Э. Б. Вулгакова. Москва: Машиностроение, 1982. 375 с.

3. Transmission Error in Spur Gears: Static and Dynamic Finite-Element Modeling and Design Optimization by Raul Tharmakulasingam. Unated Kingdom. October 2009.

4. Smith J. D. Gear Noise and Vibration. 2nd Edition, *Marcel Dekker Inc*., New York, 2003.

5. Нежурин И. П. Кинематическая точность зубчатых колёс и её контроль. *Стандартизация*. 1963. № 6. С. 8-14.

6. Калашников Н. А. Точность в машиностроении и её законы. Москва: Машгиз, 1950. Ч. 2. 147 с.

7. Жукова С. И. Разработка метода технологического обеспечения противозадирной стойкости в кромочной зоне контактирования эвольвентных цилиндрических зубчатых колёс редукторов газотурбинных двигателей: дис. … канд. техн. наук / Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва. Рыбинск, 2018. 166 с.

8. Шаповалов О., Колесник Д., Пилипенко О. Застосовуваність і залежність параметрів зубчастих передач авіаційних редукторів від технологічних процесів їх виготовлення. *Технічні науки та технології.* 2019. № 3(17). С. 37–48.

9. Айрапетов Э. Л., Айрапетов С. Э., Евсикова Н. А., Мельникова Т. И., Шоломов Н. М. Влияние погрешностей изготовления и монтажа передачи на динамическую нагруженность зубьев колёс. *Колебания и виброакустическая активность машин и конструкций*. Москва: Наука, 1986. С. 169–173.

10. Шаповалов О., Колесник Д., Пилипенко О. Навантаженість зубчастих передач вертольотних редукторів та їх напружено-деформований стан. *Технічні науки та технології.* 2018. № 4(14). С. 41–54.

## References

1. GOST 1643-81. *Osnovnye normy vzaimozamenjaemosti. Peredachi zubchatye zilindricheskie. Dopuski [Basic norms of interchangeability. Transmissions toothed cylindrical. Admittances]*. Moscow: Izd-vo standartov [in Russian].

2.. Vulgakov, A. B. (Ed.) (1982). *Aviazionnye zubchatye peredachi i reduktory [Aviation gearing and reducers]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

3. Transmission Error in Spur Gears: Static and Dynamic Finite-Element Modeling and Design Optimization by Raul Tharmakulasingam. Unated Kingdom. October 2009 [in English].

4. Smith, J. D. (2003). Gear Noise and Vibration. 2nd Edition, *Marcel Dekker Inc*., New York [in English].

5. Niezhurin, I. P. (1963). Kinematicheskaja tochnost zubchatyh koljos i ee control [Kinematics exactness of gear-wheels and her control]. *Standartizatsiia – Standardization*, 6, 8-14 [in Russian].

6. Kalashnikov, N. A. (1950). *Tochnost v mashinostroenii i ee zakony [Exactness in an engineering and her laws]* (Vol. 2). Moscow: Mashgiz [in Russian].

7. Gukova, S. I. (2018). *Razrabotka metoda technologicheskogo obespechenia protivozadirnoj stojkosti v kromochnoj zone kontaktirovania evolventnyh zilindricheskih zubchatyh koles reduktorov gazoturbinnyh dvigatelej [Development of method of the technological providing of antiscuff firmness is in the edge area of contact of involute cylindrical gear-wheels of reducing gears of turbo-engines]* (Candidate's thesis). Rybinskii gosudarstvennyi aviazionnyi tehnicheskii universitet imeni P. A. Solovieva, Rybinsk [in Russian].

8. Shapovalov, O., Kolesnik, D., Pilipenko, O. (2019). Zastosovuvanist i zalezhnist parametriv zubchastyh peredach aviazijnyh reduktoriv vid tehnologichnyh prozesiv jih vygotovlennja [Applied and dependence of parameters of gearing of aviation reducing gears from technological processes their making]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies,* 3 (17), 37–48 [in Ukrainian].

9. Irapetov, E. L., Irapetov, S. E., Evsikova, N. A., Melnikova, T. I., Sholomov, N. M. (1986). Vliianie pogreshnostei izgotovleniia imontazha peredachina dinamicheskuiu nagruzhennost zubiev koles [Influence of errors of making and editing of transmission on dynamic loading of teeth of wheels]. In *Kolebaniia i vibroakusticheskaia aktivnost mashin i konstruktsii – Vibrations and vibroacoustic activity of machines and constructions.* Moscow: Nauka [in Russian].

10. Shapovalov, O., Kolesnik, D., Pilipenko, O. (2018). Navantagenist zubchastyh peredach vertoletnyh reduktoriv ta jih napruzheno-dephormovanyj stan [Load capacity of gearing of helicopter reducers and their stress-strained state]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies,* 4(14), 41–54 [in Ukrainian].

*UDC 629.735.45*

*Oleg Pilipenko, Denis Kolesnik, Anatoli Berezniak*

## EXACTNESS AND ERRORS OF GEARING OF HELICOPTER REDUXING GEARS

***Urgency of the research.*** *Quality of working surfaces of gear-wheels is formed under act of structural factors (module, numbers of teeth and material of wheels, hardness of material of purveyances and them phisico-mechanical properties) and technological factors (speeds and depths of cutting, serve, degree of worn down of instrument). Gearing can be executed only with some approaching to functionally exact, as elements of gearing can not be made without rejections. The level of these rejections is determined by not only technical but also economic expediency, and also manufacturabilities.*

***Target setting.*** *Exposure of possibility of increase of resource of gearing main, intermediate and tail reducing gears of helicopters of Mu-8 and their modifications.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *From the analysis of literary sources it is possible to make conclusion that by basic factors, pilchard quality of working surfaces of gear-wheels, there are structural and technological, Modern achievements in the field of designing and production assist the increase of exactness and reduction of errors of gearing of helicopter reducing gears.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *To educe principal reasons of origin of errors of gearing of helicopter reducing gears, intercommunication of factors of production and parameters of exactness of gear-wheels and management possibility by exactness of surfaces of points yet on the stage of projecting.*

***The research objective.*** *To consider exactness and errors of gearing of helicopter reduxing gears.*

***The statement of basic materials.*** *The indexes of exactness of gear-wheels on the norms of kinematics exactness, smoothness, contact of teeth and sidelash, influence of technology of production on quality of gear-wheels are considered. Functional exactness is provided in two ways - structural and technological. Principal reasons over of origin of error of operation of the gear milling are brought, management possibilities by exactness and quality of surfaces of teeth yet on the stage of projecting, intercommunication of factors of production and parameters of exactness of gear-wheels.*

*Made examples of kinematograms show the unacceptability of kinematics principle of setting of norms and control of exactness of the tense gearing and transmissions with the modified surfaces of teeth. Therefore setting of norms and estimation of exactness of aviation gear-wheels is carried out exceptionally on the element indexes of exactness*

*It is shown that wheels must be controlled on the accumulated error of step, but not on beating. Control is considered by means of spots of contact for conical transmissions with lines and circular teeth.*

***Conclusion in accordance with the article.*** *The increase of resource of transmissions comes true, except another ways, by the increase of exactness of making of gear-wheels, that at high-resource and high-tension transmissions arrives at the 4-th degree of exactness on the norms of smoothness and contact.*

*In a number of cases further increase of exactness at the increase of resource beside the purpose, because high loading of wheels on all office hours provides static allocation of loading between the attended teeth, that results in decreasing dynamic effort. Basic principle of setting of exactness of aviation transmissions is here traced: exactness is appointed taking into account actual loading and inflexibility of the attended t6eeth and all resilient system on the whole.*

***Keywords:*** *gearing and wheels of helicopter reducing gears; indexes of exactness; error.*

*Fig.: 11. Table: 1. References: 10.*

**Пилипенко Олег Іванович** – доктор технічних наук, професор, керівник секції основ конструювання машин кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна), провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).
**Pilipenko Oleg** – Doctor of Technical Sciences, Professor, leader of the Fundamental Machine Design section, the Welding Technology and Automatized Projecting of Building Structures Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine), leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** opilip@ukr.net
**ORCID:** http//orcid.org/0000-0003-0590-0107
**Scopus Author ID:** 16510833000
**ResearcherID:** G-2533-2016

**Колесник Денис Миколайович** – начальник науково-дослідної лабораторії, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).
**Kolesnik Denis** – Chief of research laboratory, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** denis1971@ukr.net
**ORCID:** http//orcid.org/0000-0001-8833-570X

**Березняк Анатолій Миколайович** – старший науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).
**Berezniak Anatoli** – Senior Science Specialist, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** berezniak80@ukr.net
**ORCID:** http//orcid.org/0000-0003-4081-9152

Пилипенко О., Колесник Д., Березняк А. Точність та погрішності зубчастих передач вертольотних редукторів. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 18-31.

*УДК 621.793.72*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-32-41*

*Володимир Лебедєв, Олександр Дубовий, Сергій Лой*

# ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ (СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ) ТА ВЛАСТИВОСТІ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ПРИ ПЛАЗМОВОМУ НАПИЛЕННІ

***Актуальність теми дослідження.*** *Плазмове напилення для створення захисник покриттів у різних галузях машинобудування, ремонту та відновлення є достатньо поширеним, зокрема при покращенні показників стійкості в авіаційних та судових двигунах, турбінах завдяки відносній простоті, низький вартості компонентів, отриманні високих результатів.*

***Постановка проблеми.*** *Однак поряд з явними перевагами плазмових покриттів вони мають достатньо суттєві недоліки, зокрема ті, що напилюються як захист від впливу тепла й мають схильність до відшарування, зокрема при неефективних складових матеріалів для їх нанесення на вузли та деталі й недостатньо вивчені щодо властивостей.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Відзначено, що напилення, яке проводиться за допомогою плазмового потоку, є дієвим технологічним засобом отримання надійних покриттів, у тому числі й теплозахисних, при цьому показано, що поруч з уже проведеними дослідженнями є проблеми, які потребують подальших пошукових робіт.*

***Мета роботи.*** *Метою цієї роботи є визначення характеристик плазмових покриттів, розробка математичного опису одного з них для використання як одного з параметрів та порівняльний аналіз запропонованих та отриманих результатів, зокрема з тими, що вже існують на теперішній час.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Методами фізичних експериментів за вже існуючими методиками, спеціально розробленого математичного опису, отримання та детального опису й аналізу мікрошліфів покриттів при різних способах їх отримання встановлюються переваги покриттів, які нанесені способом плазмового напилення, при цьому підкреслено, що якісні покриття можуть бути отримані як в контрольованій, так не в контрольованій атмосфері.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Встановлено, що здебільшого на стійкість напиленого шару щодо теплових впливів впливає склад матеріалу для напилення, при цьому необхідно виконувати тришарове напилення різними за складом матеріалів для кожного шару при певних відстанях сопла плазмотрона від поверхні. Також необхідно враховувати потужність плазмотрона при виконанні процесу.*

***Ключові слова:*** *плазмове напилення; склад матеріалу; стійкість; теплопровідність; опис; мікротвердість; параметри; аналіз; мікрошліфи.*

*Рис.: 8. Табл.: 1. Бібл.: 13.*

**Актуальність теми дослідження.** Покриття, які наносяться на поверхню вузлів та деталей за допомогою плазмових потоків з метою покращення їх здатності до протидії руйнівному впливу середовища та процесів, в яких напилені деталі використовуються, належать до досить уживаних у техніці та технології різного походження та умов експлуатації. Відносно мала товщина напиленого шару та високі адгезійні властивості разом із високими показниками стійкості дає можливість їх використання у відповідальних конструкціях, таких як, наприклад, авіаційні та судові двигуни, газотурбінні установки тощо [1–3].

Однією з основних функцій, які використовують при створенні напилених покриттів, є теплозахист вузлів та деталей, які працюють при дії підвищених теплових навантажень. У цьому зв’язку до матеріалів напилення, способів їх нанесення висуваються високі вимоги, зокрема, щодо стійкості.

Поняття стійкості, як показано в роботах [4; 5], є комплексним і включає в себе достатньо широкий спектр характеристик та методик їх визначення. Це, зокрема, стосується мікроструктур плазмового напилення різними составами для найбільш ефективного щодо стійкості до теплового впливу покриття.

Дуже складним є завдання вивчення умов формування покриттів, їх структури та властивостей, у тому числі фізичних, щодо виконання ними їхніх службових вимог.

**Постановка проблеми.** Враховуючи те, що ефективність теплозахисних плазмових покриттів певною мірою залежить від теплопровідності захисного шару одним з перших кроків є вивчення мікротвердості теплозахисних покриттів із використанням відповідного лабораторного устаткування та створення математичного опису їх теплопровідності. Ці параметри є одними з основних для визначення порівняльних характеристик покриттів різного походження, які суттєво впливають на якість покриттів.

© Лебедєв В. О., Дубовий О. М., Лой С. А., 2020

Треба відзначити, що обґрунтовані та раціонально вибрані склад матеріалів, що транспортуються плазмовим потоком, режими роботи самого плазмотрона, розташування сопла відносно поверхні деталі, яка напилюються, є складовими для вибору технології напилення, яке забезпечить найбільш ефективно працюючий шар теплозахисного покриття в певних умовах роботи.

У зв'язку з вищенаведеним постає низка завдань – проблем, які треба, по-перше, виявити, а по-друге, виконати певні дослідження, які спрямовані на виявлення певних характеристик напиленого шару, які суттєво впливають на результати процесу плазмового напилення і які до цього часу були невідомі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Водночас у роботах [6–8] розглянуто деякі дослідження, які скеровані на виявлення напрямів підвищення якості напиленого шару. Це стосується вивчення напруженого стану напилених покриттів із розробкою відповідних рекомендацій та методик тощо.

Водночас досягнутого на сьогодні рівня знань щодо технологічного процесу плазмового напилення недостатньо для подальшого підвищення якості напилених виробів.

Сучасний стан методик вивчення, обладнання для проведення широкого дослідження стану напиленого шару [9–11] дає змогу виявити його нові властивості й на цій основі розробити нові техніко-технологічні рішення і запропонувати їх промисловості.

Наведені у вказаних роботах результати зокрема стосуються аналізу двох варіантів розроблених напилених плазмою ущільнень ПГ-10К-01+20%C(Ni) і ПГ-10К- 01+20%BN(Ni), які за корозійно-ерозійною і термічною стійкістю перевершують серійні ущільнення і можуть працювати в продуктах згоряння палива ДС, при температурах до 1000...1050 °С.

Сучасний стан методик вивчення, обладнання для проведення широкого дослідження стану напиленого шару [12–13] дозволяє виявити його нові властивості й на цій основі розробити нові техніко-технологічні рішення і запропонувати їх промисловості.

**Мета роботи.** Виявити найбільш ефективні структури напиленого плазмою теплозахисного покриття на основі порівнювальних досліджень мікроструктур, фізичних випробувань та з використанням математичного опису теплопровідності, як показника якості та стійкості шарів плазмового напилення.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження та опис (математичний та отриманих микрошліфів) властивостей та вибір ефективно працюючих шарів напилених плазмою покриттів проводили за декількома напрямами.

**1. Визначення теплопровідності покриттів**

Один із найбільш раціональних методів визначення властивостей теплозахисного покриття – це його теплопровідність, за рівнем якої можна судити про ефективність напиленого шару.

Фізичні дослідження теплопровідності були проведені на вимірнику теплопровідності типу ИТ-λ-400.

Експерименти з визначення теплопровідності покриттів при високих температурах проводили на модуляційному високотемпературному калориметрі КМВ – 2800 на спеціальних зразках, що мають форму диска.

З метою забезпечення одновимірності теплового потоку витримували співвідношення діаметр – товщина $D/\delta \geq 5$. У даних експериментах D = 20 мм; δ = 3 мм.

**Технічна характеристика КМВ-2800**

1. Розміри досліджуваного зразка:
діаметр, мм 8 - 25
товщина, мм 0,6-3,0
2. Діапазон вимірювання питомої теплоємності $C_p$, Дж/(кг·К) 151-2240
3. Діапазон вимірювання теплопровідності, Вт/(м·К) 120-630
4. Діапазон температур нагріву зразків, К 300-2800
5. Граничний тиск у камері при температурі 2000 К, Па $6{,}7 \cdot 10^{-3}$

Принцип дії калориметра заснований на регулярному тепловому режимі третього роду, тобто в процесі, в якому просторово-часові зміни температури системи не залежать від початкових умов. У цьому калориметрі регулярний режим третього роду здійснюється шляхом періодичного нагрівання однієї поверхні необмеженої (у математичному сенсі) пластини кінцевої товщини. У разі нагрівання шляхом дії теплового потоку, що змінюється за гармонійним законом, рівняння теплопровідності має вигляд

$$\Delta^2 F - ix^2 F = 0\,, \tag{1}$$

причому

$$F = \frac{\theta}{\theta_0} = \omega \cdot M \cdot C_p\,; \tag{2}$$

$$X = \sqrt{\frac{\omega}{a} \cdot L}\,, \tag{3}$$

де $\theta$ – амплітуда коливань теплового потоку, який поглинається зразком, Дж;

$M$ – маса зразка, кг;

$C_p$ – питома теплоємність матеріалу зразка, кДж/(кг·град);

$a$ – температуропровідність матеріалу зразка, м$^2$/с;

$L$ – товщина зразка, м;

$\omega$ – кругова частота модуляції теплового потоку, с$^{-1}$.

Функція $F$ підкоряється таким граничним умовам:

- на стороні, протилежній тій, що нагрівається $(X = 0)$

$$\frac{dF}{d\left(\frac{X}{L}\right)} = 0; \tag{4}$$

- на стороні, що нагрівається $(X = L)$

$$\frac{dF}{d\left(\frac{X}{L}\right)} = X^2. \tag{5}$$

Вирішування рівняння теплопровідності (1) при граничних умовах (4) та (5) дає вираз для амплітуди коливань температури на стороні, протилежній тій, що нагрівається:

$$\theta = \theta_0 \frac{X}{\sqrt{A_s^2(X) + B_s^2(X)}} \tag{6}$$

та вираз для зсуву фаз між вказаними коливаннями та коливаннями теплового потоку:

$$\varphi = \frac{\pi}{4} + arctg\ \frac{B_s(X)}{A_s(X)}, \tag{7}$$

де

$$A_s(X) = sh\frac{X}{\sqrt{2}} \cdot \cos\frac{X}{\sqrt{2}}; \tag{8}$$

$$B_s(X) = sh\frac{X}{\sqrt{2}} \cdot \sin\frac{X}{\sqrt{2}}. \tag{9}$$

Вирішування рівняння (7) відносно $X$ дає вираз:

$$X^2 = -0{,}064 \cdot \varphi^4 + 1{,}04 \cdot \varphi^3 - 4{,}1 \cdot \varphi^2 + 12{,}2 \cdot \varphi - 12{,}68. \tag{10}$$

Таким чином, вимірювання в калориметрі зсуву фаз $\varphi$ дозволяє при відомих величинах $\omega$ та $L$, використовуючи вираз (10) та (3), вичислити температуропровідність матеріалу зразка за формулою:

$$a = \frac{\omega \cdot L^2}{X^2}, \tag{11}$$

а вимірювання амплітуди коливань температури $\theta$ та амплітуди коливань теплового потоку дозволяє, використовуючи вирази (3) та (6) та з урахуванням зв'язку між теплофізичними властивостями

$$\lambda = \rho \cdot a \cdot C_p \tag{12}$$

дає можливість обчислити теплоємність та теплопровідність матеріалу зразка за формулами:

$$C_p = \frac{Q}{\theta} \cdot \frac{1}{M \cdot \omega} \cdot \frac{X}{\sqrt{A_s^2(X) + B_s^2(X)}} \tag{13}$$

$$\lambda = \frac{Q}{\theta} \cdot \frac{L}{S} \cdot \frac{1}{\sqrt{A_s^2(X) + B_s^2(X)}}, \tag{14}$$

де $S$ – площа поверхні зразка, що нагрівається, мм$^2$.

Наведене визначення теплопровідності (6) та (7) справедливе за умови малого теплообміну та малих коливань температури, тобто

$$\frac{\theta}{T} << 1. \tag{15}$$

Вказаний метод забезпечує комплексне визначення теплофізичних властивостей матеріалу зразка, який досліджується і має можливості внутрішнього контролю результатів вимірювань завдяки наявності надмірної інформації.

Джерелом надмірної інформації є природна багатократна повторюваність спостережень.

Результати вимірювань при заданій температурі одержують у результаті повторних спостережень, кількість яких дорівнює фіксованій кількості періодів коливань температури зразка.

Іншим джерелом надмірної інформації є використання періодичного теплового потоку складної форми, що дає можливість отримання для кожного гармонійної складової з частотою $\omega_к$ групи параметрів $Q_k$, $\theta_k$, $\Delta\varphi_k$. У цьому випадку кількість вимірювань теплофізичних властивостей матеріалу дорівнює кількості реєстрованих гармонік.

Перевагою методу плоских температурних хвиль є можливість обмежитися вимірюванням коливань температури всього лише в одній точці досліджуваного зразка.

Нагрів зразка здійснювали в циліндровій печі опору до заданої температури.

Потім, при ізотермічній витримці на зовнішню поверхню зразка подається модульований потік когерентного випромінювання безперервного лазера з частотою модуляції від 0, 5 до 15 Герц.

Енергія падаючого на зразок теплового променистого потоку визначається вимірником потужності. Під його дією в зразку збуджується температурна хвиля (коливання температури в цій точці зразка в часі).

Температура реєструється на тильній стороні (щодо випромінювача) поверхні зразка.

По зсуву фаз коливання температури на «гарячій» і «холодній» поверхні зразка може бути розрахована температуропровідність досліджуваного матеріалу (рівняння 11).

По загасанню амплітуди коливань, використовуючи вирази (12) і (13), розраховується теплопровідність і теплоємність.

На теплопровідність досліджувались зразки з плазмовим двошаровим покриттям (підшар: Co-Cr-Al-Y-Si, робочий шар: Co-Cr-Al-Y-Si +15% $ZrO_2$); зразки з плазмовим тришаровим покриттям (підшар: Co-Cr-Al-Y-Si, проміжний шар: Co-Cr-Al-Y-Si

+15%$ZrO_2$, робочий шар: $ZrO_2$) та для порівняння зразки з покриттям, отриманим електронно-променевим осадженням (робочий шар Co-Cr-Al-Y).

Результати проведених досліджень із використанням математичного апарату та фізичних експериментів наведені на рис. 1.

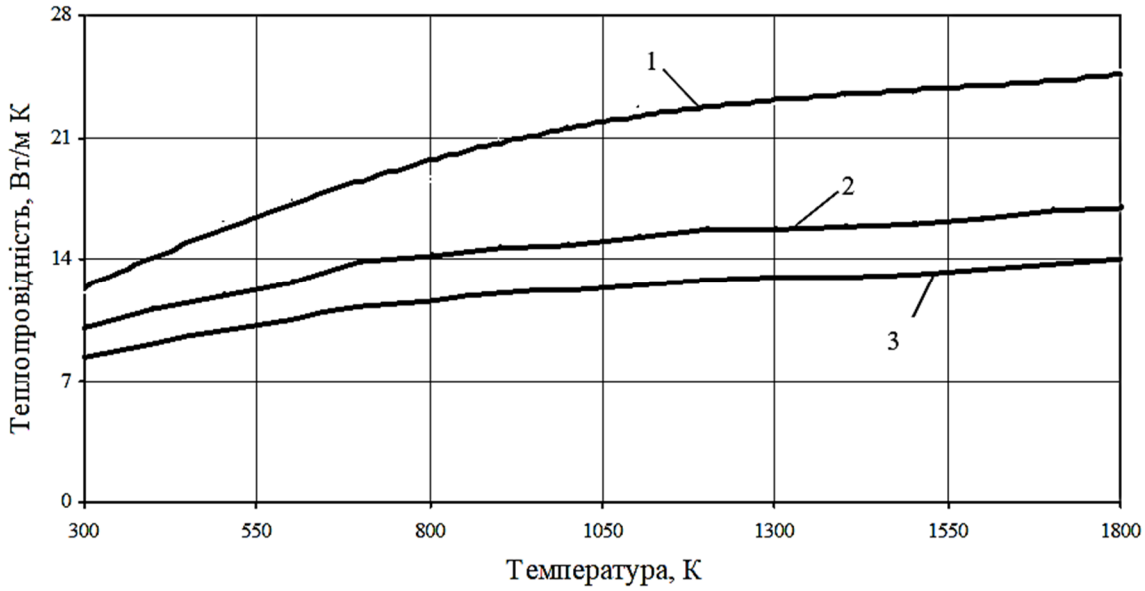



*Рис. 1. Результати досліджень на теплопровідність:*
*1 – плазмове двошарове покриття; 2 – електроно-променеве покриття;*
*3 – плазмове тришарове покриття*

**2. Дослідження мікротвердості теплозахисних покриттів**

Визначення мікротвердості покриттів виконувалося на приборі ПМТ-3, методом вдавлювання алмазної пірамідки з навантаженням 50 г.

Вимірювалася мікротвердість характерних фаз двошарового плазмового покриття, тришарового плазмового покриття з перехідним шаром та для порівняння покриття, отриманого електронно-променевим осадженням. Результати вимірювань наведені в таблиці.

Таблиця

*Результати досліджень мікротвердості покриттів*

| **Вид покриття** | **Фаза** | **Твердість ($H_{50}$), МПа** |
|---|---|---|
| Плазмове двошарове покриття:<br>підшар: Co-Cr-Al-Y-Si<br>робочий шар: Co-Cr-Al-Y-Si +15% $ZrO_2$ | сіра<br>темно сіра<br>світла<br>сіра | 4630<br>4630<br>6310<br>4630 |
| Плазмове тришарове покриття:<br>підшар: Co-Cr-Al-Y-Si<br>проміжний шар: Co-Cr-Al-Y-Si +15% $ZrO_2$<br>робочий шар: $ZrO_2$ | сіра<br>світла<br>сіра<br>світла | 5210<br>5350<br>6040<br>14200 |
| Електронно-променеве покриття:<br>робочий шар Co-Cr-Al-Y | <br>світла | <br>6084 |

Із наведених у таблиці даних можна зробити висновок, що найбільш високою мікротвердістю володіє плазмове тришарове покриття з проміжним шаром Co-Cr-Al-Y-Si +15%$ZrO_2$. Отже, зносостійкість такого покриття буде найбільш високою.

За результатами досліджень видно, що найменшою теплопровідністю володіє плазмове покриття з підшаром Co-Cr-Al-Y-Si, проміжним шаром Co-Cr-Al-Y-Si +15%$ZrO_2$, робочим шаром $ZrO_2$. Таким чином, найбільшого зниження температури лопатки можна досягти застосовуючи тришарові плазмові покриття.

**3. Дослідження мікроструктур плазмових покриттів**

Для визначення властивостей плазмових покриттів практичний інтерес представляють їх фазовий та структурний аналіз.

Фазовий склад початкових порошків, а також покриттів визначався методом рентгеноструктурного аналізу в Ni-фільтрованому $Cu_{k\alpha}$ – випромінюванні на дифрактометрі ДРОН-3, який працює в режимі запису дифрактограми. У результаті встановлено, що в $ZrO_2$·5% CaO знаходиться до 80-90 % кубічної фази, а в $ZrO_2 \cdot 7\%Y_2O_3$ не менше ніж 90 %, інше – моноклінна. Таким чином, додавання $Y_2O_3$ забезпечує більш повну стабілізацію діоксидуцирконія. Дослідження мікроструктури та розподілу елементів у поперечному перерізі покриття після термообробки здійснювали на рентгеноспектральному електрозондовому мікроаналізоторі – Superproba 733 фірми Jol (Японія) на мікрошліфах, які оброблено травителем Васильєва після електрополірування, при збільшенні в 1000 разів.

На рис. 2 та 3 представлені мікроструктури покриттів, які містять кераміку. Основа структури являє собою твердий розчин Ni - Co, оскільки відмічається підвищений вміст Ni и Co, в якому утворилися складні евтектичні структури.

У покриттях видно темні ділянки вздовж межі «підложка-покриття», вони особливо проявляються після випробувань на прожиг.

Випробування на прожиг (високотемпературну ерозійну стійкість) проводилися на устаткуванні й за методикою підприємства ДП НВКТ «Заря-Машпроект». Випробуванню піддавалися зразки типу пластин, розміром 3×40×115 мм. Поверхня покриття шліфована.

Випробування проводилися на стенді, що імітує експлуатацію покриття в суднових газотурбінних двигунах. Обдув пластин проводився з боку покриття потоком продуктів згорання важкого високосірчастого (до 2 % сірки) палива. Температура потоку 800-900 °С, швидкість – 250-300 м/с, час проведення досліджень – 200 годин.

Наявність темних ділянок може бути пояснена низькою якістю підготовки поверхні. У прикордонних ділянках підложки також спостерігається підвищений вміст Fe, C і Si на глибині до 10 мкм, що пояснюється дифузією останніх у підложку.

Наявність сплесків Zr в структурі на рис. 2 і відсутність останніх на рис. 3 свідчить про нерівномірний його розподіл. Відсутність сплесків Ca дозволяє судити про якісну стабілізацію порошку.

Отже, у результаті фазового і структурного аналізів встановлено наявність у рихлості графіту і кремнію, дифузійний перерозподіл Fe, C і Si в підложку на глибину до 10 мкм.

Також досліджені структури керамічних покриттів, покриттів на основі кобальту та тришарових покриттів із проміжним шаром, який являє собою суміш керамічного та металевого порошків.

На рис. 4 наведена мікроструктура плазмового тришарового покриття: підшар Ni-Cr-Al-Y-Ta, напилений у вакуумі; проміжний шар Ni-Cr-Al-Y-Ta + 10% $ZrO_2(7\%Y_2O_3)$, напилений у вакуумі; робочий шар $ZrO_2(7\%Y_2O_3)$, напилений на повітрі. Покриття напилене на пластину із матеріалу ЧС-104.

На рисунку 5 наведена мікроструктура плазмового покриття, отриманого напиленням у вакуумі порошкової суміші ПГ-10К-01 + 15%$ZrO_2(7\%Y_2O_3)$ на пластину із матеріалу ЧС-104. Товщина покриття до 0,1 мм.

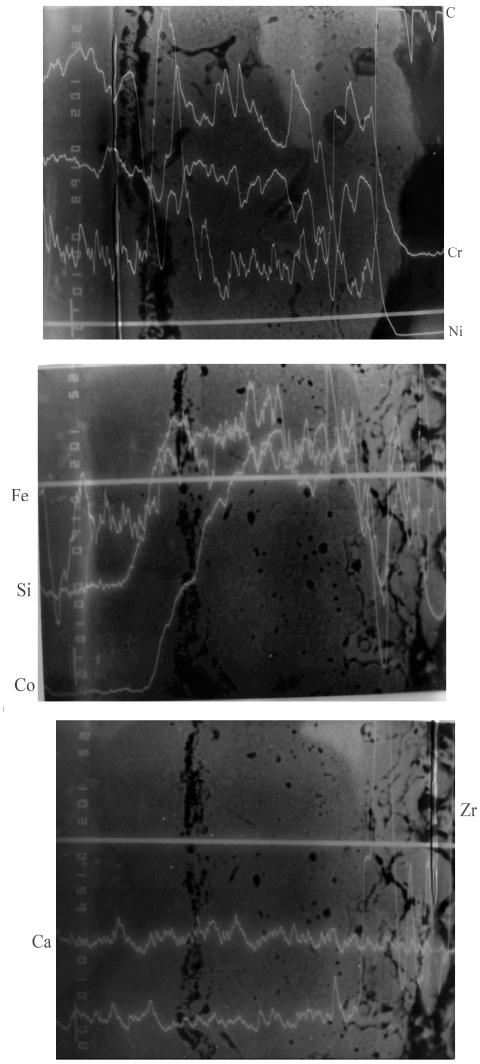



*Рис. 2. Мікроструктура покриття складу: підшар ПГ-10К-01, робочий шар – ПГ-10К-01 + 30% $ZrO_2$ (CaO)*

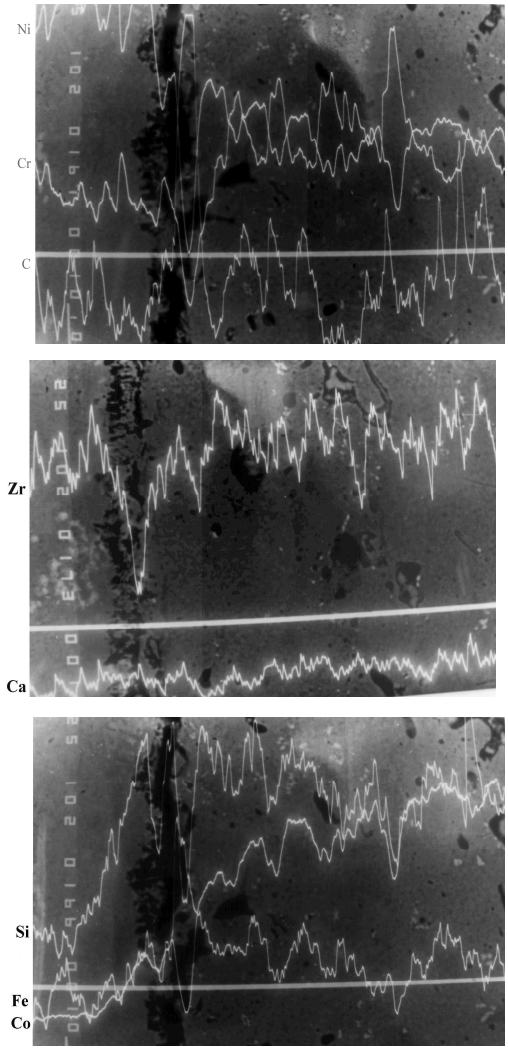



*Рис. 3. Мікроструктура покриття складу: підшар ПГ-10К-01, робочий шар – ПГ-10К-01 + 30% $ZrO_2$ (CaO) після випробувань на прожиг*

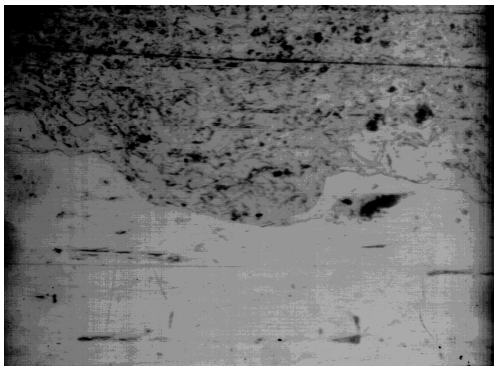


*Рис. 4. Мікроструктура тришарового плазмового покриття*

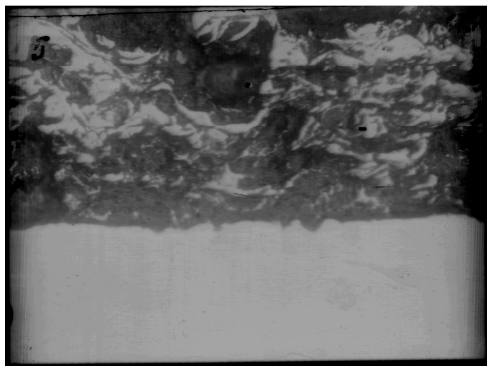


*Рис. 5. Мікроструктура плазмового покриття ПГ-10К-01 + 15%$ZrO_2$(7%$Y_2O_3$)*

На рис. 6 представлена мікроструктура плазмового покриття товщиною до 0,1 мм, отриманого напиленням порошку ПГ-10К-01 у вакуумі на пластину з матеріалу ЧС-104.

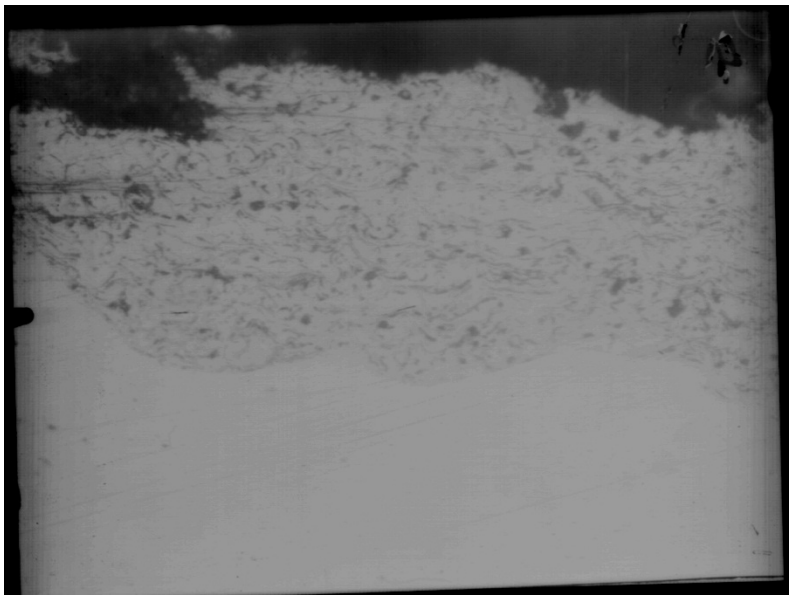


*Рис. 6. Мікроструктура покриття ПГ-10К-01*

**Висновки відповідно до статті.** На основі результатів проведених досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки:

- з технологічного і економічного погляду процес плазмового напилення в контрольованій атмосфері є найбільш оптимальним і економічно вигідним процесом для нанесення теплозахисних покриттів на соплові лопатки газотурбінних установок;
- для гарного проплавлення часток порошку Co-Cr-Al-Y-Si розраховане значення потужності плазмотрону становить 23 кВт, а для часток порошку $ZrO_2$ -30 кВт;
- згідно з результатами розрахунку газодинамічних параметрів плазмового струменя оптимальна дистанція напилення лежить у межах 650...750 мм, а тиск розрідженого середовища – 5,5-6 кПа;
- дослідження на стійкість до теплозмін плазмових покриттів показали, що найбільшою стійкістю володіють тришарові покриття: підшар Co-Cr-Al-Y-Si, проміжний шар – Co-Cr-Al-Y-Si+15% $ZrO_2$, робочий шар – $ZrO_2$;
- найбільшу мікротвердість мають тришарові плазмові покриття;
- згідно з результатами дослідження теплопровідності покриттів можна зазначити, що найбільшого зниження температури лопатки можна досягти, застосовуючи тришарові плазмові покриття.

**Список використаних джерел**

1. Viňáš J., Greš M., VaškoT.Cladding of wear-resistant layers in metallurgy and engineering *Materials Science Forum.* 2016. Vol. 862. P. 1-48. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.41.

2. Pfender L. F. Trends in Thermal Plasma Technology. *Thermal Plasma Torches and Technologies.* Cambridge International Science Publishing, 2003. Vol. 1. Plasma Torches. Basic Studies and Design. P. 20–41.

3. Лой С. А., Дубовой А. Н. Плазменное напыление защитных покрытий на детали горячего тракта судовых турбин. *Збірник наукових праць УДМТУ*. 1999. № 6 (366). С. 105–109.

4. Лой С. А., Дубовой А. Н. Повышение эффективности плазменного напыления защитных покрытий. *Збірник наукових праць УДМТУ*. 1999. № 2 (362). С. 68–75.

5. ДСТУ ISO 9000:2015 Системы управления качеством. Основные положения и словарь терминов (ISO 9000:2015, IDT).

6. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на термостойкость / Лебедев В. А. и др. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2014. № 11. С. 8–12.

7. Лебедев В. А., Лой С. А., Ермолаев Г. В., Матвиенко М. В. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на отрыв. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2014. № 12. С. 8–12.

8. Нечаев Л. М. Изучение напряженного состояния в поверхностных слоях для оценки качества защитного покрытия. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. Вып. 8. Ч. 1. С. 294-297.

9. Guessasma S., Montavon G., Coddet C. Modeling of the APS Plasma Spray Process Using Artificial Neural Networks: Basis, Requirements and an Example *Computational Materials Science*. 2004. Vol. 29 (3). P. 315-333.

10. Зеленина Е. А., Лоскутов С. В., Ершов А. В. Метод расчета физико-механических характеристик плазменного покрытия на подложке при испытаниях образцов на изгиб. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. № 2. С. 107–110.

11. Kuzmin V. I. et al Comparison of Thermophisical and Optical Methods of Temperature Distribution Measurements in Flow of Plasmatron with Interelectrode Inserts. *Изв. вузов. Физика*. 2007. Т. 50, № 9. С. 85–88.

12. Лебедев В. А., Лой С. А. Моделирование стойкости плазменного напыления лопаток газотурбинных двигателей и установок. *Modern question of production and repair in industry and in transport*: *materials of the 19th International Scientific f-nd Technical Seminar (February 18-23, 2019, Kosice, Slovak Republic* (pp. 97-99).

13. Новые возможности технологии плазменного напыления износостойких покрытий / Григорьев С. Н. и др. *Трение и износ*. 2013. Т. 34, № 3. С. 221–226.

## References

1. Vinas, J., Gres, M., Vasko, T. (2016). Cladding of wear- resistant layer sinmetallurgy and engineering. *Materials Science Forum*, 862, 1-48. Retrieved from https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.41.

2. Pfender, L. F. (2003). Trends in Thermal Plasma Technology. *Thermal Plasma Torches and Technologies*. Cambridge International Science Publishing. Vol. 1. Plasma Torches. Basic Studies and Design, 20-41.

3. Loi, S. A., Dubovoi, A. N. (1999). Plazmennoe napylenie zashitnyh pokrytij na detali gory achego trakta sudovyh turbin [Plasma spraying of protective coatings on parts of the hot tract of ship turbines]. *Zbirnik naukovih prac UDMTU – Collection of scientific works of UDMTU*, 6 (366), 105–109 [in Russian].

4. Loi, S. A., Dubovoi, A. N. (1999). Povyshenie effektivnosti plazmennogo napyleniia zashitnykh pokrytii [Improving the efficiency of plasma spraying of protective coatings]. *Zbirnik naukovih prats UDMTU – Collection of scientific works of UDMTU,* 2 (362), 68–75 [in Russian].

5. DSTU ISO 9000:2015. Sistem yupravleniia kachestvom. Osnovnye polozheniia i slovar terminov (ISO 9000:2015, IDT) [DSTU ISO 9000:2015. Quality Management Systems. Fundamentals and Glossary (ISO 9000:2015, IDT)].

6. Lebedev, V. A., Ermolaev, G. V., Loi, S. A. et al. (2014). Napryazhennoe sostoianie napylennogo pokrytiia pri ispytaniiakh na termostoikost [The stress state of the sprayed coating during heat resistance tests]. *Uprochniaiushie tehnologii i pokrytiia – Hardening technologies and coatings*, 11, 8-12 [in Russian].

7. Lebedev, V. A., Loi, S. A., Ermolaev, G. V., Matvienko M. V. (2014). Napriazhennoe sostoianie napylennogo pokrytiia pri ispytaniiakh na otryv [The stress state of the sprayed coating during separation tests]. *Uprochniaiushie tehnologii i pokrytiia – Hardening technologies and coatings*, 12, 8-12 [in Russian].

8. Nechaev, L. M. (2017). Izuchenie napryazhennogo sostoianiia v poverhnostnykh sloiah dlia otsenki kachestva zashitnogo pokrytiia [The study of the stress state in the surface layers to assess the quality of the protective coating]. *IzvestiyaTulGU. Tehnicheskie nauki – Izvestiia TulGU. Technical science*, 8 (1), 294-297 [in Russian].

9. Guessasma, S., Montavon, G., Coddet, C. (2004). Modeling of the APS Plasma Spray Process Using Artificial Neural Networks: Basis, Requirements and an Example. *Computational Materials Science*, 29 (3), 315-333.

10. Zelenina, E. A., Loskutov, S. V., Ershov, A. V. (2016). Metod rascheta fiziko-mehanicheskih harakteristik plazmennogo pokrytiya na podlozhke pri ispytaniyah obrazcov na izgib [Method for calculating the physicomechanical characteristics of a plasma coating on a substrate during bending tests of samples]. *Novi materiali i tehnolohii v metalurhii ta mashinobuduvanni – New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2, 107–110 [in Russian].

11. Kuzmin V. I. et al. (2007). Comparison of Thermophisical and Optical Methods of Temperature Distribution Measurements in Flow of Plasmatron with Interelectrode Inserts. *Izv. vuzov. Fizika – University News. Physics*, 50 (9), 85–88.

12. Lebedev, V. A., Loi, S. A. (2019). Modelirovanie stojkosti plazmennogo napyleniya lopatok gazo-turbinnyh dvigatelej i ustanovok [Modeling the resistance of plasma spraying of blades of gas turbine engines and plants]. *Modern question of production and repair in industry and in transport*: *materials of the 19th International Scientific f-nd Technical Seminar (February 18-23, Kosice, Slovak Republic* (pp. 97-99).

13. Grigorev, S. N., Kovalev, O. B., Kuzmin, V. I. et al. (2013). Novye vozmozhnosti tehnologii plazmennogo napyleniia iznosostoikikh pokrytii [New features of plasma spraying technology for wear-resistant coatings]. *Trenie i iznos – Friction and wear*, 34 (3), 221–226 [in Russian].

*UDC 621.793.72*

*Volodymyr Lebediev, Oleksandr Dubovyi, Serhii Loi*

## FORMATION (STRUCTURING) FEATURES AND PROPERTIES OF HEAT PROTECTIVE COATINGS FOR PLASMA SPRAYING

***Urgency of the research.*** *Plasma spraying to create a coating protector in various fields of engineering, repair and refurbishment is widespread, particularly in improving the performance of aircraft and marine engines, turbines due to its relative simplicity, low cost of components, and high results.*

***Target setting.*** *However, along with the obvious advantages of plasma coatings, they have significant disadvantages, in particular those that are sprayed as a protection against the effects of heat and have a tendency to peel off, in particular in case of ineffective constituent materials for their application to components and components and are not sufficiently studied for properties.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *It is noted that sputtering, which is carried out with the help of plasma flow is an effective technological means of obtaining reliable coatings, including thermal protection, and it is shown that, in addition to the already conducted studies, there are problems that need further exploration.*

***The research objective.*** *The purpose of this work is to determine a number of characteristics of plasma coatings, to develop a mathematical description of one of them to use the quality of one of the parameters, and to comparatively analyze the proposed and obtained results, including those that already exist at present.*

***The statement of basic materials.*** *Methods of physical experiments using existing methods, specially designed mathematical description, obtaining and detailed description and analysis of micro-grinding coatings in different ways of obtaining them set the advantages of coatings applied by the method of plasma spraying, while emphasizing that quality coatings can be obtained as in controlled, not in a controlled atmosphere.*

***Conclusions.*** *It has been established that the stability of the deposited layer with respect to thermal influences is mainly influenced by the composition of the sputtering material, while it is necessary to perform a three-layer spraying of different material composition for each layer at certain distances of the plasma torch nozzle from the surface. It is also necessary to consider the power of the plasmatron when performing the process.*

***Keywords:*** *plasma sputtering; material composition; stability; thermal conductivity; description; microhardness; parameters; analysis; micro-grinders.*

**Лебедєв Володимир Олександрович** – доктор технічних наук, професор кафедри зварювання, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсонська філія (просп. Ушакова, 44, м. Херсон, 73022, Україна).
**Lebediev Volodymyr** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Welding ,National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Kherson branch (44 Ushakova Av., 73022 Kherson, Ukraine).
**E-mail:** valpaton@ukr.net
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0391-6113

**Дубовий Олександр Миколайович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (просп. Героїв Сталінграду, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна).
**Dubovyi Oleksandr** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department Material science and technology of metals, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov (9 Heroes of Stalingrad, 54025 Mykolaiv, Ukraine).
**E-mail:** oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua.
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-2843-1879

**Лой Сергій Анатолійович** – доцент, старший викладач кафедри зварювання, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсонська філія (просп. Ушакова, 44, м. Херсон, 73022, Україна).
**Loi Serhii** – Associate Professor, senior lecturer of the department of welding, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Kherson branch (44 Ushakova Av., 73022 Kherson, Ukraine).
**E-mail:** welding.kherson@nuos.edu.ua
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1936-6390

Лебедєв В., Дубовий О., Лой С. Особливості формування (структуроутворення) та властивості теплозахисних покриттів при плазмовому напиленні. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 32-41.

*УДК 656.13*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-42-52*

*Віра Мурашковська, Аліна Подзолкіна, Василь Скляр, Олександр Сиводід*

# АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ МІСЬКОГО ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТНОГО СЕРЕДОВИЩА

***Актуальність теми дослідження.*** *Однією з базових галузей економіки є транспортна галузь. Вона має розвинену мережу автомобільних шляхів, розгалужену залізничну мережу, морські порти та річкові термінали, аеропорти та широку мережу авіаційних сполучень, вантажних митних терміналів. Це створює необхідні передумови для задоволення потреб користувачів транспорту в наданні транспортних послуг та розвитку бізнесу.*

***Постановка проблеми.*** *Транспортна галузь забезпечує задоволення основних потреб населення та економіки в перевезеннях за обсягом, але не за якістю.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Багато робіт провідних закордонних і вітчизняних учених присвячені теоретичним та практичним аспектам сфери транспортних послуг.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Мало уваги приділено формуванню міського транспортного середовища, визначенню системи показників якості послуг і розробці заходів стратегічного плану його підвищення.*

***Постановка завдання.*** *Розвиток концептуальних положень і розробка практичних рекомендацій щодо оцінки якості розвитку міського транспортного середовища та заходів щодо його підвищення.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Однією з найважливіших галузей функціонування та життєдіяльності міста є міський громадський транспорт, від зручності та комфорту якого залежить якість життя мешканців. Доступність і швидкість транспорту визначають зручність громадського транспорту.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Висновок полягає в обґрунтуванні функцій і розробці процесної моделі розвитку міського транспортного середовища, розробці системи цільових показників і методу визначення сталого розвитку громадського транспорту на основі розрахунку узагальнюючого індексу.*

***Ключові слова:*** *міський громадський транспорт; сталий розвиток; цільові показники; функції; узагальнюючий індекс; просторові структури.*

*Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 13.*

**Актуальність теми дослідження.** Однією з базових галузей економіки є транспортна галузь, вона має розвинену мережу автомобільних шляхів, розгалужену залізничну мережу, морські порти та річкові термінали, аеропорти та широку мережу авіаційних сполучень, вантажних митних терміналів. Це створює передумови для задоволення потреб у наданні транспортних послуг користувачів транспорту та розвитку бізнесу [1].

**Постановка проблеми.** Нині основні потреби населення та економіки в перевезеннях задовольняє транспортна галузь. Сучасний стан транспортної галузі не повною мірою відповідає вимогам ефективної реалізації євроінтеграційного курсу України та інтеграції національної транспортної мережі в Транс'європейську транспортну мережу [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичним та практичним аспектам дослідження сфери послуг, у тому числі в галузі транспорту, присвячені дослідження провідних закордонних і вітчизняних учених, серед яких: Д. Белл, Р. Блекуелл, О. Г. Білорус, В. М. Геєць, В. Л. Дикань, О. В. Дзяд, В. М. Загорулько, Ф. Кене, Ф. Котлер, В. Г. Коба, Н. О. Краснікова, А. І. Кредісов, В. В. Матвєєв, А. М. Новікова, В. Є. Новицький, Ю. М. Пахомов, А. М. Поручник, В. П. Семиноженко, Є. М. Сич, І. О. Стеблянко, Н. В. Стукало, В. В. Трюхан, К. Хаксевер, Н. Хілл, В. І. Чужиков, В. І. Щелкунов та ін. Питанням соціо-еколого-економічної оптимізації транспортних систем України було присвячено чимало праць О. Балацького, В. Благи, М. Бурмаки, В. Гіжевського, М. Говорущенка, Д. Горового, К. Горової, Ю. Гутаревича, В. Диканя, І. Дмитрієва, О. Криворучко, Є. Кузнецова, В. Рудзінського, Є. Сича, І. Шевченко, В. Шинкаренка та інших.

У роботі [1] наведено стратегію розвитку транспортної галузі України та основні напрями її реалізації. Стратегія забезпечує комплексне бачення глобальних пріоритетів трансмодальної політики й визначає напрями розвитку галузі на період до 2030 року. Передбачено здійснення моніторингу.

Тенденції розвитку громадського транспорту в найближчому майбутньому наведено в роботі [3]. У зв'язку зі зростанням кількості автомобілів пропонується перейти з особистого транспорту на громадський. У світі з'являється дедалі більше транспортних сервісів, що займають нішу між таксі та громадським транспортом. Смартфон дає змо-

© Мурашковська В. П., Подзолкіна А. П., Скляр В. М., Сиводід О. С., 2020

гу зв'язати людей та сервіси, що дозволить дізнатися про необхідність збільшення або зменшення кількості громадського транспорту, а також про зміну маршруту. Побудова оптимального маршруту дозволяє зекономити паливо та час.

Мобільність є важливою для туристів [4], що відвідують міста, оскільки це є фактором їх комфорту. З появою туристів зростає попит на міський громадський транспорт.

У статті [5] наведено аналіз закордонного досвіду розвитку міського пасажирського транспорту.

У монографії [6] викладені актуальні питання організації регулярних перевезень пасажирським автомобільним транспортом. Основна увага приділена питанням ефективності організації регулярних перевезень пасажирським автомобільним транспортом, питанням якості перевезень та питанням забезпечення безпеки дорожнього руху на транспорті загального користування.

У підручнику [7] наведені основи організації транспортних логістичних систем, основні матеріали з теорії, технології, організації та управління пасажирськими автомобільними перевезеннями.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** У працях вітчизняних і закордонних учених недостатньо повно досліджувалися такі важливі питання оцінки якості послуг міського громадського транспорту, як формування міського транспортного середовища, визначення системи показників якості послуг і розробка заходів стратегічного плану його підвищення.

**Мета статті.** Метою дослідження є розвиток концептуальних положень і розробка практичних рекомендацій щодо оцінки якості розвитку міського транспортного середовища та заходів щодо його підвищення.

**Виклад основного матеріалу.** Розвиток міського громадського транспорту в Україні характеризується наявністю численних проблем, які пов'язані з недостатньо високим рівнем обслуговування пасажирів, доступністю і мобільністю. Ці проблеми обслуговування населення на міських маршрутах руху громадського транспорту багато в чому визначаються станом дорожньо-транспортної інфраструктури, високим зносом транспортних засобів, відсутністю науково обґрунтованого транспортного планування в міських умовах, збитковістю муніципальних перевезень населення. У зв'язку з цим є актуальною розробка концептуальних положень щодо оцінки якості послуг міського громадського транспорту та практичних рекомендацій щодо підвищення рівня обслуговування пасажирів.

Наявні нині дрібні транспортні оператори перевозять пасажирів з низькою якістю, небезпечним водінням і високим зносом транспортних засобів, у той час як муніципальний громадський транспорт пропонує вищий рівень обслуговування. Наявність єдиної муніципальної організації, яка планує мережеві маршрути і визначає якість обслуговування, дозволяє здійснювати узгодження потреби в послугах громадського транспорту з їх пропозицією.

З погляду міської мобільності, громадський транспорт є більш ефективним, ніж особистий автомобіль щодо використання дорожнього простору і споживаної енергії. Наприклад, автобус, що перевозить 40 пасажирів, використовує лише в 2,5 рази більше простору, ніж особистий автомобіль, який перевозить зазвичай не більше чотирьох осіб. І той же самий автобус споживає тільки в 3 рази більше палива, ніж автомобіль.

Автомобільний транспорт відіграє важливу роль у соціально-економічному розвитку країни. На сьогодні більш як 100 тис. автомобільних перевізників надають послуги з перевезення 52 % пасажирів та 64 % вантажів.

Раціонально організована система громадського транспорту є легкою і зручною у використанні, безпечною та доступною. Ключовою особливістю громадського транспорту є те, що він може об'єднувати в собі кілька режимів переміщення пасажирів на трамваях,

автобусах, тролейбусах і метро. Сучасні інформаційно-комунікаційні системи дозволяють користувачам мати своєчасну й доступну інформацію про графіки руху громадського транспорту, правила проїзду, форми його оплати і транспортного оператора.

Громадський транспорт є однією з найважливіших галузей життєдіяльності та функціонування міста. Від його комфорту та зручності залежить якість життя мешканців. Міський транспорт має великий вплив на наше життя.

Від швидкості й доступності громадського транспорту залежить його зручність. Міський громадський транспорт повинен забезпечувати максимальну швидкість, щоб людина могла дістатися до потрібного місця з найменшою кількістю пересадок та мінімальним часом очікування. Активність населення міста буде більша, якщо забезпечити зменшення часу переміщення містом, також зросте і бізнес-активність містян.

Реалізація поставленої мети дослідження вимагає вирішення таких завдань:

- визначення тенденцій формування міського транспортного середовища;
- виявлення проблем та перспектив розвитку послуг міського громадського транспорту;
- аналіз стану й розвитку системи державного соціального транспорту;
- формування системи показників сталого розвитку громадського транспорту;
- розробка методичних підходів до визначення якості послуг міського громадського транспорту;
- оцінка якості послуг перевезення та сервісу на міському автобусному транспорті;
- розробка заходів стратегічного планування підвищення якості послуг громадського транспорту.

Одним із сучасних панівних процесів в умовах зростання частки міського населення є урбанізація. Для мобільності перевезень пасажирів і вантажів у великих міських агломераціях першорядне значення мають питання міського транспорту. Розвиток транспорту в міських районах визначається складними взаємозв'язками та факторами різноманіття видів транспорту, відмінності його походження і призначення, неоднаковими споживчими перевагами, а також обсягами і різноманітністю трафіку [8, 9].

Пасажири як учасники і споживачі послуги перевезення традиційно були в центрі уваги міського транспорту, а міста розглядалися як місця взаємодії людини з транспортною інфраструктурою, пов'язаного з поїздками на роботу, комерційними угодами, відпочинком і культурними заходами. Проте міста є також місцями виробництва, споживання та розподілу товарів і послуг, що включають транспортну діяльність. Концептуально міська транспортна система нерозривно пов'язана з міськими формами і їх просторовою структурою. Таким чином, можна виділити кілька домінуючих тенденцій, що впливають на розвиток міського транспорту [10]:

1. Глобальна урбанізація [8]. На тлі урбанізації відбувається розвиток сучасної міської просторової інфраструктури, вона є найважливішою домінуючою тенденцією економічних і соціальних змін XXI століття, особливо в країнах, що розвиваються. Урбанізація (з латини – «*міський*») – це процес зростання міст, збільшення кількості міського населення, підвищення ролі міст у житті суспільства й поширення міського способу життя. Урбанізація відображає збільшення частки громадян, які проживають у населених пунктах, передусім містах, і зниження частки громадян, які проживають у сільській місцевості, а темпи урбанізації визначаються швидкістю цього збільшення. Ця тенденція також виражається в зростанні розмірів міст і збільшенні чисельності їх населення. Міські проблеми мобільності населення збільшуються пропорційно, а в деяких випадках по експоненті. Нині приблизно 56 % світового населення живуть у містах. Майже весь приріст населення в майбутньому відбуватиметься за рахунок збільшення чисельності міських жителів, на яких, згідно з прогнозами, в 2030 році припадатиме 60 % населення країн світу, а до 2050 року – приблизно 68 % [11].

2. Потужність транспортної інфраструктури і потреби міських жителів у мобільності переміщення. Існує велика різноманітність міських форм, просторових структур і пов'язаних із ними систем міського транспорту. Поняття міських форм життєдіяльності відноситься і до просторових структур пов'язаних із міським транспортним середовищем, а також опосередковують й інші інфраструктури, які спільно визначають рівень просторового розташування міста. На відміну від попереднього поняття міські просторові структури належать до сукупності відносин, що випливають із міських форм і лежать в основі взаємодії людей та інформації. Це поняття дозволяє оцінити, якою мірою конкретні міські структури взаємодіють із міським транспортним середовищем, що включає міський (муніципальний) пасажирський транспорт. Процес глобалізації є основною тенденцією сучасної епохи, який підтримується розширенням транспортних і телекомунікаційних систем, а також формуванням середовища, сприятливого для міжнародних операцій на етапі лібералізації торгівлі. Масштаби, інтенсивність і мобільність капіталу, товарів і послуг, людей та інформації стали головними організаційними і конкурентоспроможними ознаками розвитку міської просторової структури і транснаціональних корпорацій, діяльність яких ґрунтується на порівняльних перевагах за витратами та інноваційно-інвестиційними можливостями [8].

За ступенем розвитку транспорту міські просторові структури можуть бути класифіковані за рівнем централізації і кластеризації [8]:

- за рівнем централізації міста поділяються на централізовані та децентралізовані. У централізованих містах основна частка життєдіяльності здійснюється в центрах, а в децентралізованих – ближче до околиць;

- за рівнем кластеризації міста поділяються за кількістю і потужністю таких окремих міських кластерів, як транспортно-логістичний кластер, кластери охорони здоров'я та освіти, промисловий кластер, науковий кластер тощо.

Географічне положення кожного міста значно варіюється за міськими формами і просторовими структурами, які мають такі елементи, як транспортно-термінальні вузли та взаємозв'язки. Формування транспортно-термінальних вузлів пов'язано з просторовим накопиченням економічної діяльності та доступом до транспортної системи. Термінали, такі як порти, залізничні вокзали, аеропорти, автовокзали є важливими вузлами, навколо яких формується діяльність агломерату на місцевому чи регіональному рівнях. Вузли мають ієрархії, пов'язані з їх важливістю і внеском в обсяг міських функцій. Найвищу ієрархію мають такі вузли, як управління, роздрібна торгівля, фінансові послуги, а найменш високу – виробництво, розподіл, побутове обслуговування, комунальне господарство [8].

Взаємозв'язки – це інфраструктури, що підтримують транспортні та товарно-матеріальні потоки між вузлами. Вулиці є нижчим рівнем зв'язків, вони є визначальними елементами міської просторової структури. Залежно від характеру взаємозв'язків міські вузли забезпечують функціональну зв'язність.

Нині багато міст розвивають свою просторову структуру [8]. Це збільшує залежність життєдіяльності населення і комерційних структур від моторизованого транспорту, зокрема, особистого автомобіля. Це спровокувало перехід від сітки вулиць до криволінійних і кластерних моделей, які зазвичай трапляються в приміських районах. Дисперсійна форма міської забудови і відповідне розташування вулиць міста є в багатьох різних типах міст. Види сучасних міських просторових форм показані на рис. 1.

Представлені на рис. 1 види сучасних міських просторових форм систематизуються таким чином: централізовані форми (рис. 1, *а, б*); децентралізовані форми (рис. 1, *в, г*); кластерні форми (рис. 1, *а, в*); дисперсійні форми (рис. 1, *б, г*).

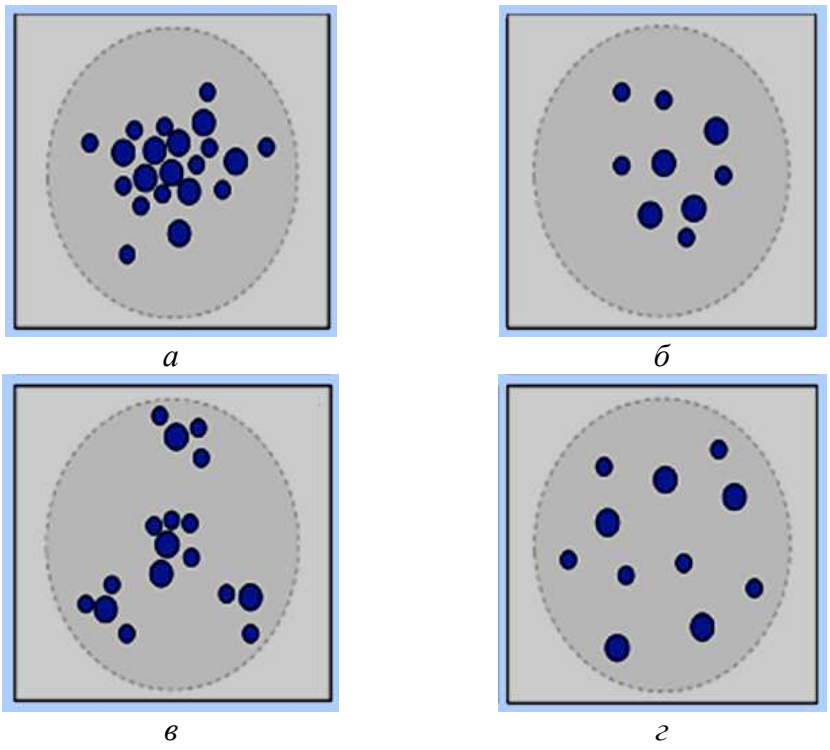



*Рис. 1. Види сучасних міських просторових форм:*
*а – централізована кластерна форма; б – централізована дисперсна форма;*
*в – децентралізована кластерна форма; г – децентралізована дисперсна форма*

Агломерація і компактна область центра міста сприяє вдосконаленню транспорту та міських просторових форм. Багато сучасних міст успадкували міську форму зі щільних міських ядер центра. Однак на іншому кінці спектра можна зустріти дисперсійні міські форми, які були створені недавно і пов'язані з високим рівнем автомобілізації. Важливу роль в економічній життєздатності населення, державних, муніципальних і комерційних організацій, а також у міських просторових структурах відіграють міські порти, аеропорти, залізничні та автовокзали як центри тяжіння і розподілу транспортних потоків [8; 9].

Еволюція транспорту і транспортних технологій загалом привели до змін у міських просторових формах. У минулому традиційні виробництва залежали від наявності централізованих робочих місць, транспортних і технологічних чинників, а сучасні виробництва, торгово-офісні центри, транспортно-логістичні центри розміщуються в приміських районах у зв'язку з більш низькою вартістю будівництва й оренди. Отже, міські просторові структури перейшли від вузлової до багатовузлової форми, що зумовило розвиток міста і формування нових зв'язків із регіональними та глобальними суб'єктами економічної діяльності [8; 11].

Залежно від просторової структури міста його різні частини мають різну динаміку розвитку. Історичні процеси та географічне розташування вплинули на формування міських просторових структур: децентралізація життєдіяльності та дисперсійна модель розвитку міст (рис. 1).

Тривалість часу поїздки майже не змінилась. Сполучення переважно здійснювалося на автомобільному, а не громадському транспорті. Для полегшення транспортного потоку між передмістям і містом були розроблені більшість транзитних доріг і інфраструктурних систем, у результаті чого міські магістралі виявилися більш навантаженими, ніж приміські автомагістралі. Транспортні системи й моделі значно змінилися. Нині більшість людей перебуває в дорозі 30-40 хвилин в одному напрямку. У всьому світі люди витрачають близько 1,2 години в день на поїздки на роботу при низькому або ви-

сокому значенні мобільності. Різні технології транспорту пов'язані з різною швидкістю переміщення. Транспортні технології відіграють важливу роль у міських просторових формах для різних видів діяльності, а їх еволюція тісно пов'язана з місцевими умовами життєдіяльності, розвитком інфраструктури та інвестиційною активністю [8; 10].

Площа міст, що виділяється на транспорт, часто корелює з рівнем мобільності. До автомобільної ери близько 10 % міської землі виділялося на транспорт, а дороги призначалися для пішоходів. Як тільки збільшилися мобільність людей і вантажів, зросла частка міських районів для транспорту та його інфраструктури. Великі зміни в просторових формах міського транспорту спостерігаються між різними містами, різними частинами міста, центральними і периферійними районами. Основними компонентами просторових форм міського транспорту є пішохідні зони, дороги й стоянки, велосипедні доріжки, транзитні системи громадського транспорту, транспортні термінали (порти, аеропорти, метро, автомобільні та залізничні станції і т. ін.). Наприклад, багатотранзитні системи, такі як автобуси і трамваї, істотно скоротили частку дорожнього простору, що припадає на інші види транспорту. Це призвело до створення дорожніх смуг руху, призначених для автобусів, або на постійній чи тимчасовій (в годину пік) основі [8].

Просторове значення кожного виду транспорту змінюється залежно від багатьох факторів, у тому числі найбільш важливим є щільність. Якщо щільність розглядається як градієнт, то кільця рухливості є змінами просторових значень для кожного транспортного режиму в забезпеченні міської мобільності. Крім того, кожен вид транспорту має унікальні продуктивність і характеристики простору, який використовується. Найбільш наочним прикладом є автомобіль, який вимагає простору для переміщення (частини дорожньої інфраструктури), але також використовує значну частину міського простору для стаціонарного розміщення. Таким чином, велика площа міського простору повинна бути виділена для розміщення автомобіля, коли він є економічно та соціально марним. У великих міських агломераціях майже всі вільні місця для паркування на вулиці й районах середньої та вищої щільності зайняті протягом дня. У містах Західної Європи дороги становлять від 10 до 20 % міського простору, тоді як в інших країнах цей показник становить близько 6 %, але швидко збільшується за рахунок автомобілізації [8; 9].

Міський транспорт включає три широкі категорії перевезень: громадські, індивідуальні та вантажні перевезення. У той час як пасажирські перевезення є результатом численних індивідуальних рішень, заснованих на різних обґрунтуваннях, вантажні перевезення є результатом спільних рішень вантажовласників і постачальників транспортних послуг. У багатьох випадках пасажирські й вантажні перевезення доповнюють один одного, але іноді можуть конкурувати між собою. Метою громадського транспорту є надання загальнодоступних послуг населенню в мобільності в певній частині міста. Його ефективність заснована на перевезеннях великої кількості пасажирів та досягненні економії на масштабі діяльності. Громадські перевезення здійснюються з використанням трамваїв, автобусів, тролейбусів, метро, електропоїздів і паромів [8; 11].

Більшість виробництва і споживання товарів знаходяться в місті, тому вони потребують великого обсягу вантажних перевезень.

Збільшенню кількості пасажирів і вантажів, які переміщуються в міських районах, сприяє швидкий розвиток міст. Це відбувається в багатьох країнах світу. Перевезення вантажів частіше здійснюються на великі відстані. За останні сто років середній час у дорозі зменшився незначно. Це означає, що для перевезень стали використовувати більш швидкий транспорт. Формуванню великої різноманітності систем міського транспорту сприяла реалізація більш ефективних технології транспортних засобів та інфраструктури. Розвинені країни пройшли три основні періоди розвитку міст. Кожен із цих етапів був пов'язаний з особливою формою міської мобільності (ходьбою, гужовим транспортом, електротранспортом, автотранспортом) [8].

Громадський транспорт (автобуси, тролейбуси, метро, трамваї і ін.) відіграє важливу роль у розвитку сучасних міст. Він покращує якість життя в містах, що забезпечує безпечне, ефективне й економічне обслуговування пасажирів. Громадський транспорт забезпечує особисту мобільність, служить колективним інтересам усього населення міста.

Громадський транспорт та міські транспортні коридори є природними координаційними центрами для населення міста, забезпечують економічну й соціальну ефективність життєдіяльності, сприяють створенню сильних районних центрів, які є економічно стабільними, безпечними і продуктивними [10].

Міський пасажирський транспорт сприяє державному і муніципальному економічному зростанню, збільшує місцеву базу для багатьох видів послуг (підприємств громадського харчування, побутових послуг, роздрібної торгівлі, медичних установ, закладів освіти тощо). Цей вид транспорту оживляє райони, де проживають люди, підвищує безпеку, збільшує соціальну взаємодію, створює комфортні умови проживання. Вважається, що до 2025 року 20 % населення розвинених міст буде старше за 65 років, і багато хто з них будуть не в змозі управляти особистими автомобілями, що є додатковим рушієм зростання послуг громадського транспорту [13; 8].

Аналіз стану й розвитку послуг міського транспортного середовища може бути проведено за такими підсистемами, як міська просторова інфраструктура, дорожньо-транспортна інфраструктура, транспортна інфраструктура і рухомий склад, пасажиропотоки і рівень сервісу.

Основні показники, що характеризують економічну стійкість міського транспортного середовища, включають: інвестиції в транспортну інфраструктуру для підвищення якості транспортного обслуговування, податкове навантаження транспортних операторів за видами громадського транспорту, ціни на транспортні засоби та паливо, вартість стоянок і платних автостоянок, ціни на квитки і пільги певним соціальним групам населення і т. ін.

Система цільових показників зниження негативного впливу на навколишнє середовище і здоров'я населення, оптимізації вартості перевезень і підвищення економічної стійкості громадського транспорту представлені в таблиці.

Таблиця

*Система цільових показників розвитку міського транспортного середовища*

| **Мета розвитку** | **Показник** |
|---|---|
| Зниження негативного впливу на навколишнє середовище і здоров'я | Викиди $CO_2$ на душу населення за видами громадського транспорту; викиди $CO_2$ на душу населення за складовими циклу поїздки, площа території, пов'язана з транспортною діяльністю, яка припадає на душу населення; розмір і щільність транспортної інфраструктури на душу населення, витрата палива на душу населення, диференційований за видами паливно-енергетичних ресурсів, видів громадського транспорту, типам транспортних засобів і маршрутів перевезень |
| Оптимізація вартості перевезень | Доступність плати за проїзд для різних за доходами соціальних груп населення; фактичні витрати, понесені домогосподарствами різних соціальних груп населення, за окремими видами громадського транспорту |
| Підвищення економічної стійкості | Інвестиції в транспортну інфраструктуру для підвищення якості обслуговування, податкове навантаження транспортних операторів за видами громадського транспорту, ціни на транспортні засоби та паливо, вартість стоянок і платних автостоянок, ціни на квитки і пільги певним соціальним групам населення і т. ін. |
| Підвищення якості сервісу | Частка домогосподарств, комерційних підприємств, громадських організацій, органів влади та управління, що перебувають у безпосередній близькості від зупинок; ступінь обмеження швидкості руху, якість інфраструктури для пішоходів, темпи зростання перевезень пасажирів з обмеженими фізичними можливостями, темпи зростання кількості пішохідних доріжок |
| Підвищення мобільності | Число поїздок, швидкість руху, середній час, який витрачає пасажир у дорозі від посадки до висадки, середній час поїздки на кожному виді транспорту за соціальними групами, цілями поїздки, маршрутами і напрямками, середня відстань поїздок |

Запропонована система цільових показників сталого розвитку послуг міського транспортного середовища дозволяє дати оцінку мобільності населення, доступності послуг перевезення та пунктів призначення, якості перевезення пасажирів і сервісу, впливу громадського транспорту і дорожньо-транспортної інфраструктури на навколишнє середовище і здоров'я населення, оптимальності вартості перевезень і економічної стійкості громадського транспорту.

Однак практичне використання всіх без винятку розглянутих показників розвитку міського транспортного середовища викликає певні труднощі, які пов'язані з неповним статистичним забезпеченням обліку даних показників і наявною інформацією в пресі.

Узагальнена оцінка динаміки розвитку міського транспортного середовища може бути дана, по-перше, на основі застосування такого методу, як розрахунок інтегрального показника розвитку з урахуванням вагових коефіцієнтів, які характеризують внесок зміни окремого (приватного) показника в зміну інтегрального. У цьому випадку формула визначення інтегрального показника (Y) являє собою суму добутків нормованих значень окремих показників розвитку громадського транспорту ($X_i$) і їх коефіцієнтів вагомості ($\alpha_i$):

$$Y = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot X_i, \ \sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1. \quad (1)$$

Своєю чергою, розрахунок коефіцієнтів вагомості окремих показників розвитку міського транспортного середовища в інтегральному може проводитися, наприклад, такими методами, як їх бальна оцінка фахівцями (експертами), визначення коефіцієнтів кореляції між змінами окремих показників за наявності їх лінійного взаємозв'язку або розрахунок β-коефіцієнтів, що характеризують ступінь впливу кожного з окремих показників на інтегральний.

Іншим методом узагальненої оцінки розвитку міського транспортного середовища є визначення рангової кореляції між рядом окремих показників розвитку громадського транспорту, які побудовані на вимогу певного порядку зниження індексів змін окремих показників, та тих же окремих показників, які побудовані за фактичними значеннями зниження їх індексів зростання. Так, визначення коефіцієнта рангової кореляції Кендалла (τ) може бути проведено за формулою:

$$\tau = 1 - \frac{4 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} m_i}{n \cdot (n-1)}, \quad (2)$$

де $m_i$ – число інверсій у фактичному динамічному ряді окремих показників розвитку міського транспортного середовища (фактичних індексів зростання);

$n$ – число окремих показників розвитку міського транспортного середовища в динамічному ряді.

Коефіцієнт рангової кореляції Спірмена (ρ) визначається за такою формулою:

$$\rho = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i^2}{\sum_{i=1}^{m} n^2}, \quad (3)$$

де ($Y_i^2$) – квадрат відхилень місць, які посідають окремі показники розвитку міського транспортного середовища, в динамічному нормативі і їх фактичному ряді;

$n$ – число окремих показників розвитку громадського транспорту в динамічному ряді.

Найбільш доступним з практичного погляду методом визначення узагальнюючого показника розвитку міського транспортного середовища ($I_0$) є статистичний метод його розрахунків як добуток індексів зростання окремих показників ($I_i$):

$$I_0 = \prod_{i=1}^{n} I_i^{1/n}, \quad (4)$$

де $n$ – число окремих показників розвитку міського транспортного середовища.

При розрахунку узагальнюючого індексу розвитку міського транспортного середовища треба враховувати відповідність напряму зміни окремих індексів (позитивний чи негативний). Так, наприклад, збільшення індексу викидів забруднюючих атмосферу речовин або чисельності дорожньо-транспортних пригод є негативним. У цьому випадку ці індекси застосовуються у формулі розрахунку узагальнюючого індексу у вигляді оберненого до даної величини множника ($I_i^{-1}$).

**Висновки відповідно до статті.** Висновок полягає в обґрунтуванні функцій і розробці процесної моделі розвитку міського транспортного середовища, розробці системи цільових показників і методу визначення сталого розвитку громадського транспорту на основі розрахунку узагальнюючого індексу.

## Список використаних джерел

1. Проект Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. URL: https://mtu.gov.ua/projects/133.

2. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України № 430-р від 30 травня 2018 р.

3. 9 тенденций развития городского транспорта в ближайшем будущем. URL: https://daily.afisha.ru/brain/5340-9-trendov-gorodskogo-transporta-blizhayshego-buduschego.

4. Albalate D., Bel G. Tourism and urban public transport: Holding demand pressure under supply constraints. *Tourism Management*. 2010. № 3 (31). P. 425–433.

5. Гукетлев Ю. Х., Ткачева Я. С., Гукетлев Э. Ю. Зарубежный опыт развития городского пассажирского транспорта. *Новые технологии*. 2016. № 4. С. 27–32.

6. Загорский И. О., Володькин П. П. Эффективность организации регулярных перевозок пассажирским автомобильным транспортом: монография. Хабаровск: Тихоокеанский национальный университет, 2012. 154 с.

7. Організація та управління пасажирськими перевезеннями: підручник / за ред. В. С. Марунича, Л. Г. Шморгуна. Київ: Міленіум, 2017. 528 с.

8. Борозенець М. І. Тенденції формування міського транспортного середовища в Україні. *Інвестиції: практика та досвід*. 2019. № 17. С. 63–68.

9. Трубина Е. Г. Город в теории: опыты осмысления пространства. Москва: Новое литературное обозрение, 2011. 520 с.

10. Герами В. Д. Концепции формирования системы городского пассажирского общественного транспорта. *Автотранспортное предприятие*. 2002. № 5. С. 8–11.

11. Борозенець М. І. Міське транспортне середовище: аспекти інституціоналізації. *Інституціоналізація публічного управління в Україні в умовах євроінтеграційних та глобалізаційних викликів*: матеріали щоріч. Всеукр. наук.-практ. конф. за міжнар. участю, 24 трав. 2019 р. Київ: НАДУ, 2019. С. 37–38.

12. Амбарцумян В. В., Носов В. Б., Тагасов В. И., Сарбаев В. И. Экологическая безопасность автомобильного транспорта: учебное пособие. Москва: Научтехлитиздат, 1999. 208 с.

13. Рассел Дж. Список стран по ВВП (ППС) на душу населения. Москва: Книга по Требованию, 2012. 136 с.

## References

1. *Proekt Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku [Draft National Transport Strategy of Ukraine for the Period up to 2030]*. Retrieved from https://mtu.gov.ua/projects/133.

2. Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku [On approval of the National Transport Strategy of Ukraine until 2030]. № 430-r (May 30, 2018) [in Ukrainian].

3. *9 tendentsii razvitiia gorodskogo transporta v blizhaishem budushchem [9 trends in urban transport in the near future]*. Retrieved from https://daily.afisha.ru/brain/5340-9-trendov-gorodskogo-transporta-blizhayshego-buduschego.

4. Albalate, D., Bel, G. (2010). Tourism and urban public transport: Holding demand pressure under supply constraints. *Tourism Management*, 3 (31), 425–433 [in English].

5. Guketlev, Yu. Kh., Tkacheva, Ya. S., Guketlev, E. Yu. (2016). Zarubezhnyi opyt razvitiia gorodskogo passazhirskogo transporta [Foreign experience in the development of urban passenger transport]. *Novye tekhnologii – New technologies,* 4, 27–32 [in Russian].

6. Zagorsky, I. O. Volodkin, P. P. (2012). *Effektivnost organizatcii reguliarnykh perevozok passazhirskim avtomobilnym transportom [The effectiveness of the organization of regular transportations by passenger motor transport]*. Khabarovsk: Tikhookeanskii natcionalnyi universitet [in Russian].

7. Marunich, V. S., Shmorgun, L. G. (Eds.) (2017). *Orhanizatsiia ta upravlinnia pasazhyrskymy perevezenniamy [Organization and management of passenger transportation]*. Kyiv: Milenium [in Ukrainian].

8. Borozenets, M. I. (2019). Tendentsii formuvannia miskoho transportnoho seredovyshcha v Ukraini [Trends of urban transport environment formation in Ukraine]. *Investytsii: praktyka ta dosvid – Investment: practice and experience,* 17, 63–68 [in Ukrainian].

9. Trubina, E. G. (2011) *Gorod v teorii: opyty osmysleniia prostranstva [The city in theory: space comprehension experiments]*. Moscow: Novoe literaturnoe obozrenie [in Russian].

10. Gerami, V. D. (2002). Kontceptsii formirovaniia sistemy gorodskogo passazhirskogo obshchestvennogo transporta [Concepts of forming a system of urban passenger public transport]. *Avtotransportnoe predpriiatie – Motor transport company*, 5, 8–11 [in Russian].

11. Borozenets, M. I. (2019). Miske transportne seredovyshche: aspekty instytutsionalizatsii [Urban transport environment: aspects of institutionalization]. Proceeding from *Instytutsionalizatsiia publichnoho upravlinnia v Ukraini v umovakh yevrointehratsiinykh ta hlobalizatsiinykh vyklykiv: materialy shchorich. Vseukr. nauk.-prakt. konf. za mizhnar. uchastiu – Institutionalization of public administration in Ukraine in the context of European integration and globalization challenges: materials annually. All-Ukrainian. Research Practice Conf. for the international. participation]* (Kyiv, May 24, 2019) (pp. 37–38). Kyiv : NADU [in Ukrainian].

12. Hambartsumian, V. V., Nosov, V. B., Tagasov, V. I. & Sarbaev, V. I. (1999). *Ekologicheskaia bezopasnost avtomobilnogo transporta [Environmental safety of automobile transport]*. Moscow: Nauchtekhlitizdat [in Russian].

13. Rassel, Dzh. (2012). *Spisok stran po VVP (PPS) na dushu naselenija [List of countries per capita GDP (PPP)]*. Moscow: Kniga po Trebovaniju, [in Russian].

*UDC 656.13*

*Vira Murashkovska, Alina Podzolkina, Vasyl Sklyar, Oleksandr Syvodid*

## ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT TRENDS OF CITY PUBLIC TRANSPORT ENVIRONMENT

***Urgency of the research.*** *Transport is one of the basic sectors of the economy. It has a developed network of highways, an extensive rail network, seaports and river terminals, airports and a wide network of aviation connections, freight customs terminals. It creates the necessary prerequisites to meet the needs of transport users in the provision of transport services and business development.*

***Target setting.*** *The transportation industry provides basic, but not quality, transportation to meet basic needs of the population and economy.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Many works of leading foreign and domestic scientists are devoted to theoretical and practical aspects of the sphere of transport services.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *Little attention was paid to shaping the urban transport environment, defining a system of quality of service indicators and developing measures for a strategic plan for improving it.*

***The research objective.*** *Development of conceptual provisions and development of practical recommendations for assessment of the quality of urban transport environment development and measures for its improvement.*

***The statement of basic materials.*** *One of the most important areas of functioning and livelihood of the city is urban public transport. The quality of life of the residents depends on the convenience and comfort. Accessibility and speed of transportation determines how convenient public transport is.*

***Conclusions.*** *The conclusion is to justify the functions and to develop a process model of urban transport environment development, to develop a system of targets and a method for determining sustainable development of public transport based on the calculation of a generalized index.*

***Keywords:*** *urban public transport; sustainable development; targets; functions; generalization index.*
*Fig.: 1. Table: 1. References: 13.*

**Мурашковська Віра Петрівна –** старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Murashkovska Vira** – senior teacher of Department of Road Transport Industry and Mechanical Engineering, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** vmurashkovska@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0556-8709
**ResearcherID:** G-9757-2016

**Подзолкіна Аліна Петрівна** – асистент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Podzolkina Alina** – assistant of Department of Road Transport Industry and Mechanical Engineering, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** kyianets.alina@gmail.com
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0908-0401
**ResearcherID:** J-1272-2016

**Скляр Василь Михайлович** – аспірант, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Sklyar Vasyl** – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035, Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** uslhj@meta.ua
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0563-6887
**ResearcherID:** J-1138-2016

**Сиводід Олександр Сергійович** – магістр, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Syvodid Oleksandr** – master, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** a.suvodid74@gmail.com

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 631.431*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-53-64*

*Костянтин Борак*

# ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ АБРАЗИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

***Актуальність теми дослідження.*** *Дослідження зміни абразивних властивостей ґрунтів та врахування їх при виборі матеріалів та режимів експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин, що дозволить зменшити інтенсивність зношування, є, безперечно, актуальним завданням.*

***Постановка проблеми.*** *Інтенсифікація аграрного виробництва висуває більш жорсткі вимоги до зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Наявні моделі ґрунтового середовища розглядають ґрунт як ідеальне середовище, яке не змінює свої властивості в часі та не розглядають його абразивних властивостей.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Відсутні теоретичні й експериментальні дослідження зміни абразивних властивостей ґрунту в процесі самоорганізації.*

***Постановка завдання.*** *Метою роботи є розробка математичної моделі зміни абразивних властивостей ґрунту в процесі самоорганізації.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Закономірності зміни абразивних властивостей ґрунту в процесі самоорганізації можливо описати поліноміальною функцією другого порядку. Коефіцієнти даної функції визначенні експериментальним шляхом, з урахуванням найбільш значущих факторів.*

***Висновки відповідно до статті.*** *У процесі самоорганізації підвищується абразивна здатність ґрунту. Зовнішні чинники (опади та питомий тиск від дії рушіїв) пришвидшують процес самоорганізації ґрунту, що призводить до зростання абразивних властивостей ґрунту. Зовнішні чинники не впливають на загальну закономірність більш інтенсивного процесу самоорганізації ґрунтового середовища на початку її функціонування. Розроблені математичні моделі, з урахуванням зовнішніх чинників, дозволяють прогнозувати зміну абразивних властивостей ґрунту.*

*Зменшення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин можна досягти за рахунок більш раннього повторного обробітку (після механічного руйнування структури ґрунту), поки не відбулися процеси зростання абразивних властивостей у результаті самоорганізації ґрунту.*

***Ключові слова:*** *самоорганізація; ґрунт; система; питоме зчеплення; ступінь закріплення; питомий тиск; опади.*
*Рис.: 12. Табл.: 5. Бібл.: 6.*

**Актуальність теми дослідження.** Втрати зумовлені абразивним зношуванням у розвинутих країнах досягають 1…4 % ВВП. У сільському господарстві найбільше абразивному зношуванню піддаються робочі органи машин, які взаємодіють зі складним гетерогенним середовищем – ґрунтом. Зменшити інтенсивність абразивного зношування деталей машин можна трьома методами: конструктивними, технологічними та експлуатаційними. Вибір методів підвищення зносостійкості деталей машин при абразивному зношуванні повинні ґрунтуватися на врахуванні властивостей абразивної маси, тому для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин необхідно дослідити зміну абразивних властивостей ґрунту в процесії його самоорганізації.

**Постановка проблеми.** Для проєктування, вибору матеріалу, режимів термообробки та виготовлення деталей машин, що працюють в абразивному середовищі, необхідно повною мірою знати трибологічні характеристики середовища та процеси, що відбуваються в цьому середовищі.

Нині для теоретичного вивчення властивостей ґрунтів дослідники [1; 2; 3] використовують феномологічний підхід. Феномологічний підхід досить поширений у теоретичній механіці, гідравліці, теорії пружності та в інших науках, де прийнято нехтувати другорядними для даного кола проблем властивостями тіл і зберігати за ними лише основні властивості, вирішальні для розглядуваних процесів [4]. У процесі вивчення абразивних властивостей ґрунтів ідеалізація цього середовища неприпустима, оскільки кожний зі складових цього середовища може призвести до зміни не тільки інтенсивності зношування, але й до зміни механізму зношування.

Для вивчення абразивних властивостей ґрунту необхідно застосовувати структурно-динамічний аналіз, який дозволить врахувати реальну структуру ґрунту та процеси, що відбуваються в ґрунті та на поверхні робочого органу під час їх взаємодії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як уже зазначалося вище, для модельного уявлення ґрунту використовується феномологічний підхід з ідеалізацією його елементів. Так, у роботі [3] зазначено, що механіка ґрунтів здебільшого обмежується лише

© Борак К. В., 2020

механічними явищами й не приділяється належної уваги фізико-хімічним та іншим процесам, що відбуваються в ґрунтах. Це свідчить про те, що в механіці ґрунтів мають справу з не зовсім реальними ґрунтами, а з деякими їхніми механічними моделями, тобто з тілами, які мають спрощені властивості [4].

Першою механічною моделлю ґрунтів, що відображає їх дисперсність, є ідеальне сипуче тіло (рис. 1) – скупчення кульок, що не зв'язані між собою [4].

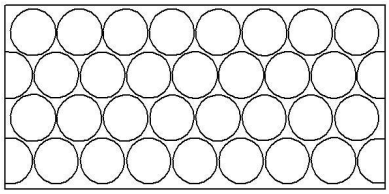
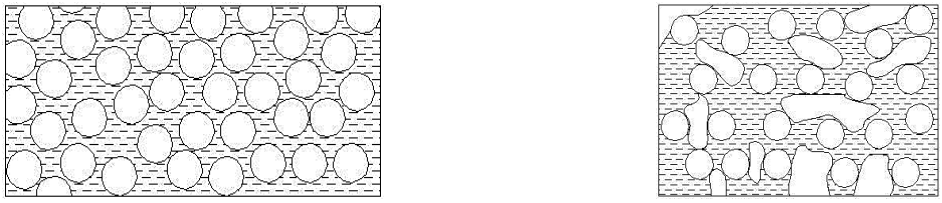


*Рис. 1. Механічна модель ідеального сипучого тіла*

Спочатку цю модель використовували для всіх пухких ґрунтів, але пізніше встановлено та обґрунтовано, що її можна використовувати тільки для піщаних ґрунтів [3].

Для зв'язаних глиняних ґрунтів запропоновано 2 моделі (рис. 2).

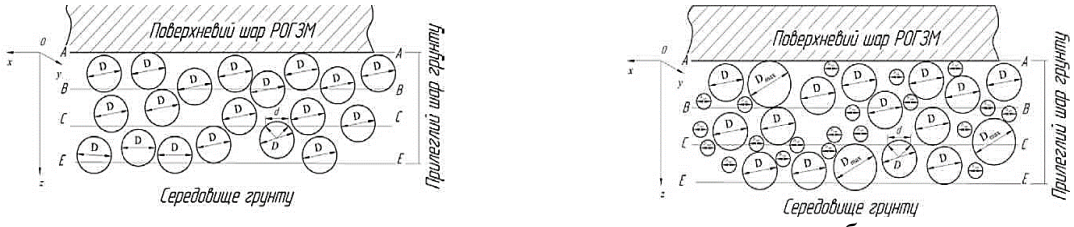


*а* *б*

*Рис. 2. Механічні моделі зв'язаних ґрунтів:*
*а – двофазна система; б – трьохфазна система*

Перша з них (рис. 2, *а*) моделює слабо зв'язані насичені водою ґрунти, друга (рис. 2, *б*) – зв'язані маловологі ґрунти [3].

У роботі [1] ґрунт розглядається як пружно-в'язке середовище за допомогою моделі Кельвіна–Фойгта. Абразивна частинка при моделюванні моно- та полідисперсного середовища ґрунту розглядалася як така, що має ідеально сферичну форму (рис. 3).




*а* *б*

*Рис. 3. Схема взаємодії поверхневого шару робочого органу із шаром ґрунту:*
*а – монодисперсний шар ґрунту; б – полідисперсний шар ґрунту*

В. П. Дьяков [5] для моделювання шару ґрунту, який піддається обробці сільськогосподарськими машинами, запропонував використовувати реологічну пружно-в'язку модель (рис. 4).

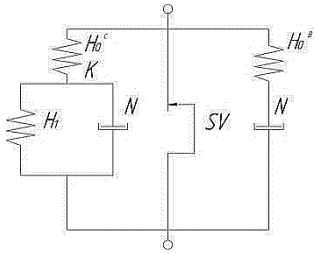



*Рис. 4. Реологічна пружно-в'язка модель ґрунту*

Модель ґрунту, як реологічне тіло, являє собою систему із паралельно з'єднаних тіл Кельвіна, Максвела і елемента Сен-Венана. Модель тіла Кельвіна відображає пружну післядію деформації при постійному напруженні, модель Максвела – релаксацію пружних напружень при постійній деформації, а елемент Сен-Венана – кардинальну властивість дискретних тіл – опір тертю, що діє як у початковій стадії деформації, так і у граничному стані деформації. Останнє є обов'язковою вимогою до змісту моделі [5].

Наведені моделі ґрунтів доволі різноманітні, це зумовлено тим, що моделі ґрунту будувались при вирішенні певних локальних задач. Зокрема, у роботі [1] – для визначення площі контакту абразивних частинок із матеріалом робочого органу, в роботі [3] – для визначення несучої здатності ґрунтів, у роботі [5] – для визначення зусиль втрати міцності ґрунту у вигляді відокремлення пласта від масиву.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** На сьогодні відсутня математична або фізична модель, яка достовірно описує абразивні властивості ґрунту й дозволяє прогнозувати його зношувальну здатність.

**Мета досліджень** – розробити математичну модель зміни абразивних властивостей ґрунту в процесі самоорганізації.

**Виклад основного матеріалу.** За класифікацією дисперсних систем по агрегатному стану ґрунт відноситься до капілярних систем.

Для об'єктивної оцінки абразивних властивостей ґрунту необхідно розглянути його фазовий склад рис. 5.

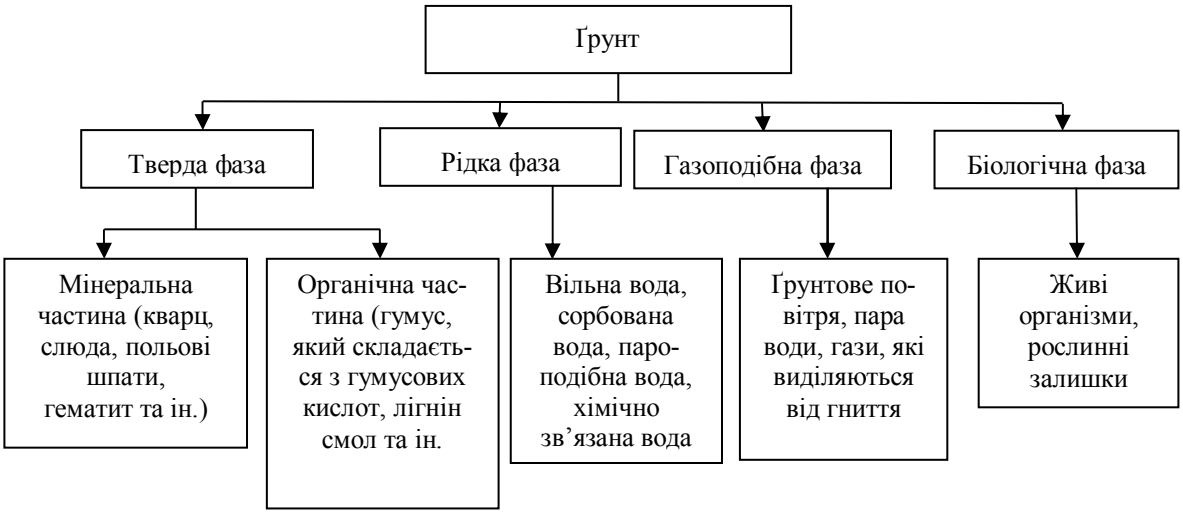



*Рис. 5. Фазовий склад ґрунту*

Зношувальна здатність ґрунту залежить від його фазового складу. У загальному вигляді її можна описати рівнянням:

$$Z_{\text{грунт}} = \omega_1 Z_1 + \omega_2 Z_2 \ldots + \ldots \omega_n Z_n, \quad (1)$$

де $\omega_1$, $\omega_2 \ldots$ $\omega_n$ – об'ємна частка 1, 2 … n-го елемента системи ($\omega_1$,+$\omega_2$+…+$\omega_n$=1); $Z_1$, $Z_2 \ldots Z_n$ – зношувальна здатність фаз ґрунту.

Як видно з рис. 5, ґрунт складається з чотирьох фаз: тверда ($Z_1$), рідка ($Z_2$), газоподібна ($Z_3$), біологічна фаза ($Z_4$).

Зношувальна здатність твердої фази ґрунту залежить від вмісту твердих мінеральних частинок, твердість яких рівна або більша за твердість матеріалу робочого органу, їхнього розміру, форми та ступеня закріплення абразивних частинок:

$$f(Z_1) = (\text{К}_\phi,\ \text{Т}_\text{а},\ \text{Р}_\text{а},\ \text{С}_\text{з}, \text{В}_\text{а}), \quad (2)$$

де $\text{К}_\phi$ – коефіцієнт форми абразивних частинок; $\text{Т}_\text{а}$ – твердість абразивних частинок; $\text{Р}_\text{а}$ – розмір абразивних частинок; , $\text{С}_\text{з}$ – ступінь закріплення абразивної частинки в ґрунті; $\text{В}_\text{а}$ – вміст твердих мінеральних частинок, твердість яких рівна або більша за твердість матеріалу робочого органу.

Тверда фаза визначає переважно абразивні властивості ґрунту, але інші фази ґрунту також можуть суттєво впливати на механізм та інтенсивність абразивного зношування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин.

Розглянемо ґрунт як неоднорідне сипуче тіло зі здатністю до утворення монолітних складових. Висунемо такі припущення:

1. Це «тіло» здатне до самоорганізації (переходити з одного стану в інший протягом часу).

2. Перехід при самоорганізації з одного стану в інший відбувається поступово.

3. Ґрунт є відкритою системою.

4. Ґрунт складається з чотирьох підсистем (фаз) (рис. 5).

Грунт – складна нелінійна нерівноважна дисипативна відкрита система, яка здатна до самоорганізації: процес спонтанного росту порядку і організованості в системі. Тому таку систему слід розглядати за допомогою синергетичного підходу.

Абразивні властивості ґрунту змінюються в часі, тому необхідно провести дослідження ймовірнісного стану цього об’єкта на фіксованому інтервалі часу. Загалом зміну абразивних властивостей ґрунту можна представити схемою (рис. 6).

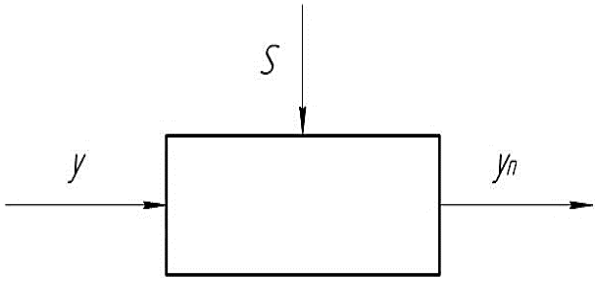



*Рис. 6. Схема зміни абразивних властивостей середовища ґрунту:*
*y – початкова величина абразивних властивостей ґрунту; $y_n$ – прогнозована величина абразивних властивостей ґрунту; S – перешкоди (погодні умови, механічний вплив на систему)*

Прогнозована величина $y_n$ в загальному випадку представлена як змінна стану системи (ґрунту), на вхід якої подаються величина $y$ і яка перебуває під дією відповідних перешкод $S$. У результаті спостереження отримуємо вибірку реалізацій $y_{n\,t}, t \in N$ і$\underline{yt \in N}$.

Для побудови математичної моделі, яка б дозволила прогнозувати зміну абразивних властивостей ґрунту, необхідна апріорна інформація. Оскільки при прогнозуванні будемо використовувати синергетичний підхід, то обсяг інформації буде мінімальний, і будувати моделі будемо без врахування деяких факторів.

Один з основних факторів, який впливає на абразивність ґрунту, – це ступінь закріплення абразивної частинки. Для оцінки ступеня закріплення абразивної частинки в ґрунті використовували показник $c$ – питоме зчеплення, кПа.

Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів проводилися на основі експериментального методу [6]. Лабораторні дослідження проводили в закритому приміщенні з постійною температурою. Імітацію опадів та дії рушіїв сільськогосподарських машин проводили через 24 години від початку дослідження.

Перед проведенням лабораторних досліджень із вивчення зміни абразивних властивостей ґрунту протягом певного часу, були проведені дослідження в експлуатаційних умовах. У результаті чого отриманні данні по величині питомого зчеплення для різних типів ґрунтів (табл. 1.) [6].

У результаті досліджень встановлено, що збільшення вологи призводить до зростання ступеня закріплення абразивних частинок. Виявлено, що закономірність притаманна всім типам ґрунтів і зберігається до насичення ґрунту вологою.

Таблиця 1

*Результати експлуатаційних досліджень*

| № | Місце проведення | Тип ґрунту (за механічним складом) | Вологість, % | Наявність кореневої системи | Глибина від поверхні, мм | Питоме зчеплення *c*, Па |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Овруцький район | Піщаний | 10,06 | Без кореневої системи | 100 | 6784,5 |
| 2 | Коростенський район | Супіщаний | 7,3 | Коренева система багаторічна трава | 100 | 5134,68 |
| 3 | Житомирський район | Глинистий | 16,8 | Коренева система озимої пшениці | 100 | 6407,1 |

Джерело: [6].

Ґрунт є складною системою, яка здатною до самоорганізації, що, у свою чергу, призводить до зміни абразивних властивостей у процесі функціонування. Для визначення впливу тривалості самоорганізації та наявності перешкод були проведенні дослідження, результати яких представлено в табл. 2.

Таблиця 2

*Результати лабораторних досліджень впливу перешкод (опади та дія рушіїв сільськогосподарських машин) та тривалості самоорганізації ґрунтового середовища на зміну величини питомого зчеплення*

| Тип ґрунту | Фактори, які впливають на процес самоорганізації (перешкоди *S*) | Питоме зчеплення *c* у різні періоди проведення досліджень, після механічного руйнування структури ґрунту, Па | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $t_1$=0 год | $t_2$=168 год | $t_3$=336 год | $t_4$=504 год |
| Піщаний | Без перешкод | 384,30 | 547,45 | 876,54 | 1604,5 |
| | З імітацією опадів (20 мм) | | 687,38 | 1049,72 | 2043,71 |
| | З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа) | | 1329,57 | 1812,01 | 2456,49 |
| | З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин | | 1476,56 | 3006,36 | 4579,34 |
| Супіщаний | Без перешкод | 438,41 | 679,41 | 980,37 | 2017,65 |
| | З імітацією опадів (20 мм) | | 950,33 | 1494,38 | 2706,18 |
| | З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа) | | 1700,63 | 2397,79 | 3264,06 |
| | З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин | | 1981,52 | 3897,66 | 5481,47 |
| Глинистий | Без перешкод | 497,84 | 690,50 | 1020,37 | 2134,61 |
| | З імітацією опадів (20 мм) | | 945,73 | 1576,82 | 2774,48 |
| | З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа) | | 1712,48 | 2578,91 | 3474,32 |
| | З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин | | 2170,4 | 3980,29 | 5680,54 |

За результатами проведених досліджень побудовані графічні залежності прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів (рис. 7). У загальному випадку математичну модель, яка описує зміну величини питомого зчеплення, можна представити у вигляді поліноміальної функції другого порядку:

$$y = ax^2 + bx + c, \quad (3)$$

де $a$, $b$ і $c$ – експериментально визначені коефіцієнти (табл. 3).

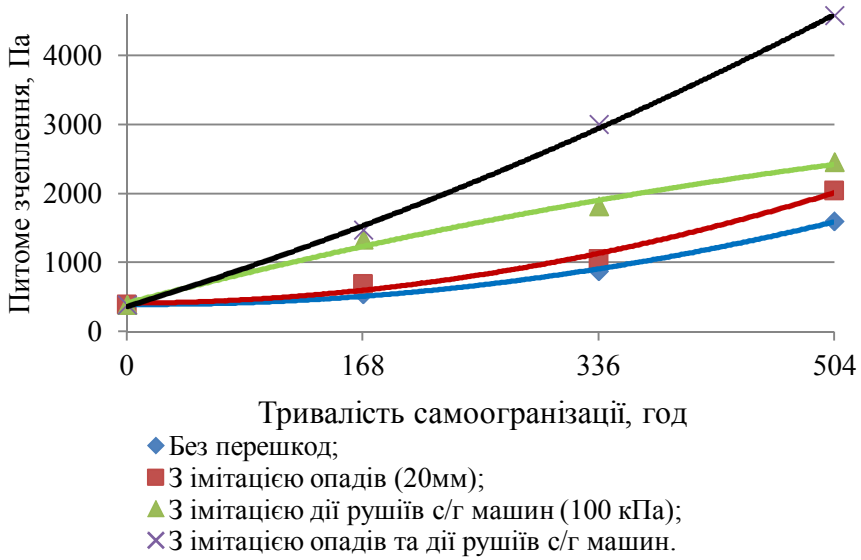



*Рис. 7. Зміна питомого зчеплення для піщаних ґрунтів у результаті самоорганізації ґрунтового середовища*

Таблиця 3

*Експериментально визначені коефіцієнти для прогнозування зміни питомого зчеплення залежно від часу самоорганізації ґрунтового середовища*

| **Тип ґрунту** | **Фактори, які впливають на процес самоорганізації (перешкоди S)** | **Коефіцієнти математичної моделі (3)** | | | **Коефіцієнт детермінації** |
|---|---|---|---|---|---|
| | | *a* | *b* | *c* | |
| Піщаний | Без перешкод | 0,005 | 0,1467 | 395,95 | $R^2$=0,9969 |
| | З імітацією опадів (20 мм) | 0,0061 | 0,0945 | 412,34 | $R^2$=0,9895 |
| | З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа) | -0,0027 | 5,3303 | 415,54 | $R^2$=0,9915 |
| | З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин | 0,0043 | 6,2557 | 354,58 | $R^2$=0,9992 |
| Супіщаний | Без перешкод | 0,0071 | 0,5556 | 472,23 | $R^2$=0,9842 |
| | З імітацією опадів (20 мм) | 0,0062 | 1,249 | 470,19 | $R^2$=0,9929 |
| | З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа) | -0,0035 | 7,2284 | 475,12 | $R^2$=0,9937 |
| | З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин | 0,0004 | 7,2284 | 475,12 | $R^2$=0,9983 |
| Глинистий | Без перешкод | 0,0082 | -0,995 | 530,2 | $R^2$=0,9870 |
| | З імітацією опадів (20 мм) | 0,0066 | 1,0939 | 517,01 | $R^2$=0,9975 |
| | З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа) | -0,0028 | 7,256 | 516,7 | $R^2$=0,9985 |
| | З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин | 0,0002 | 10,209 | 485,49 | $R^2$=0,9998 |

У реальних умовах функціонування ґрунту, графічна залежність зміни питомого зчеплення залежно від часу буде мати дещо інший вигляд (рис. 8).

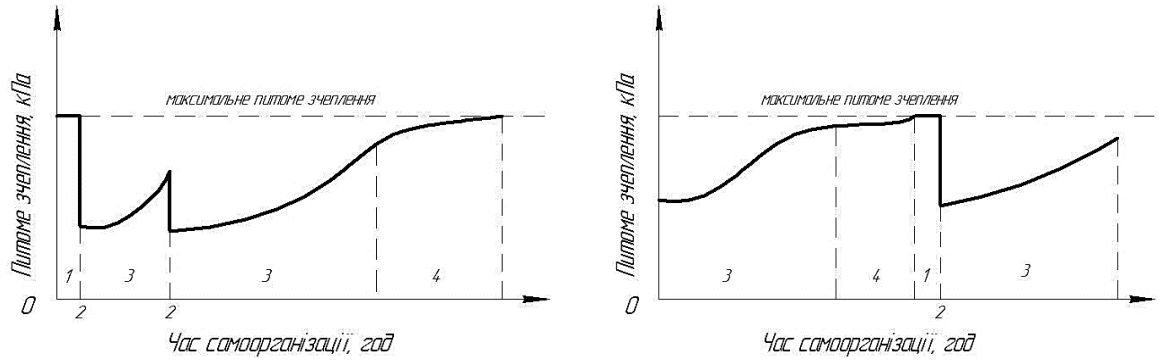



*Рис. 8. Можливі варіанти самоорганізації ґрунту в реальних умовах ведення сільського господарства:*
*1 – зона знаходження ґрунту в рівноважному стані; 2 – зона механічного впливу на ґрунт (оброблення); 3 – зона активної самоорганізації; 4 – зона уповільнення самоорганізації*

На рис. 8 представлені не всі можливі варіанти «життя» ґрунту, адже різноманіття сільськогосподарських культур вимагає різні варіанти його оброблення. Також на інтенсивність протікання процесу самоорганізації ґрунту суттєво впливають погодні умови.

Проведення дослідження для більш достовірного прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів розглядаємо тільки активну зону самоорганізації (рис. 8., зона 3).

Процес самоорганізації середовища ґрунту відбувається інтенсивніше за наявності зв'язуючих компонентів (глини). Зовнішні чинники суттєво прискорюють процеси самоорганізації. Так наявність імітації опадів інтенсифікує процес самоорганізації на 19,7…54,5 %, імітації дії рушіїв сільськогосподарських машин у 1,53…2,52 раза (див. табл. 2).

Характер залежності зміни питомого зчеплення *c* для всіх типів ґрунтів при дії імітацією дії рушіїв сільськогосподарських машин (100 кПа) суттєво відрізняється, що пов'язано з більш швидким процесом самоорганізації на початку функціонування системи.

Для визначення впливу величини питомого тиску рушіїв сільськогосподарських машин та часу дії даних рушіїв на швидкість реалізації процесу самоорганізації середовища ґрунту були проведені відповідні дослідження результати, яких представлені в табл. 4.

Таблиця 4

*Вплив величини тиску та часу прикладання навантаження на величину питомого зчеплення ґрунту*

| **Тип ґрунту** | **Величина тиску, кПа** | **Час прикладання статичного навантаження, хв** | **Питоме зчеплення *c* у різні періоди проведення досліджень, після механічного руйнування структури ґрунту, Па** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $t_1$=0 год | $t_2$=168 год | $t_3$=336 год | $t_4$=504 год |
| Піщаний | 100 | 2 | 384,30 | 1329,57 | 1812,01 | 2456,49 |
| | 100 | 4 | | 1640,40 | 2129,13 | 3214,52 |
| | 100 | 8 | | 1984,73 | 2597,24 | 4302,91 |
| | 150 | 2 | | 2104,32 | 2714,12 | 3640,23 |
| | 200 | 2 | | 2640,92 | 3727,09 | 4643,21 |
| | 250 | 2 | | 2902,35 | 3894,13 | 4938,75 |
| Супіщаний | 100 | 2 | 438,41 | 1700,63 | 2397,79 | 3264,06 |
| | 150 | 2 | | 2201,66 | 3402,32 | 4870,27 |
| | 200 | 2 | | 2600,37 | 3807,37 | 5240,31 |
| | 250 | 2 | | 2938,13 | 4201,99 | 5372,31 |
| Глинистий | 100 | 2 | 497,84 | 1712,48 | 2578,91 | 3474,32 |
| | 150 | 2 | | 2481,32 | 3724,32 | 5300,66 |
| | 200 | 2 | | 2842,03 | 3943,24 | 5381,32 |
| | 250 | 2 | | 3114,31 | 4455,61 | 5498,13 |

На піщаних ґрунтах зростання питомого тиску, від імітації дії рушіїв сільськогосподарських машин, призводить до більш суттєвого зростання величини питомого зчеплення (в 2,01…2,18 раза) у порівняні із супіщаними (в 1,64…1,72 раза) та глинистими (1,58…1,81 раза) ґрунтами (табл. 4, рис. 9).

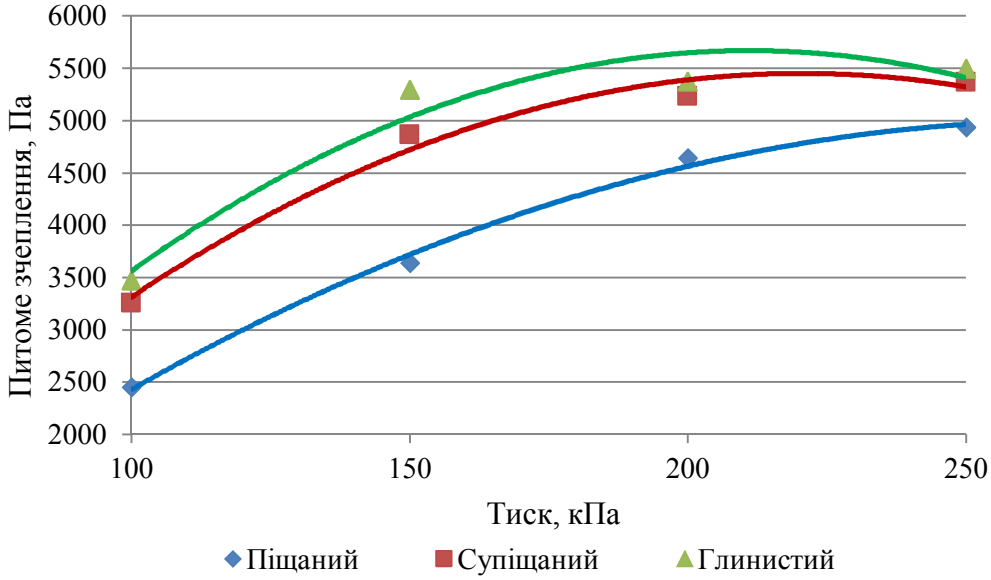



*Рис. 9. Зміна питомого зчеплення для різних типів ґрунтів залежно від величини питомого тиску, що імітує дії рушіїв сільськогосподарських машин (час проведення дослідження $t_4$ = 504 год)*

Зростання часу імітації дії рушіїв на ґрунт (збільшення часу дії питомого тиску на поверхню ґрунту) призводить до інтенсифікації процесів самоорганізації в ґрунті і зростання величини питомого зчеплення (ступеня закріплення абразивних частинок), що своєю чергою приводить до збільшення зношувальної здатності ґрунту (рис. 10). Так збільшення часу дії питомого тиску з 2 хв до 8 хв призводить до зростання питомого зчеплення в 1,4…1,75 раза.

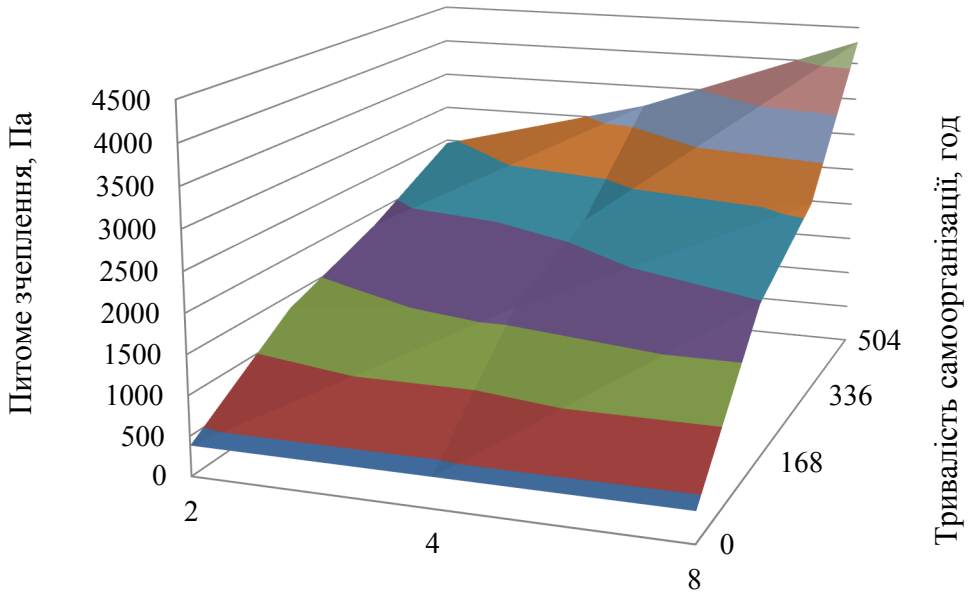



*Рис. 10. Поверхня відгуку впливу часу прикладання статичного навантаження та часу самоорганізації ґрунту на величину питомого зчеплення*

На величину зношувальної здатності ґрунтів суттєво впливає наявність води. Вода також впливає і на інтенсивність процесу самоорганізації ґрунту (табл. 5, рис. 11.)

Таблиця 5

*Вплив кількості опадів на зміну величини питомого зчеплення*

| **Тип ґрунту** | **Кількість опадів, мм** | **Питоме зчеплення *c* у різні періоди проведення досліджень, після механічного руйнування структури ґрунту, Па** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $t_1$=0 | $t_2$=168 год | $t_3$=336 год | $t_4$=504 год |
| Піщаний | 10 | 384,30 | 640,94 | 1031,94 | 2001,32 |
| | 20 | | 687,38 | 1049,72 | 2043,71 |
| | 30 | | 728,41 | 1200,13 | 2081,13 |
| | 40 | | 804,32 | 1471,32 | 2402,13 |
| Супіщаний | 10 | 438,41 | 894,32 | 1240,23 | 2531,16 |
| | 20 | | 950,33 | 1494,38 | 2706,18 |
| | 30 | | 1107,63 | 1502,31 | 2931,47 |
| | 40 | | 1214,54 | 1904,32 | 3071,62 |
| Глинистий | 10 | 497,84 | 870,23 | 1304,28 | 2608,36 |
| | 20 | | 945,73 | 1576,82 | 2774,48 |
| | 30 | | 1198,74 | 1742,13 | 3027,12 |
| | 40 | | 1314,52 | 2403,46 | 3102,26 |

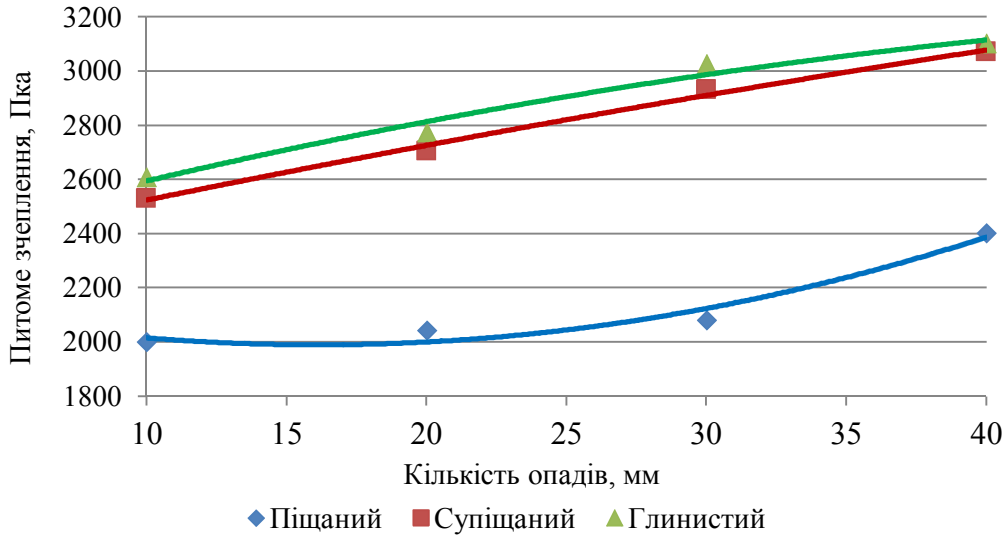
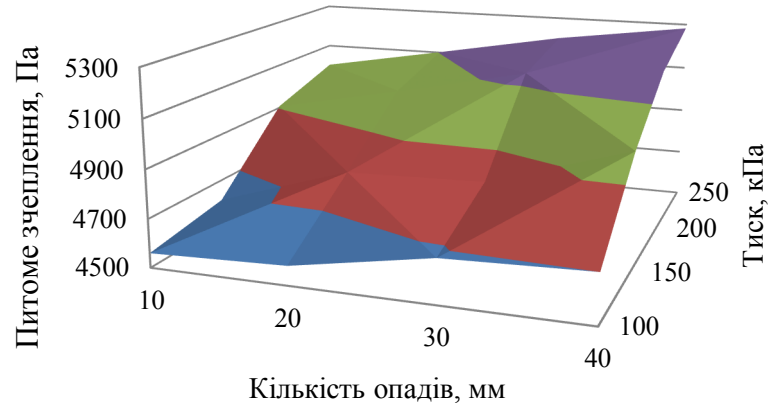



*Рис. 11. Зміна питомого зчеплення для різних типів ґрунтів залежно від кількості опадів (час проведення дослідження $t_4$=504 год)*

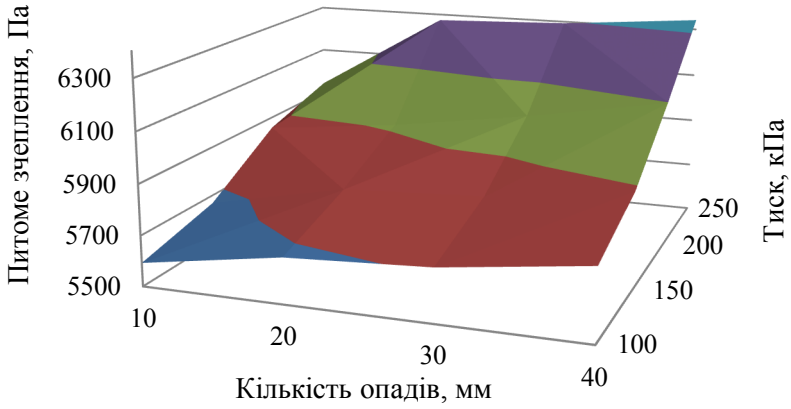
На глинистих ґрунтах зростання кількості опадів, призводить до більш суттєвого зростання величини питомого зчеплення (в 1,2…1,84 раза) у порівняні з супіщаними (в 1,21…1,53 раза) та глинистими (1,2…1,43 раза) ґрунтами (табл. 5, рис. 11).

Для з'ясування спільного впливу величини питомого тиску та кількості опадів на інтенсифікацію процесу самоорганізації ґрунтового середовища був проведений двофакторний експеримент на трьох типах ґрунтів (рис. 12).

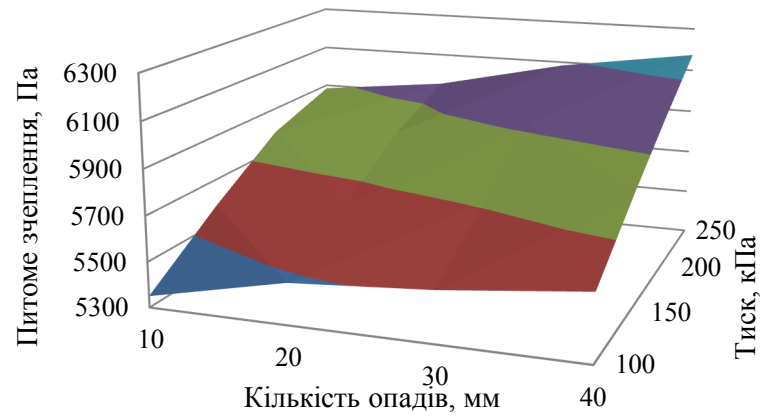
У результаті спільної дії двох факторів: кількості опадів та величини питомого тиску, що імітує дії рушіїв сільськогосподарських машин, процес самоорганізації середовища ґрунту інтенсифікується відповідно для піщаних ґрунтів в 2,8…3,2 раза, для супіщаних – 2,9…3,1 раза, для глинистих – 2,75…2,9 раза в порівняні із самоорганізацією без перешкод.




*а*




*б*




*в*

*Рис. 12. Поверхні відгуку впливу кількості опадів та величини тиску, що імітує дії рушіїв сільськогосподарських машин, на величину питомого зчеплення (час проведення дослідження $t_4$=504 год):*
*а – піщаний ґрунт; б – супіщаний ґрунт; глинистий ґрунт*

Для уникнення негативних явищ абразивного зношування (процесу мікрорізання) необхідно:

- при обробці ґрунтів з високим ступенем закріплення абразивних частинок застосовувати робочі органи з нанесеними зносостійкими покриттями, твердість яких більша за твердість абразивних частинок в 1,1…1,3 раза;

- на ґрунтах із невисоким ступенем закріплення абразивних частинок можна використовувати серійні робочі органи, які виготовлені зі сталі 65Г та 28MnB5.

Для зменшення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин в процесі експлуатації, враховуючи отримані математичні моделі зміни абразивних властивостей ґрунту в процесі самоорганізації, потрібно проводити обробіток ґрунту на початку самоорганізації системи.

**Висновки відповідно до статті.** У результаті проведених досліджень встановлено, що ґрунт як складна система здатен до самоорганізації. У процесі самоорганізації підвищується абразивна здатність ґрунту. Зовнішні чинники (опади та питомий тиск від дії рушіїв) пришвидшують процес самоорганізації ґрунту, що призводить до зростання абразивних властивостей ґрунту. Зовнішні чинники не впливають на загальну закономірність інтенсивнішого процесу самоорганізації ґрунтового середовища на початку її функціонування після механічного руйнування структури. Розроблені математичні моделі, з урахуванням зовнішніх чинників, дозволяють прогнозувати зміну абразивних властивостей ґрунту.

Проведені дослідження дозволяють прийти до висновку, що на процес самоорганізації ґрунту впливають зовнішні чинники (опади та дія рушіїв сільськогосподарських машин). На різних типах ґрунтів зовнішні фактори впливають по різному на процес самоорганізації, так дія рушіїв сільськогосподарських машин більш суттєво інтенсифікує процес самоорганізації на піщаних ґрунтах, а наявність вологи – на глинистих ґрунтах.

Зменшення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин можна досягти за рахунок більш раннього повторного обробітку (після механічного руйнування структури ґрунту), поки не відбулися процеси підвищення абразивних властивостей у результаті самоорганізації ґрунту.

## Список використаних джерел

1. Аулін В. В., Тихий А. А. Модель взаємодії дисперсного середовища ґрунту з поверхнею робочих органів ґрунтообробних та землерийних машин. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2014. Вип. 27. С. 140–149.

2. Беркович И. И., Болотов А. Н., Морозова Ю. И. Теоретические основы фрикционного взаимодействия дисперсных материалов с твердой поверхностью: монография. Тверь, 2012. 92 с.

3. Левин С. В. Механика грунтов. Москва, 1964. 164 с.

4. Шелудченко Б. А. Агромеханіка ґрунтів. Житомир, 1992. 249 с.

5. Дьяков В. П. Механика почвы и реологія грунтов. Точки соприкосновения и различия. *Достижение науки и техники АПК*. 2007. № 7. С. 48–51.

6. DvorukV. I., Borak K. V. Research of the degree of fixation of abrasive particle in the soil. *Міжнародний науковий журнал "Проблеми трибології"*. Хмельницький, 2019. № 1. С. 67–72.

## References

1. Aulin, V. V., Tykhyi, A. A. (2014). Model vzaiemodii dyspersnoho seredovyshcha gruntu z poverkhneiu robochykh orhaniv gruntoobrobnykh ta zemleryinykh mashyn [Model the interaction of dispersed soil environment with working parts of cultivation and digging machine]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Engineering in agricultural production, industry engineering, automation*, 27, 140–149 [in Ukrainian].

2. Berkovich, I. I., Bolotov, A. N., & Morozova, Iu. I. (2012). *Teoreticheskie osnovy friktsionnogo vzaimodeistviia dispersnukh materialov s tverdoi poverkhnostiu [The theoretical basis of the frictional interaction of dispersed materials with a solid surface]*.Tver: TVGTU [In Russian].

3. Levin, S. V. (1964). *Mexanikagruntov [Soil mechanics]*. Moscow: Nedry [in Russian].

4. Sheludchenko, B. A. (1992). *Ahromekhanika gruntiv [Soil Agromechanics]*. Zhytomyr: Polissia [inUkrainian].

5. Diakov, V. P. (2007). Mekhanika pochvy i reologiia gruntov. Tochki soprikosnoveniia i razlichiia [Soil mechanics and soil rheology. Points of contact and differences.]. *Dostizhenie nauki i tekhniki APK – Achievement of science and technology of agribusiness*, 7, 48–51 [in Russian].

6. Dvoruk, V. I., Borak, K. V. (2019). Research of the degree of fixation of abrasive particle in the soil. *Problems of Tribology*, 1, 67–72.

*UDC 631.431*

*Kostiantyn Borak*

## THE PROGNOSTICATION OF THE CHANGE IN SOILS ABRASIVE PROPERTIES TO ENSURE THE RELIABLE OPERATION OF WORKING BODIES

***Urgency of the research.*** *Studies of the change in soils abrasive properties and taking them into account when choosing the materials and the working organs operating regimes of the tillers which will allow to reduce the amortization intensity, is definitely an urgent issue.*

***Target setting.*** *The agrarian production intensification sets conditions for tough requirements to wearability of the working organs of the tillers.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *The existing models of soil environment regard soil as an ideal medium which does not change its characteristics in the long run and these models do not regard its abrasive properties.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *There are no theoretical and experimental research concerning any change in soils abrasive properties in the process of self-organization.*

***The research objective.*** *The purpose of the research is to develop a mathematical model of the change in soils abrasive properties in the process of self-organization.*

***The statement of basic materials.*** *Consistency patterns of changes in soils abrasive properties in the process of self-organization can be described by a polynomial function of the second order. The coefficients of the given function were determined experimentally with due regards to the most meaningful factors.*

***Conclusions.*** *The soil abrasive property increases in the process of self-organization. External factors (precipitation, ground pressure from applied forces) speed up the process of soil self-organization, that results in the increase in soils abrasive properties. External factors do not affect the consistency pattern of a more intensive process of soil medium self-organization at the beginning of its functioning. The developed mathematical models, with due regards to the external factors, will allow to prognosticate some change in soils abrasive properties. A less intensive wear-out of tillers' working organs can be achieved by a much earlier repeated soil tillage (after a mechanical distortion of soil structure) before the processes of increasing of soils abrasive properties as a result of soil self-organization occur.*

***Keywords:*** *self-organization; soil; system; specific cohesion; degree of fixation; ground pressure; precipitation.*

*Fig.: 12. Table: 5. References: 6.*

**Борак Костянтин Вікторович** – кандидат технічних наук, Житомирський агротехнічний коледж (вул. Покровська, 96, м. Житомир, 10031, Україна).

**Borak Kostiantyn** – PhD in Technical Science, Zhytomyr Agrarian and Technical College (96 Pokrovskaya Str., 10031 Zhytomyr, Ukraine).

**E-mail:** koss1983@meta.ua

**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5611-4707

**ResearcherID:** G-6568-2016

Борак К. Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів для забезпечення надійної експлуатації робочих органів. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 53-64.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 621.798.927*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-65-71*

*Ірина Захарова, В'ячеслав Роянов*

# ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПУЛЬСАТОРА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПУЛЬСУЮЧОГО РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО ПОТОКУ ПОВІТРЯ ПРИ ДУГОВІЙ МЕТАЛІЗАЦІЇ

***Актуальність теми дослідження.*** *У світовій практиці застосування понад 50 % займають металеві покриття, що наносяться методом електродугової металізації, яка має такі переваги: висока продуктивність, простота обладнання, низька енергоємність, можливість отримання покриттів з високими експлуатаційними властивостями за рахунок застосування недефіцитних і недорогих дротів промислового виробництва.*

***Постановка проблеми.*** *При дуговому напиленні має місце інтенсивне окислення металу, який розпилюється киснем повітря, що призводить до значного вигоряння легуючих елементів та значно знижує якість нанесеного покриття.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Багато робіт науковців спрямовано на вдосконалення конструкцій розпилювальних головок електродугових металізаторів, що передбачає вдосконалення конструкції повітряного сопла шляхом використання вставок і пристроїв, що забезпечують зміну в повітряно-розпилювальному потоці та призводить до значного удорожчання процесу.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Відомі розпилювальні головки не суттєво знижують окисний вплив розпилювального повітря, не забезпечують ресурсозбереження за рахунок зменшення витрати розпилювального повітря і витрат електроенергії на його отримання.*

*Таким чином,* ***метою досліджень*** *є зниження окислення часток металу, при дуговій металізації для отримання покриттів із зазначеними властивостями та застосування ресурсозбереження.*

***Виклад основного матеріалу.*** *З метою зниження окисного впливу повітряно-розпилювального струменя на рідкий метал електродів розроблений метод пульсуючої подачі повітря в зону плавлення електродів. У даній роботі представлено пристрій для створення пульсуючого розпилювального потоку повітря при електродуговому напиленні.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Показано, що при використанні різних перетинів клапана пульсатора для створення пульсуючого розпилювального потоку для дугової металізації, спостерігаються зміни в обсязі повітря та маси кисню розпилювального струменя в кілька разів.*

***Ключові слова:*** *продуктивність; дугове напилення; пульсуючий струмінь; нанесення покриттів; міцність зчеплення.*
*Рис.: 5. Бібл.: 11.*

**Актуальність теми дослідження.** Нині процеси газотермічного напилення знаходять дедалі більш широке використання для відновлення зношених деталей та приданя різноманітних властивостей поверхням нових деталей. Використання дугової металізації також дозволяє відновлювати втрачені розміри деталей в результаті зношення при їх експлуатації. Для цього застосовуються матеріали з необхідним хімічним складом і відповідальний спосіб напилення.

У світовій практиці застосування понад 50 % займають металеві покриття, що наносяться методом електродугової металізації, яка має такі переваги: висока продуктивність, простота обладнання, низька енергоємність, можливість отримання покриттів із високими експлуатаційними властивостями за рахунок застосування недефіцитних і недорогих дротів промислового виробництва.

**Постановка проблеми.** У процесі електродугового напилення відбувається інтенсивна хімічна взаємодія розпилювального струменя повітря з матеріалом, що розпилюється, яке призводить до значного вигоряння легуючих елементів [8–11]. Інтенсивність окислення збільшується зі збільшенням параметрів, таких як тиск стисненого повітря, відстань від сопла апарату до деталі, що чинить негативний вплив на механічні властивості покриттів та знижує їхню якість.

Ця проблема є однією з основних при дуговій металізації, її вирішенню приділяється значна увага науковців.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато робіт спрямовано на вдосконалення конструкцій розпилювальних головок електродугових металізаторів [2–6], виконаних у вигляді корпусу, в якому розташовується повітряно-розпилювальне сопло, забезпечується подача стисненого повітря шляхом використання вставок і пристроїв, що забезпечують зміну в повітряно-розпилювальному потоці, та приводить до значного удорожчання процесу. Відомі розпилювальні головки не суттєво знижують окисний вплив розпилювального повітря, не забезпечують ресурсозбереження за рахунок зменшення витрати розпилювального повітря і витрат електроенергії на її отримання.

© Захарова І. В., Роянов В. О., 2020

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Відсутність науково-обґрунтованої економічної технології зниження впливу кисню з розпилювального струменя на рідкий метал торців електродів, що розплавляються, спонукало до розробки методу дугової металізації з використанням пульсуючого розпилювального потоку повітря та конструкції пристрою для забезпечення зниження вигоряння легуючих елементів і поліпшення властивостей покриття. Раніше дослідження в цьому напрямі не відомі й потребують теоретичних і технологічних обґрунтувань щодо практичного використання методу.

Отже, **метою досліджень** є зниження окислення часток металу при дуговій металізації для отримання покриттів із зазначеними властивостями та застосування ресурсозбереження.

**Постановка завдання.** З метою зниження окисного впливу розпилювального струменя на рідкий метал торців електродів, що плавляться, пропонується використовувати пульсуючий розпилювальний струмінь повітря, який, за рахунок пульсацій визначеної частоти зменшить вплив кисню на розплавлений метал електродів [7]. Для вирішення поставленого завдання було розроблено відповідний пристрій [9].

**Виклад основного матеріалу.** У роботі наведено обґрунтування конструкції цього пристрою. Пульсуючий пристрій являє собою циліндричний корпус із вхідним і вихідним патрубком для підведення і виведення стисненого повітря, всередині якого встановлено вал з отвором і можливістю обертання.

Застосування різного перетину прохідного отвору клапана пульсатора дозволяє змінювати і характер наростання імпульсу. При використанні круглого перетину (прототип) – імпульс має синусоїдальну форму. При використанні прямокутного перетину – імпульс має прямокутну форму наростання і падіння напору струменя. Загальним для синусоїдальної і прямокутної форм перекриття є наявність паузи в розпиленні, необхідної для утворення рідкого металу на торцях плавких електродів.

Однак прямокутна форма перетину прохідного отвору клапана пульсатора забезпечує більш різкий режим наростання і падіння напору струменя. Розроблений пристрій дозволяє отримати пульсуючий режим повітряно-розпилювального струменя з імпульсами прямокутної форми. При цьому оптимальний перетин прохідного отвору обертового клапана – прямокутник зі співвідношенням сторін h / b = 1,3...1,5.

Геометричні параметри робочого отвору клапана виражені певним співвідношенням.

Сутність запропонованого рішення та обґрунтування позитивного ефекту пояснюються кресленнями, на якому зображено схема принципу конструкції пульсатора (рис. 1), який складається з корпуса, кришки, вхідного та вихідного патрубків. А також вірогідні схеми перекриття каналу проходження повітря через клапан пульсатора.

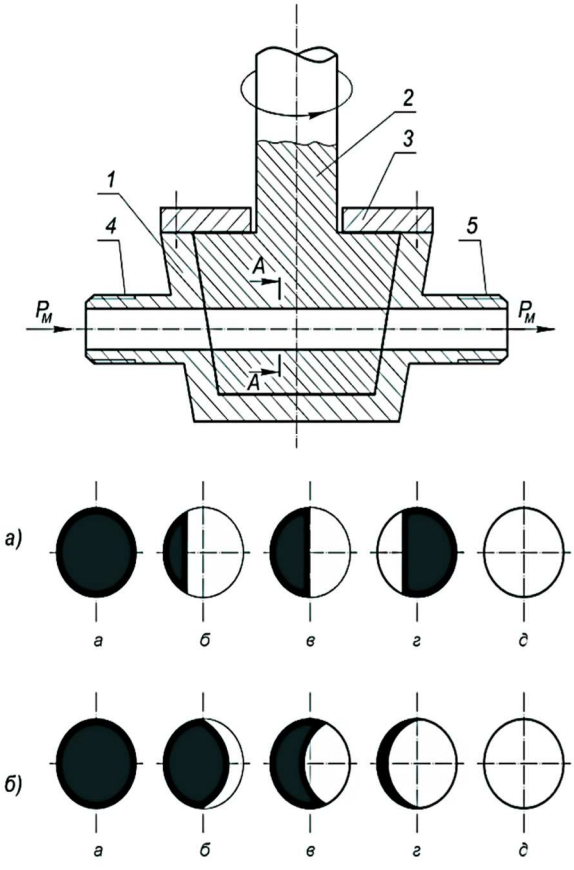



*Рис. 1. Схема пульсатора з обертовим клапаном:*
*1 – корпус; 2 – шток; 3 – кришка; 4, 5 – патрубок;*
*а – форма перетину прохідного отвору клапана пульсатора («коло-квадрат»);*
*б – форма перетину прохідного отвору клапана пульсатора («коло-коло»)*

Площі перекриття для перетинів різної форми представлені на графіках (рис. 2, 3).

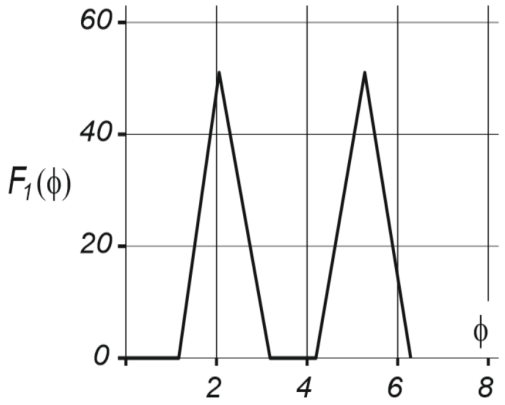



*Рис. 2. Площа перекриття для перетину «коло-коло»*

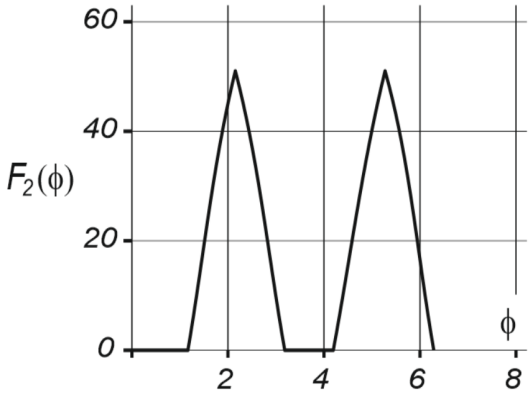



*Рис. 3. Площа перекриття для перетину «коло-квадрат»*

Для цих варіантів величина площі становила: перетин «коло-коло» $P_1 = 92{,}04$ мм$^2$; перетин «коло-квадрат» $P_2 = 46{,}02$ мм$^2$.

Провівши аналіз, можна зробити висновок, що більша площа перекриття характерна для випадку «коло-коло», відповідно до змін площі перетину змінюється і витрата повітря, що, у свою чергу, збільшує продуктивності й ефективності використання матеріалу, який розпилюється.

Для реалізації способу дугового металізації з пульсуючим розпилювальним потоком з урахуванням проведених досліджень за основними показниками способу запропонована конструкція пульсатора для промислового виконання (рис. 4).

Конструкція пульсатора забезпечує стабільність отримання імпульсів потоку завданої частоти, за рахунок підшипників при фіксуванні клапана-пульсатора в корпусі. З'ємна кришка забезпечує мобільність клапана пульсатора за наявності зносу при тривалій роботі. Конструкція передбачає вільне обертання клапана пульсатора при наявності зависокого тиску (5-6 атмосфер) у системі подачі повітря.

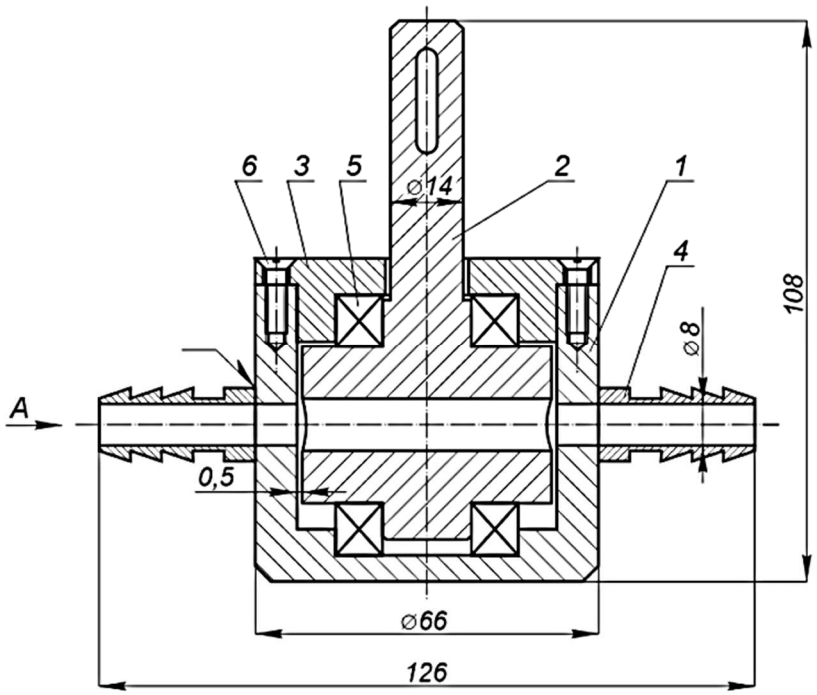



*Рис. 4. Складальна схема клапана – пульсатора:*
*1 – корпус; 2 – шток; 3 – кришка; 4 – патрубок; 5 – підшипник; 6 – гвинт*

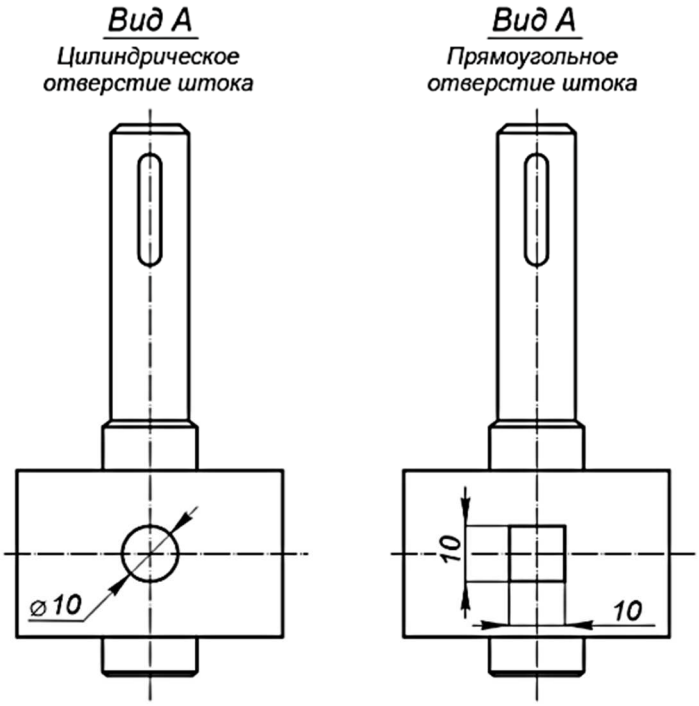



*Рис. 4. Аркуш 2*

Наявність клапана пульсатора у системі подачі повітря не впливає на проведення процесу дугової металізації проте зменшує потрібну кількість повітря.

Авторами було зроблено аналіз впливу частоти пульсацій потоку повітря на ряд показників, окремо на масу кисню, яка бере участь у процесі транспортування розплавлених часток металу електродів та представлені деякі результати у вигляді графіку (рис. 5) [7; 11].

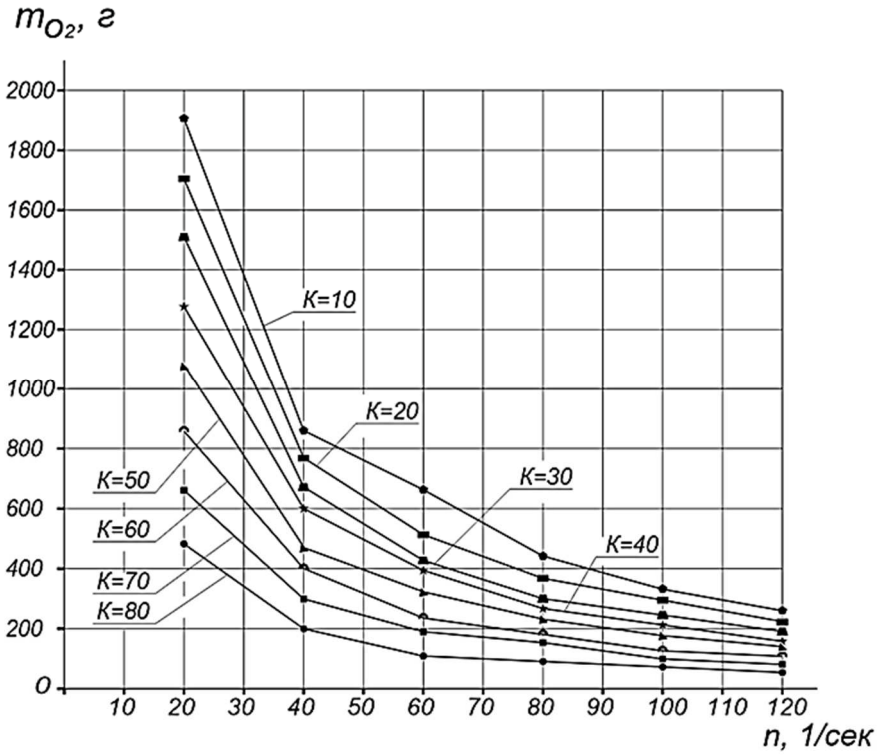



*Рис. 5. Вплив частоти імпульсів пульсатора на величину маси кисню повітря, що проходить через сопло (для значень перекриття каналу сопла p = 80 , протягом 60 с)*

З рис. 5 можна побачити, що обсяг повітря і маса кисню розпилювального струменя знижується з ростом частоти пульсацій в кілька разів, а значить, також знижується його вплив на вигорання легуючих елементів у нанесеному покритті.

**Висновки відповідно до статті.** З метою вирішення проблеми зниження окислювального впливу на метал електродів, які розпилюються, запропоновано пульсуючу подачу повітряного розпилювального потоку при електродуговій металізації за рахунок введення додаткового елементу в розпилювальну головку металізатора.

Пульсуючий пристрій являє собою циліндричний корпус із вхідним і вихідним патрубком для підведення і виведення стисненого повітря, всередині якого встановлено вал з отвором і можливістю обертання.

Ефект пульсуючої подачі досягається за рахунок обертання валу з отвором періодично з'єднує вхідний і вихідний патрубок циліндра пульсатора.

Розроблений пристрій (пульсатор) встановлюється перед розпилювальною системою дугового металізатора, дозволяє значно скоротити витрати повітря і не становить незручності (перешкод) при виконанні процесу дугового напилення.

## Список використаних джерел

1. А.с. 1787049 СССР, МКИ В 05 В 7/22. Распыляющая металлизационная головка / В. А. Роянов, Г. А. Мосиенко, В. П. Семенов, В. Я. Лавренов. № 990322; Заявл. 22.11.89; Опубл. 07.01.93, бюл. № 1.

2. А.с. 1727923 СССР, МКИ В 05 В 7/22. Устройство для электродуговой металлизации / Ю. С. Борисов, А. Г. Ильенко, Е. А. Астахов, А. Л. Гайдаренко. № 1329835; Заявл. 26.06.89; Опубл. 23.04.92, бюл. № 15.

3. Тер-Даниэльян Б. И., Красниченко Л. В. Новая распылительная головка электродугового металлизатора. *Сварочное производство*. 1983. № 12. С. 30–32.

4. Войцеховский Е. В., Роянов В. А, Войцеховский Е. В. Некоторые газодинамические и технологические характеристики воздушно-распыляющих сопел электрометаллизационных аппаратов. *Сварочное производство*. 1977. № 12. С. 18–19.

5. Кравченко Л. В. Новая распылительная головка электродугового металлизатора. *Сварочное производство*.1983. № 12. С. 30–32.

6. Роянов В. А., Бобиков В. И. Устройство для электродуговой металлизации с пульсирующим режимом истечения воздушно-распыляющей струи. *Сварочное производство.* 2015. № 4. С. 12–15.

7. Роянов В. А., Захарова И. В., Крючков Н. С. Снижение воздействия кислорода на жидкий металл при электродуговом напылении пульсирующей струей воздуха. *WorldSience.* 2019. № 5(45). Warsaw RS Global Sp.2.O.O.IndexCopernicus, academia.edu.

8. Royanov V., Zakharova I., Lavrova E. Development of properties of spray flow and nature of pressure distribution in electric arc metalization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 6/5 (90). С. 41–49.

9. Роянов В. А., Захарова И. В., Крючков Н. Изучение влияния конструкций распыляющего устройства на качество напыленного слоя. *Университетская наука – 2017*: Междун. науч.-техн. конф. (г. Мариуполь, 18-19 мая 2017 г.) / Приазовский государственный технический университет. Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2017. Т. 2. С. 86–87.

10. Захарова І. В., Роянов В. О., Крючков М. С. Вплив пульсуючого розпилювального потоку на ефективність використання електродів, при утворенні покриттів. *Topical issues of the development of modern science:* матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (София, Болгария, 11-13 грудня). София, 2019. С. 88–94.

11. Захарова І. В., Роянов А. О., Крючков М. С. Вплив частоти пульсацій на міцність зчеплення покриття з основою. *The 16th International conference "Science and society*" (December 27, 2019). Accent Graphics Communications & Publishing, Hamilton, Canada, 2019. P. 6–11.

## References

1. Roianov, V. A., Mosienko, G. A., Semenov, V. P., Lavrenov, V. Ia. (1993). *Raspyiliaiuschaia metallizatsionnaia golovka [Spray head]*. A.s. 1787049 SSSR, MKI V 05 V 7/22, № 990322 [in Russian].

2. Borisov, Iu. S., Ilenko, A. G., Astakhov E. A., Gaidarenko A. L. (23.04.92). *Ustroistvo dlia elektro-dugovoi metallizatsii [Device for electric arc metallization]*. A.s. 1727923 SSSR, MKI V 05 V 7/22. № 1329835 [in Russian].

3. Ter-Danielian, B. I., Krasnichenko, L. V. (1983). Novaia raspylitelnaia golovka elektrodugovogo metallizatora [New spray head of the electric arc metallizer]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 12, 30–32 [in Russian].

4. Roianov, V. A, Voitcekhovskii, E. V. (1977). Nekotorye gazodinamicheskie i tekhnologicheskie kharakteristiki vozdushno-raspyliaiushchikh sopel elektrometallizatcionnykh apparatov [Some gas-dynamic and technological characteristics of air-spraying nozzles of electrometallization apparatuses] *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 12, 18–19 [in Russian].

5. Kravchenko, L. V. (1983). Novaia raspylitelnaia golovka elektrodugovogo metallizatora [New spray head of the electric arc metallizer]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production,* 12, 30–32 [in Russian].

6. Roianov, V. A., Bobikov, V. I. (2015). Ustroistvo dlia elektrodugovoi metallizatcii s pulsiruiushchim rezhimom istecheniia vozdushno-raspyliaiushchei strui [A device for electric arc metallization with a pulsating regime of the expiration of the air-spray jet]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production,* 4, 12–15 [in Russian].

7. Roianov, V. A., Zakharova, I. V., Kriuchkov, N. S. (2019). Snizhenie vozdeistviia kisloroda na zhidkii metall pri elektrodugovom napylenii pulsiruiushchei struei vozdukha [Reducing the effect of oxygen on liquid metal during electric arc spraying with a pulsating air stream]. *WorldSience, 5(45),* Warsaw RS Global Sp.2.O.O.IndexCopernicus, academia.edu [in Russian].

8. Royanov V., Zakharova I., Lavrova E.. [2017] Development of properties of spray flow and nature of pressure distribution in electric arc metalization. *Eastern-European Journal of Enterprise* Technologies, 6/5 (90), 41–49 [in English].

9. Roianov, V. A., Zakharova, I. V., Kriuchkov, N. (2017). Izuchenie vliianiia konstruktcii raspyliaiushchego ustroistva na kachestvo napylennogo sloia [Studying the influence of spray device designs on the quality of the sprayed layer*]*. Proceeding from *Universitetskaia nauka – 2017: Mezhdun. nauch.-tekhn. konf. – University Science – 2017: Int. scientific and technical Conf. (Mariupol, May 18-19, 2017)* (Vol. 2, pp. 86-87). Mariupol: State Higher Educational Institution "PSTU" [in Russian].

10. Zakharova, I. V., Roianov, V. O., Kriuchkov, M. S. (2019). Vpliv pulsuiuchogo rozpiliuvalnogo potoku na efektivnist vikoristannia elektrodiv, pri utvorenni pokrittiv. [Introducing a pulsating rospiluvial flow to the efficiency of the electrical circuits, with the approved coverage]. Proceeding from *IV Mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiia «Topical issues of the development of modern science» – Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference «Topical issues of the development of modern science»* (Sofia, Bulgaria, December 11-13) (pp. 88–94). Sofia [in Ukrainain].

11. Zakharova, I. V.,Roianov, A. O., Kriuchkov, M. S. (2019). Vpliv chastoti pulsatcii na mitcnist zcheplennia pokrittia z osnovoiu. [Influence of the frequency of ripples on the strength of adhesion of the coating to the substrate]. *The 16th International conference «Science and society» (December 27)* (pp. 6–11). Accent Graphics Communications & Publishing, Hamilton, Canada [in Ukrainain].

*UDC 621.798.927*

*Irina Zakharova, Vyacheslav Royanov*

## OBJECTIVE REASONING OF PULSATOR DESIGN FEATURES FOR THE PROVISION OF PULSATING SPRAYING AIR FLOW DURING ARC METALLIZATION

***Relevance of the topic of study.*** *In global practice, more than 50 % of the metal coatings are applied by the method of electric arc metallization, which has the following advantages: high productivity, ease of use of equipment, low power consumption, the ability to obtain coatings with high-performance properties through the use of non-deficient and inexpensive wires industrial production.*

***Problem setting.*** *During arc spraying, intensive oxidation of the metal, which is sprayed by ambient oxygen, takes place, which leads to significant burnout of alloying elements and significantly reduces the quality of the applied coating.*

***Analysis of recent studies and publications.*** *A number of scientific works are aimed at improving the design of spray heads of electric arc metallizers, which involves improving the design of the air nozzle through the use of inserts and devices that provide a change in the air-spraying flow, and leads to a significant increase in the cost of the process.*

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

***Identification of previously unexplored parts of the general problem.*** *Conventional spray heads do not significantly reduce the oxidative effect of spraying air and do not provide resource saving by reducing the consumption of spraying air and electricity consumption for its production.*

*Thus**, the purpose of the research** is to reduce the oxidation of metal particles during arc metallization to obtain coatings with mentioned properties and to achieve resources saving.*

***The statement of basic materials.*** *In order to reduce the oxidative effect of air-spraying jet on the liquid metal of electrodes, the method of pulsating air supply to the electrode melting zone is developed. This study presents the device for the creation of a pulsating spraying airstream at electrode spraying.*

***The article's summary.*** *It is shown that changes by several times in the air volume and oxygen mass of the spray stream are observed when using different cross-sections of the pulsator valve to create a pulsating spray stream for arc metallization.*

***Keywords:*** *productivity; arc spraying; pulsating jet; coating; adhesion strength.*

*Fig.: 5. References: 11.*

**Захарова Ірина В'ячеславівна –** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Автоматизація та механізація зварювального виробництва», ЗВО Приазовський державний технічний університет (вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна).

**Zakharova Irina –** PhD inTechnical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Automation and Mechanization of Welding Production, State Higher Educational Institution «Priazovskiy State Technical University» (7 Universytetska Str., 87555 Mariupol, Ukraine).

**E-mail:** Zsv-73@i.ua

**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-3492-0134

**Роянов В'ячеслав Олександрович –** доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Автоматизація та механізація зварювального виробництва», Почесний професор ДГМА, почесний громадянин міста Маріуполь, ЗВО Приазовський державний технічний університет (вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна).

**Royanov Vyacheslav** –Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Automation and Mechanization of Welding Production, Honorary professor of DGMA, honorary citizen of the city of Mariupol, State Higher Educational Institution «Priazovskiy State Technical University» (7 Universytetska Str., 87555 Mariupol, Ukraine).

**E-mail:** rva-41@i.ua

**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-5379-9096

Захарова І., Роянов В. Обгрунтування конструктивних особливостей пульсатора для забезпечення пульсуючого розпилювального потоку повітря при дуговій металізації. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 65-71.

*УДК 621.923.42*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-72-80*

*Віталій Кальченко, Володимир Кальченко, Володимир Венжега, Володимир Винник*

# МОДЕРНІЗАЦІЯ УНІВЕРСАЛЬНО-ЗАТОЧУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК В3208Ф3 ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ

***Актуальність теми дослідження.*** *Технологія високошвидкісного фрезерування є однією з найбільш сучасних і ефективних альтернатив класичним методам обробки, що значно відрізняється якістю і швидкістю обробки, а також можливістю виготовлення виробів із важкооброблюваних матеріалів.*

***Постановка проблеми.*** *Швидкісне фрезерування переважно реалізується за допомогою багатокоординатних верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК), проте стійкий процес різання неможливо забезпечити на наявному обладнанні без модернізації системи ЧПК, приводу головного руху, який би забезпечував необхідну швидкість різання та використання спеціального інструменту.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Основними вимогами до системи ЧПК при високошвидкісній обробці є її швидкодія, можливість забезпечення гладких траєкторій руху інструменту для рівномірного навантаження на нього без численних врізань і виходів. Використання ефективного змащувально-охолоджувального середовища (ЗОТС) зменшує пружні віджимання в технологічній системі при її фіксованій жорсткості.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Впровадження високошвидкісного фрезерування на верстатах із ЧПК стримується відсутністю практичних рекомендацій і потребує додаткових досліджень, зокрема жорсткості верстата.*

***Постановка завдання.*** *Дослідити можливість модернізації універсально-заточувального верстата з ЧПК моделі В3208Ф3 з метою розширення його технологічних можливостей для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання дисковою фрезою, оснащеною різальними елементами з кубічного нітриду бору.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Високошвидкісне фрезерування – сучасний високотехнологічний метод обробки, що дозволяє отримувати найменші перетини зрізу металу при використанні високих швидкостей знімання. Сутність цієї технології полягає у використанні певного діапазону швидкостей різального інструменту, що веде до істотного зниження опору матеріалу при його обробці, чим забезпечується обробка важкооброблюваних матеріалів. Особливістю такої технології є те, що тепло, яке виділяється при обробці, практично повністю зосереджено в стружці і не перебуває тривалий час у зоні обробки, через що фреза й деталь мало схильні до термічного впливу.*

***Висновки відповідно до статті.*** *У роботі досліджено технологічні можливості універсально-заточувального верстата з ЧПК моделі В3208Ф3 з метою його використання для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання дисковою фрезою, оснащеною різальними елементами із кубічного нітриду бору та обґрунтовано модернізацію його системи ЧПК та вузлів.*

***Ключові слова:*** *високошвидкісне фрезерування; фрези з різальними елементами з надтвердих матеріалів; точність обробки; продуктивність обробки.*

*Рис.: 5. Бібл.: 7.*

**Актуальність теми дослідження.** Нині значну роль у підвищенні ефективності виробництва мають методи високошвидкісної обробки, серед них і високошвидкісне фрезерування, які належать до прогресивних технологій. Їхня роль дуже важлива при виробництві в машинобудуванні та інших галузях, що визначають науково-технічний прогрес, тому що вони забезпечують високу точність та якість оброблених поверхонь і значно скорочують час на виготовлення виробів.

**Постановка проблеми.** При роботах на великих робочих подачах і високій швидкості різання, якими характеризується високошвидкісне фрезерування, необхідно забезпечити стійкий процес різання, що є неможливим на наявному стандартному обладнанні без його модернізації. Для реалізації методу високошвидкісної обробки на універсально-заточувальному верстаті з ЧПК моделі В3208Ф3, що має базову систему ЧПК 2С42, яка морально та фізично застаріла, потрібно провести її заміну, дослідити можливості верстата, вдосконалити деякі існуючі вузли та підібрати інструмент.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] проаналізовано перспективні напрями підвищення продуктивності обробки різанням, з'ясовано, що головний ефект високошвидкісної обробки полягає в підвищенні якості обробки й можливості ефективного використання сучасних верстатів із ЧПК. Підвищення швидкості різання за рахунок використання більш ефективного ЗОТС пов'язано зі зменшенням сил різання при точінні та розточуванні. Це, у свою чергу, призводить до зменшення пружних

© Кальченко В. І., Кальченко В. В., Венжега В. І., Винник В. О., 2020

відтискань у технологічній системі при фіксованій її жорсткості. Тобто перетворення ресурсу стійкості різального інструменту в ресурс збільшення швидкості різання одночасно приводить до збільшення точності обробки за виконаним розміром.

У роботі [2] розглядалось питання про введення коефіцієнта технологічної ефективності, яким враховувалось можливе збільшення швидкості різання. Проте в цій роботі доведено, що підвищення стійкості самого інструменту не дає значного приросту швидкості різання. Обґрунтовано технологічні переваги методів високошвидкісної обробки та застосування високошвидкісних інструментальних шпинделів.

У [3] підвищення ефективності технології фінішної обробки деталей пар тертя поршневих насосів пропонується за рахунок високошвидкісної обробки.

У [4] обробку довгомірних валів пропонується реалізувати за способом фрезоточіння. Як різальнрий інструмент застосовується фреза дискового типу, оснащена різальними елементами з надтвердих матеріалів (НТМ) цільної або збірної конструкції. У цьому випадку фрезоточіння має такі переваги:

- чистовий різець обробляє заготовку з точністю до 8-го квалітету і шорсткістю $R_a$ до 1,6…3,2 мкм, фрезоточіння дозволяє поліпшити обидва параметри на 1-2 класи, оскільки на відміну від різця фреза має кілька різальних крайок, а значить більший ресурс стійкості;

- при точінні на різець будуть діяти великі навантаження, для усунення яких доводиться знижувати подачу, зменшуючи продуктивність, а фреза здатна працювати в умовах високих навантажень при великій подачі;

- при обробці різцем для дроблення стружки доводиться використовувати стружколоми, при обробці ж фрезою стружка знімається кожним зубом фрези і дробиться на окремі частинки;

- можлива обробка на токарних верстатах заготовок із наявністю твердої кірки (поковок, виливок), а також важкооброблюваних матеріалів, оскільки зуб фрези в цьому випадку буде плавно різати під кірку, що допомагає істотно знизити знос фрези та збільшити її стійкість;

- фрези, оснащені НТМ, можуть замінити операцію шліфування, забезпечуючи розмірну стійкість, оскільки на відміну від шліфувального круга не мають процесу викришення.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Відсутність рекомендацій і технологічних досліджень з високошвидкісного різання матеріалів стримує розвиток цього прогресивного напряму на верстатах із ЧПК.

**Метою цієї роботи** є дослідження технологічних можливостей універсально-заточувального напівавтомата з ЧПК моделі ВЗ208Ф3 для високошвидкісного фрезерування з використанням інструментів, оснащених надтвердими матеріалами.

**Виклад основного матеріалу.** Універсально-заточувальний напівавтомат з ЧПК моделі ВЗ208Ф3 у базовій комплектації призначений для заточування і доведення циліндричних інструментів по переднім і заднім поверхням, розташованих на периферії і торцю, шліфувальними кругами в умовах дрібносерійного і одиничного виробництва.

Він складається з таких основних частин: станини *1*; столу *2*; каретки з колоною *3*; механізмів поперечної *4*, поздовжньої *5* та вертикальної *6* подачі; шліфувальної бабки *7*; бабки виробу *8*. Керування забезпечується системою ЧПК 2С42, за чотирма координатами (за трьома одночасно). Кінематична схема верстата наведена на рис. 1.

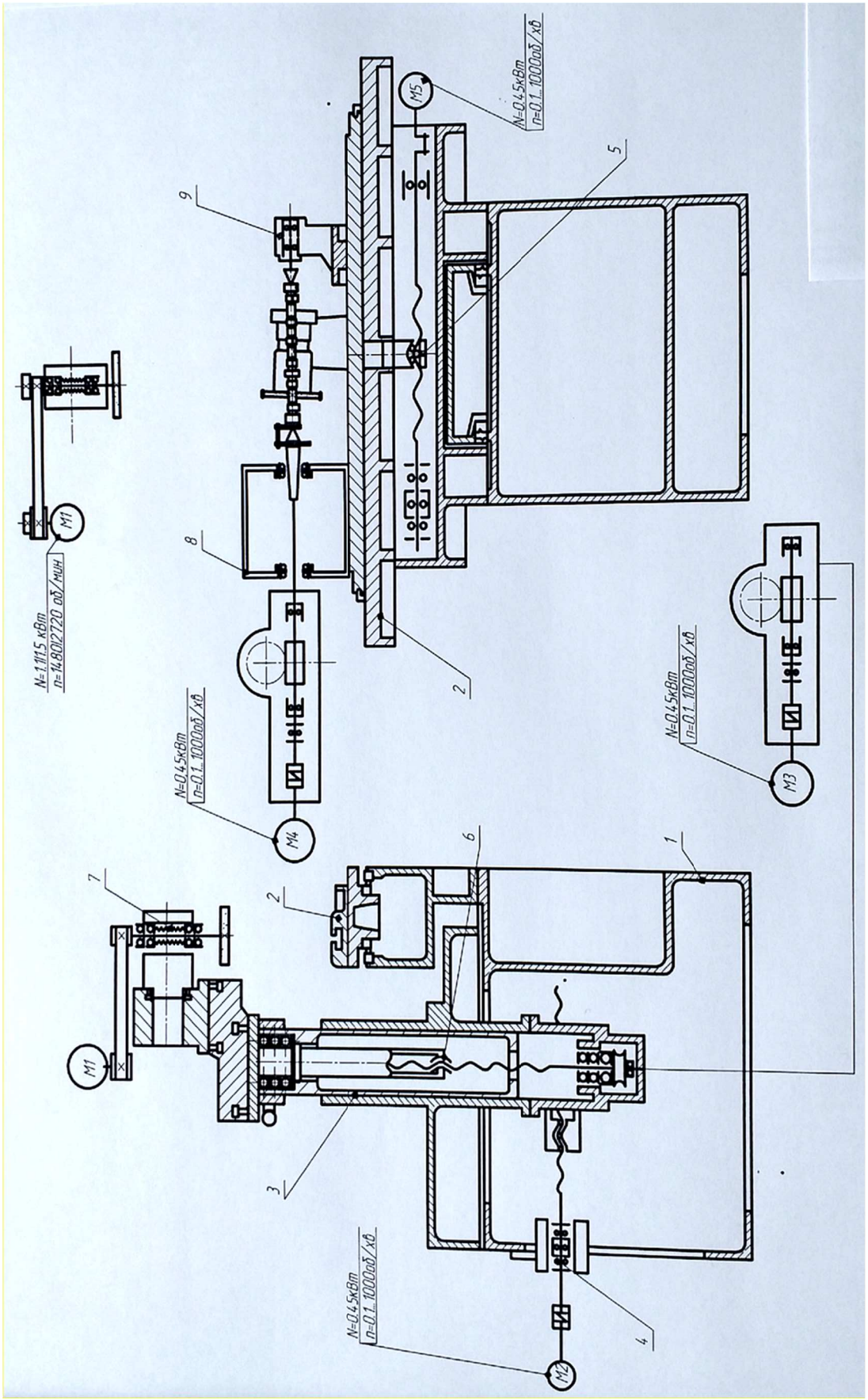



*Рис. 1. Кінематична схема верстата ВЗ 208Ф3*

Конструкція верстата забезпечує такі переміщення робочих органів:

- обертання шліфувального круга;
- вертикальне переміщення шліфувальної головки;
- поперечне переміщення шліфувальної головки;
- поздовжнє переміщення столу;
- обертання виробу.

Обертання шпинделя здійснюється від електродвигуна М1 через поліклинову передачу зі змінними шківами. Вертикальне переміщення шліфувальної бабки – від електродвигуна М3 через черв'ячну передачу на передачу гвинт-гайка *6*. Поперечне переміщення каретки і поздовжнє переміщення столу відбувається завдяки приводам з двигунами М2 і М5, що передають обертання на передачу гвинт-гайка кочення прямо через з'єднувальні муфти. Обертання виробу здійснюється від електродвигуна М4 через черв'ячну передачу.

Випробування верстата на відповідність нормам точності по ТУ2 5544518.112-86 показали наступні результати:

- радіальне биття конічного отвору шліфувального шпинделя – 2 мкм при допуску 3 мкм;
- осьове биття шліфувального шпинделя 2 мкм при допуску 3 мкм;
- неперпендикулярність поперечного переміщення шліфувальної головки поздовжньому переміщенню стола 15 мкм (допуск 20 мкм);
- неперпендикулярність вертикального переміщення шліфувальної головки до робочої поверхні стола в напрямку поздовжнього переміщення стола й поперечного переміщення шліфувальної головки – 15 мкм при допуску 20 мкм;
- одновисотність розташування осі шліфувального шпинделя відносно робочої поверхні стола при повороті шліфувальної головки навколо вертикальної осі 35 мкм при допуску 45 мкм;
- дискретність переміщення за координатами X, Y, Z становить 0,001 мм і кутового переміщення шпинделя виробу – 0,001 град.

Високошвидкісне фрезерування (ВФ) – сучасний високотехнологічний метод обробки, що дозволяє отримувати найменший перетин зрізу металу при використанні високих швидкостей знімання. Сутність цієї технології полягає у використанні певного діапазону швидкостей різального інструменту, що веде до істотного зниження опору матеріалу при його обробці. Особливістю такої технології є те, що тепло, що виділяється при обробці, практично, повністю зосереджено в стружці й не перебуває тривалий час в зоні обробки, через що фреза і деталь, практично, не схильні до термічного впливу.

При звичайній обробці зі збільшенням швидкості різання і зменшенням товщини стружки безперервно підвищується температура оброблюваної заготовки, стружки й інструменту. Але якщо підвищити швидкість подач в 5-10 разів, як це має місце при високошвидкісному фрезеруванні, то температура інструменту підвищується незначно. Причина цього полягає в тому, що швидкість подачі перевищує швидкість теплопровідності оброблюваного різанням основного матеріалу. Фреза «випереджає» поширення тепла. Тим самим тепло, що утворюється в зоні контакту, в основний метал заготовки і фрези переважно не попадає, а основна доля тепла від різання відводиться зі стружкою. Завдяки цьому значно збільшується стійкість інструменту. Дослідження японських фахівців показали, що під час високошвидкісної обробки (ВШ) 75 % тепла відводиться із стружкою, 20 % – через інструмент і 5 % – через оброблювану деталь. Деталь у процесі різання нагрівається незначно, що позитивно впливає на точність обробки. Ця особливість дозволяє використовувати високошвидкісне фрезерування для обробки загартованих конструкційних сталей, не боячись при цьому їх термічного відпуску.

Також з'являється можливість обробляти дюралюмінієві сплави без їх термічного розміцнення. При обробці алюмінієвих сплавів зменшення сил різання має місце при швидкості близько 700 м/хв, а найбільш ефективним є діапазон від 1400 до 1600 м/хв. У деяких випадках швидкість оптимальної обробки може досягати 8000 м/хв і більше.

Істотні переваги можуть бути досягнуті за допомогою високошвидкісного фрезерування виробів з важкооброблюваних матеріалів.

Такі швидкості різання на цьому верстаті можуть бути забезпечені приводом головного руху з двигуном М1, що має дві частоти обертання 1480 і 2720 об/хв, через поліклинову передачу зі змінними шківами.

З появою надтвердих матеріалів (НТМ) можливості високошвидкісної обробки значно розширилися. При порівнянні швидкостей різання фрезами, оснащеними композитом і твердим сплавом очевидна перевага композитів перед твердими сплавами при рекомендованих для композитів перетинах зрізу. Фрезерування чавунів і сталей інструментом із композиту принципово відрізняється від обробки твердосплавними фрезами: при обробці інструментами, оснащеними композитами, швидкість різання сталей в 4-8 разів, а чавунів в 10-30 разів вище; подача на зуб відповідно в 2-5 разів, а сили різання в 2-4 рази менше, питома витрата електроенергії на деталь залишається незмінною, відхилення від площинності й параметр шорсткості обробленої поверхні на 2-4 класи нижчий; відсутній наклеп, продуктивність в 1,5…3 рази вища.

Як різальний інструмент можна запропонувати дискові фрези з різальними елементами із надтвердих матеріалів (рис. 2).

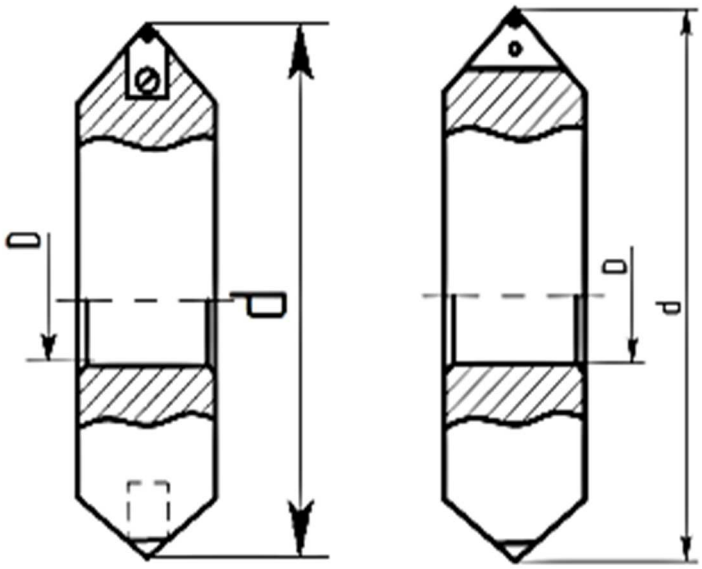



*Рис. 2. Інструмент для швидкісного фрезерування*

Через великий об'єм зрізуваного при високошвидкісному фрезеруванні матеріалу, слід застосовувати фрези з невеликою кількістю зубців, що дозволяє стружці вільно розташовуватися між зубцями. Також бажано застосування фрез і різальних пластин із великими кутами передньої заточки, які створені спеціально для високошвидкісної обробки.

Ефективність фрез, оснащених НТМ на основі алмазу й нітриду бору найбільшою мірою проявляється на багатокоординатних верстатах, оснащених сучасними системами керування, оскільки вони дозволяють реалізувати режими різання, близькі до оптимальних для інструменту з НТМ, і тим самим забезпечити продуктивність обробки, відповідну отриманню найбільшого економічного ефекту та плавний вхід і вихід інструменту на знижених подачах, чим підвищується надійність процесу.

Встановлено, що найбільша техніко-економічна ефективність застосування інструменту з НТМ досягається при його експлуатації в оптимальних умовах, які характеризуються високими швидкістю різання, жорсткістю і вібростійкістю верстата й системи верстат-пристосування-інструмент-заготовка, стабільністю розмірів і фізико-механічних характеристик заготовок. Вимога високих жорсткості й вібростійкості обладнання і всієї системи верстат-пристосування-інструмент-деталь обумовлено не тільки тим, що інструмент з НТМ застосовують здебільшого для виготовлення деталей із високою точністю і низькою шорсткістю, але й дуже істотною залежністю стійкості ріжучого інструменту з НТМ від згаданих характеристик верстата. Велике значення мають жорсткість верстата, рівномірність обертання шпинделя і руху подачі, а також кінематична точність обертання шпинделя. Важливим фактором є не тільки жорсткість самого шпинделя і механізму його кріплення, а й загальна жорсткість верстата. Експериментальні дослідження показали, що при торцевому фрезеруванні жорсткість привода верстата впливає на опір викришування різальних крайок, у той час як загальна жорсткість верстата впливає на знос різальних інструментів. Тому проведемо перевірку напівавтомата ВЗ208 Ф3 на жорсткість.

1. Відносне переміщення фрези, закріпленої на шпинделі шліфувальної головки, і столу під радіальним навантаженням за схемою рис. 3. Відповідно до схеми фреза навантажується силою P = 137 Н, діючою у вертикальній площині під кутом $20^0$ до вертикальної осі фрези. Стіл попередньо закріплюється зведенням упорів. Переміщення фрези вимірюється індикатором годинникового типу з ціною поділки 1 мкм. Навантаження проводиться 3 рази, причому точка прикладення сили P зміщується по колу приблизно на $120^0$. Величина відносного переміщення приймається як середнє арифметичне та складає 14 мкм при допустимому значенні 18 мкм.

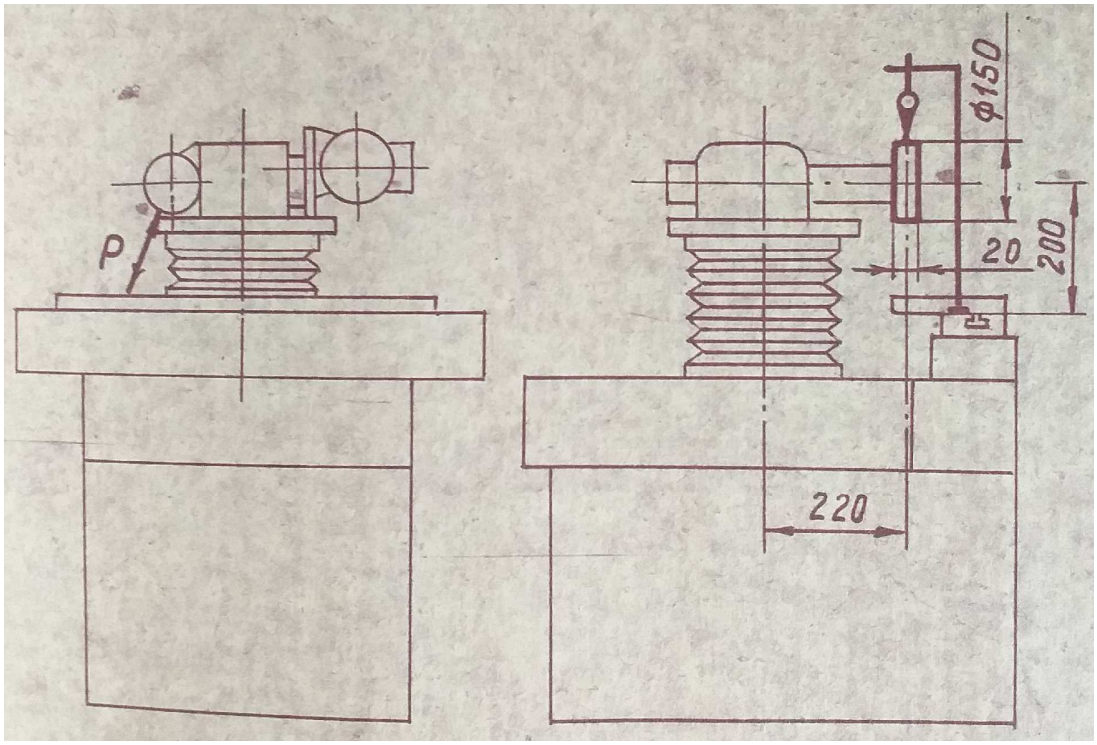



*Рис. 3. Схема перевірки відносного переміщення фрези, закріпленої на шпинделі шліфувальної головки під навантаженням*

2. Відносне переміщення фрези, закріпленої в шпинделі шліфувальної бабки і столу під дією осьового навантаження за схемою рис. 4.

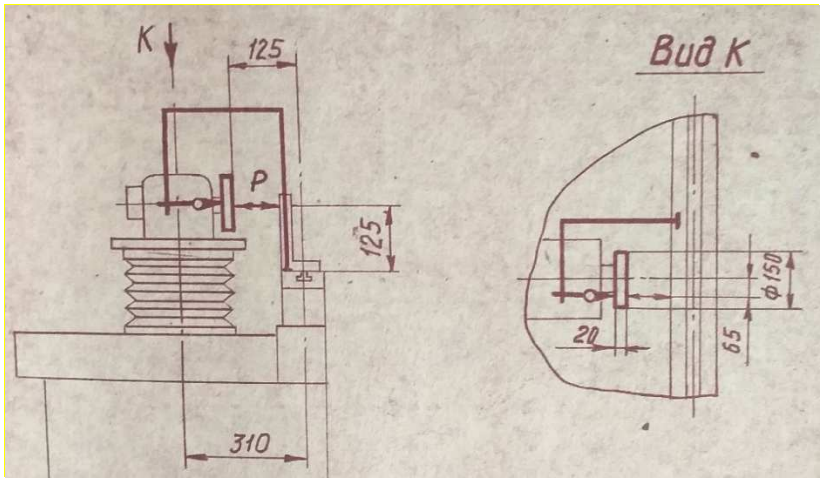



*Рис. 4. Схема перевірки осьового переміщення фрези, закріпленої на шпинделі шліфувальної головки під навантаженням*

Відповідно до схеми (рис. 4) фреза навантажується силою P = 137 Н, діючою у напрямку осі шпинделя на радіусі 65 мм. Стіл попередньо закріплюється зведенням упорів. Переміщення фрези вимірюється індикатором годинникового типу з ціною поділки 1 мкм, закріпленим на столі напівавтомата. Навантаження проводиться 3 рази, причому точка прикладення сили P зміщується по колу приблизно на $120^0$. Величина відносного переміщення приймається як середнє арифметичне та складає 30 мкм при допустимому значенні 35 мкм.

3. Відносне переміщення шпинделя шліфувальної голівки і шпинделя бабки виробу за схемою рис. 5.

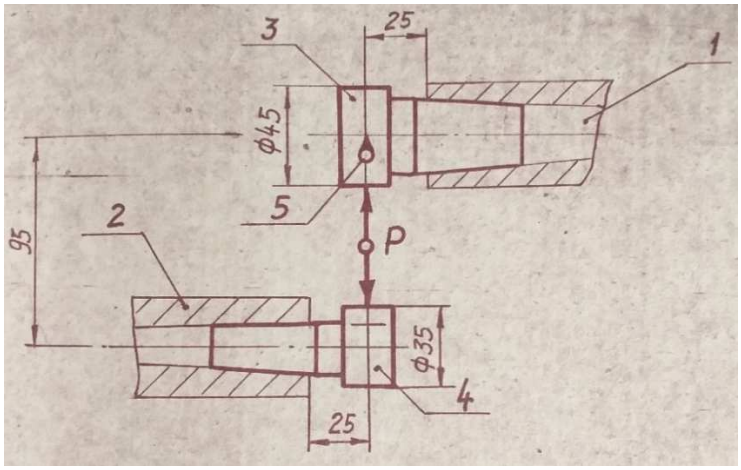



*Рис. 5. Схема перевірки відносного переміщення шпинделя шліфувальної головки і шпинделя бабки виробу*

У конус шпинделя шліфувальної головки *1* замість фрези закріплюється оправка *3*. В отвір шпинделя бабки виробу *2* встановлюють оправку *4* з навантажувальним пристроєм. За допомогою ексцентричної плити шліфувальну бабку зміщують у крайнє ліве положення. Бабку встановлюють на верстаті таким чином, що торець оправки *4* знаходився на відстані 100 мм від центру столу. Стіл, шліфувальна бабка і бабка виробу установлюється в нульове положення і закріплюється. Перед кожним виміром шпиндель шліфувальної головки повертають, а стіл і шліфувальну бабку установлюють так, щоб їх взаємне положення відповідало кресленню. Останнє перед виміром переміщення шліфувальної бабки повинно бути тільки в сторону столу. Між шпинделем шліфувальної бабки і бабки виробу створюється плавно зростаюча до 137 Н сила P, направлена по лінії, що з'єднує шпинделі. Сила P заміряється динамометром. Одночасно в тому ж напрямку за допомо-

гою індикатора годинникового типу вимірюється переміщення шпинделя шліфувальної головки відносно шпинделя бабки виробу. Величина відносного переміщення приймається як середнє арифметичне та складає 40 мкм при допускному значенні 45 мкм.

**Висновки відповідно до статті.** У роботі проведені дослідження точнісних та жорсткісних характеристик універсально-заточувального верстата моделі ВЗ208Ф3 з базовою системою ЧПК 2С42 з метою використання його для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання. Обґрунтовано та запропоновано рішення з переобладнання системи ЧПК сучасною від персонального комп'ютера, окремих вузлів приводу головного руху, використання як інструмента дискових фрез, оснащених різальними пластинами із кубічного нітриду бору.

## Список використаних джерел

1. Левченко Я. К., Маршуба В. П. Умови ефективного застосування високошвидкісної обробки. *Машинобудування.* 2012. № 9. С. 52–60.

2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова, А. В. Якимова: в 10 т. Т. 2. «Теплофизика резания материалов». Одесса: ОНПУ, 2003. 625 с.

3. Новиков Ф. В., Яценко С. М. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов. *13-я Международная научно-техническая конференция «Физические и компьютерные технологи».* Харьков: ХНПК "ФЭД". 2007. С. 8–20.

4. Гречишников В.А., Приходько А.С., Романов В.Б. Фрезы, оснащенные СТМ для обработки тел вращения сложной формы на токарном станке. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2017. № 08. Ч. 2. С. 69–74.

5. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. Москва: Машиностроение. 1976. 178 с.

6. Кауппінен В., Паро Дж. Високошвидкісне фрезерування - кілька прикладів. *Дослідження та розробки в механічній промисловості*: матеріали пленарної доповіді III Міжнародної конференції. Герцег-Нові, Сербія і Чорногорія, 2003. С. 19–23.

7. Жедь В. П., Боровский Г. В., Музыкант Я. А., Ипполитов Г. М. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами и их применение: справочник. Москва: Машиностроение, 1987. 320 с.

## References

1. Levchenko, Ya. K., Marshuba, V. P. (2012). Umovy efektyvnoho zastosuvannya vysokoshvydkisnoyi obrobky [Conditions for effective application of high-speed processing]. *Mashynobuduvannya – Engineering*, 9, 52–60 [in Ukrainian].

2. Novikov, F. V., Yakimov, A. V. (2003). *Fiziko-matematicheskaia teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniia [Physical and mathematical theory of material processing processes and engineering technology]*. (Vol. 2 "Thermophysics of cutting materials"). Odessa: ONPU [in Russian].

3. Novikov, F. V., Yatsenko, S. M. (2007). Povyshenie effektivnosti tekhnologii finishnoi obrabotki detalei par treniia porshnevykh nasosov [Improving the efficiency of the technology of finishing processing of friction pair parts of piston pumps]. Proceeding from *13-ia Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaia konferentsiia «Fizicheskie i kompiuternye tekhnologii» – 13th International Scientific and Technical Conference "Physical and Computer Technologists"* (pp. 8–20). Kharkov: KHNPK "FED" [in Russian].

4. Grechishnikov, V. A., Prikhodko, A. S., Romanov, V. B. (2017). Frezy, osnashchennyye STM dlya obrabotki tel vrashcheniya slozhnoy formy na tokarnom stanke [Milling cutters equipped with STM for machining bodies of revolution of complex shape on a lathe]. *Izvestiia Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of Tula State University. Technical science*, 08 (2), 69–74 [in Russian].

5. Makarov, A. D. (1976). *Optimizatsiia protsessov rezaniia [Optimization of cutting processes]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

6. Kauppinen, V., Paro, Dzh. (2003). Vysokoshvydkisne frezeruvannya – kilka prykladiv [High-speed milling – some examples]. Proceeding from *Doslidzhennya ta rozrobky v mekhanichniy promyslovosti: materialy plenarnoyi dopovidi III mizhnarodnoyi konferentsiyi – Proceedings of the Plenary Report of the Third International Conference* (pp. 19–23). Hertseh-Novi, Serbiia i Chornohoriia [in Ukrainian].

7. Zhed, V. P., Borovskiy, G. V., Muzykant, Ya. A., Ippolitov, G. M. (1987). *Rezhushchiye instrumenty, osnashchennyye sverkhtverdymi i keramicheskimi materialami i ikh primeneniye: spravochnik [Cutting tools equipped with superhard and ceramic materials and their application: a reference book]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

*UDC 621.923.42*

*Vitalii Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Volodymyr Venzhega, Volodymyr Vinnik*

# MODERNIZATION OF THE UNIVERSAL-BINDING MACHINE WITH CHPC VZ208F3 WITH THE PURPOSE OF EXTENSION OF TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES FOR HIGH-SPEED FRESH MACHINE

***Urgency of the research.***. *High-speed milling technology is one of the most up-to-date and effective alternatives to classic machining methods, which is significantly different in quality and speed of machining, as well as the ability to manufacture products from difficult-to-process materials.*

***Target setting.*** *High-speed milling is predominantly implemented using multi-coordinate numerically controlled numerical control (CNC) machines, but a steady cutting process cannot be ensured on existing equipment without upgrading the CNC system, the main movement drive, which would provide the required cutting speed and use of a special tool.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *The main requirements for the CNC system for high-speed machining is its speed, the ability to provide smooth trajectories of the tool for uniform load on it without numerous cuts and outputs. The use of an effective lubricant-cooling medium reduces elastic pressures in the process system with its fixed rigidity.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.***. *The introduction of high-speed milling on CNC machines is constrained by the lack of practical recommendations and requires additional research, in particular the rigidity of the machine.*

***The purpose of the article.*** *Investigate the possibility of modernization of the universal grinding machine of the CNC model VZ208F3 in order to expand its technological capabilities for high-speed milling of the surfaces of rotation by a circular milling cutter equipped with cutting elements from cubic boron nitride.*

***The presentation of the main material.*** *High-speed milling is a state-of-the-art, high-tech machining method that allows you to obtain the smallest cross-section of a metal slice when using high speeds of removal. The essence of this technology is to use a certain range of speeds of the cutting tool, which leads to a significant reduction in the resistance of the material during its processing, which ensures the processing of difficult materials. A feature of this technology is that the heat released during machining is practically completely concentrated in the chips and does not stay in the machining zone for a long time, making the milling cutter and the workpiece virtually unaffected by heat.*

***Conclusions and suggestions.*** *The technological possibilities of the universal sharpening machine from the CNC of the VZ208F3 model with the purpose of its use for high-speed milling of surfaces of rotation by a disk milling cutter, equipped with cutting elements from cubic boron nitride and substantiation of its systems are substantiated.*

***Keywords:*** *high-speed milling; milling cutters made of ultra-hard materials; precision machining; machining performance. Fig.: 5. References: 7.*

**Кальченко Віталій Іванович –** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Kalchenko Vitalii** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head road Transport Industry and Mechanical Engineering Department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** kalchenkovi@ukr.net
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-9850-7875
**ResearcherID:** G-9477-2014

**Кальченко Володимир Віталійович –** доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Kalchenko Volodymyr** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector in scientific and pedagogical work, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** vvkalchenko74@gmail.com
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-9072-2976
**ResearcherID:** G-6752-2014

**Венжега Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Venzhega Volodymyr** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** vivenzhega@gmail.com
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-8857-349X
**ResearcherID:** H-3560-2014

**Винник Володимир Олександрович –** аспірант, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Vinnik Volodymyr** – PhD student, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** itmia@ukr.net

Кальченко В., Кальченко В., Венжега В., Винник В. Модернізація універсально-заточувального верстата з ЧПК В3208Ф3 для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 72-80.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 621.865.8 (045)*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-81-88*

*Олександр Литвин, Сергій Паньков*

# РОБОТИЗОВАНІ МАНІПУЛЯТОРИ ОСОБЛИВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

***Актуальність теми дослідження.*** *Дослідження дистанційно керованих маніпуляційних роботів особливого призначення є досить актуальним на сьогодні, оскільки вони використовуються для виконання робіт у недоступних або небезпечних для здоров'я людини умовах.*

***Постановка проблеми.*** *Вивченню та дослідженню роботизованих маніпуляторів особливого призначення приділено недостатньої уваги. Тому дослідження роботизованих пристроїв особливого призначення дозволить вдосконалити системи з урахуванням їхніх особливостей, що забезпечить більш швидке їх пристосування до виконання робіт у недоступних або небезпечних для здоров'я людини умовах.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Проведений аналіз показав, що науковцями широко досліджуються промислові роботи, водночас вивченню сервісної робототехніки приділено меншої уваги.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Одним з основних недоліків наявних класифікацій є те, що не відокремлюється в окремий підклас робототехніка спеціального призначення, що уможливлює розгляду систем за подібними характеристиками, екстремальним середовищем та умов їх використання.*

***Постановка завдання.*** *Основним завданням на початку розробки нових прототипів роботизованих механізмів є конкретизація параметрів майбутнього робота, відповідно, до сфери та умов його застосування. В цьому безсумнівну допомогу надає їх класифікація.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Представлення класифікації робототехніки спеціального призначення, де основними параметрами є функція роботів, сфера, умови та середовище застосування, а також спеціальні характеристики маніпулятора дозволить вирішити проблему відсутності єдиного термінологічного апарату, в тому числі забезпечить їх поділ на категорії для подальшої диференціації.*

***Висновки відповідно до статті.*** *За результатами проведеного аналізу, буде поставлена концепція по вдосконаленню існуючих чи створенню нових прототипів роботизованих механізмів. Аналіз та диференціація спільних ознак буде в подальшому використана для створення методики синтезу конструктивних елементів роботизованих маніпуляторів особливого призначення.*

***Ключові слова:*** *класифікація; робототехніка; робот-маніпулятор; сервісна робототехніка; екстремальна робототехніка; військова робототехніка.*

*Рис.: 12. Бібл.:12.*

**Актуальність теми дослідження.** Протягом останнього десятиліття спостерігається швидкий темп науково-технічного прогресу, що стимулює розвиток усіх сфер життєдіяльності людини. Так, однією з найбільш перспективних сфер є робототехніка – сучасний каталізатор соціально-індустріального розвитку суспільства. Нині дедалі складніше знайти сферу, яка б не зазнала роботизації. Це, насамперед, пов'язано з розвитком технологій, автоматизацією та оптимізацією процесів діяльності людини.

Бурхливий розвиток робототехніки в останні роки дав початок великій кількості нових роботизованих пристроїв, які застосовуються в різних сферах. Дослідження дистанційно керованих маніпуляційних роботів особливого призначення є досить актуальним на сьогодні, оскільки вони використовуються для виконання робіт у недоступних або небезпечних умовах для здоров'я людини. Саме від таких важливих характеристик робота-маніпулятора, як швидкодія, маневреність, точність позиціонування, можливість роботи в обмежених просторах залежить життя людей.

**Постановка проблеми.** На сьогодні широко досліджуються промислові роботи, які призначені для виконання рухових та керуючих функцій у виробничому процесі. Промислові роботи застосовуються, зазвичай, у межах типових проєктів промислового виробництва. Вивченню та дослідженню роботизованих маніпуляторів особливого призначення приділено менше уваги. Тому дослідження роботизованих пристроїв особливого призначення дозволить вдосконалити системи з урахуванням їхніх особливостей, що забезпечить більш швидке їх пристосування до виконання робіт у недоступних або небезпечних для здоров'я людини умовах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1; 2] авторами обговорено історію, еволюцію розвитку й новітні технології медичної робототехніки, також представлена її класифікація. У статті [3] представлено огляд робототехніки, яка розроблена для застосування в екстремальних середовищах та умовах. Огляд останніх досягнень у

© Литвин О. В., Паньков С. Б., 2020

галузі військової робототехніки та їх класифікація наведені в роботах [4; 5]. У роботі [6] наведено огляд технічних досягнень космічних робототехнічних систем та орбітальних роботів. Наочно представлена космічна робототехніка та їх математичні моделі. У статті [7] розглянуто історію розвитку підводної робототехніки, прогрес підводних навігаційних роботів та методів зондування.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Одним з основних недоліків наявних класифікацій є те, що не відокремлюється в окремий підклас робототехніки спеціального призначення, що унеможливлює розгляд систем за подібними характеристиками, екстремальним середовищем та умовами їх використання. Також відсутній єдиний термінологічний апарат у робототехніці спеціального призначення, оскільки їх вивчають поодинці за сферою використання або в комплексі як промислову або сервісну робототехніку.

**Постановка завдання.** Основним завданням на початку розробки нових прототипів роботизованих механізмів є конкретизація параметрів майбутнього робота, відповідно, до сфери та умов його застосування. У цьому безсумнівну допомогу надає їх класифікація. Представлення класифікації робототехніки спеціального призначення, де основними параметрами є функція роботів, сфера, умови та середовище застосування, а також спеціальні характеристики маніпулятора, дозволить вирішити проблему відсутності єдиного термінологічного апарату, у тому числі забезпечить їх поділ на категорії для подальшої диференціації.

**Виклад основного матеріалу.** Протягом останніх років спостерігається стрімкий розвиток робототехніки, який дав початок великій кількості нових роботизованих пристроїв, яким знайшли застосування в різних сферах (машинобудування, будівництва, побуту, логістична, авіаційна, космічна, медична, військова, екстремальна тощо).

Одним із початкових етапів у складанні класифікації є конкретизація основних термінів (робот, робототехніка), оскільки нині немає основного загальноприйнятого визначення. Основною причиною цього, слугує те, що розуміння робототехніки змінюється в міру розвитку технологій, обростаючи все новим сенсом.

Так, одним із компромісним визначенням терміна «робот» можна вважати його трактування Міжнародної федерації робототехніки (International Federation of Robotics, далі - IFR): «Робот – це робочий механізм, програмований по декількох осях із деяким ступенем автономності (варіюється від часткової автономії – включаючи взаємодію «людина-оператор – робот», до повної автономії – без активного втручання людини) та здатний пересуватися в межах певного середовища, виконуючи поставлені завдання» [8].

У цьому визначенні враховуються особливості роботів, що відрізняють їх від інших механічних пристроїв, – автономність і самостійне виконання поставленого завдання. Робот здатний самостійно рухатися в середовищі й адаптуватися під поставлені завдання.

Проаналізувавши різні підходи, запропонуємо власне трактування цієї термінології: робототехніка – напрям науки та техніки, який пов’язаний із розробкою і експлуатацією автоматизованих технічних систем (роботів). Основним об’єктом вивчення є робот – автоматичний пристрій, що призначений для виконання спеціалізованих операцій та відтворення рухових та інтелектуальних функцій людини.

Традиційний підхід IFR поділяє робототехніку на два класи: промислова робототехніка (використовується з метою промислової автоматизації) та сервісна (використовується для виконання необхідної для людини (обладнання) роботи). Оскільки об’єктом нашого дослідження є робототехніка спеціального призначення, яка відноситься безпосередньо до сервісної робототехніки, то детальніше зупинимось на класифікації саме неї.

Можна використовувати декілька підходів до класифікації роботів (за класом, сферою та середовищем використання, видом, призначенням, способом пересування тощо). Перші відмінності можна зробити на основі механічної будови роботів. Їх можна поділи-

ти на нерухомих роботів, тобто маніпуляторів, мобільних та комбінованих. Останні два класи використовують для пересування рухоме шасі з автоматично керованими приводами. За способом пересування їх розрізняють: колісні, крокуючі, гусеничні, летючі, повзучі та плавучі. За видом поділяють на автоматичні, біотехнічні, інтерактивні.

За робочим середовищем поділяють на виробничу та вдосконалену. Виробнича робототехніка розташована в структурованому середовищі, геометричні чи фізичні характеристики якого здебільшого відомі, вдосконалена – розташована в неструктурованому середовищі, характеристики якого невідомі. Вона, у свою чергу, поділяється на природну (середовище не є безпечним) та службову (застосовується для покращення якості життя). Детальніша класифікація представлена на рис. 1.

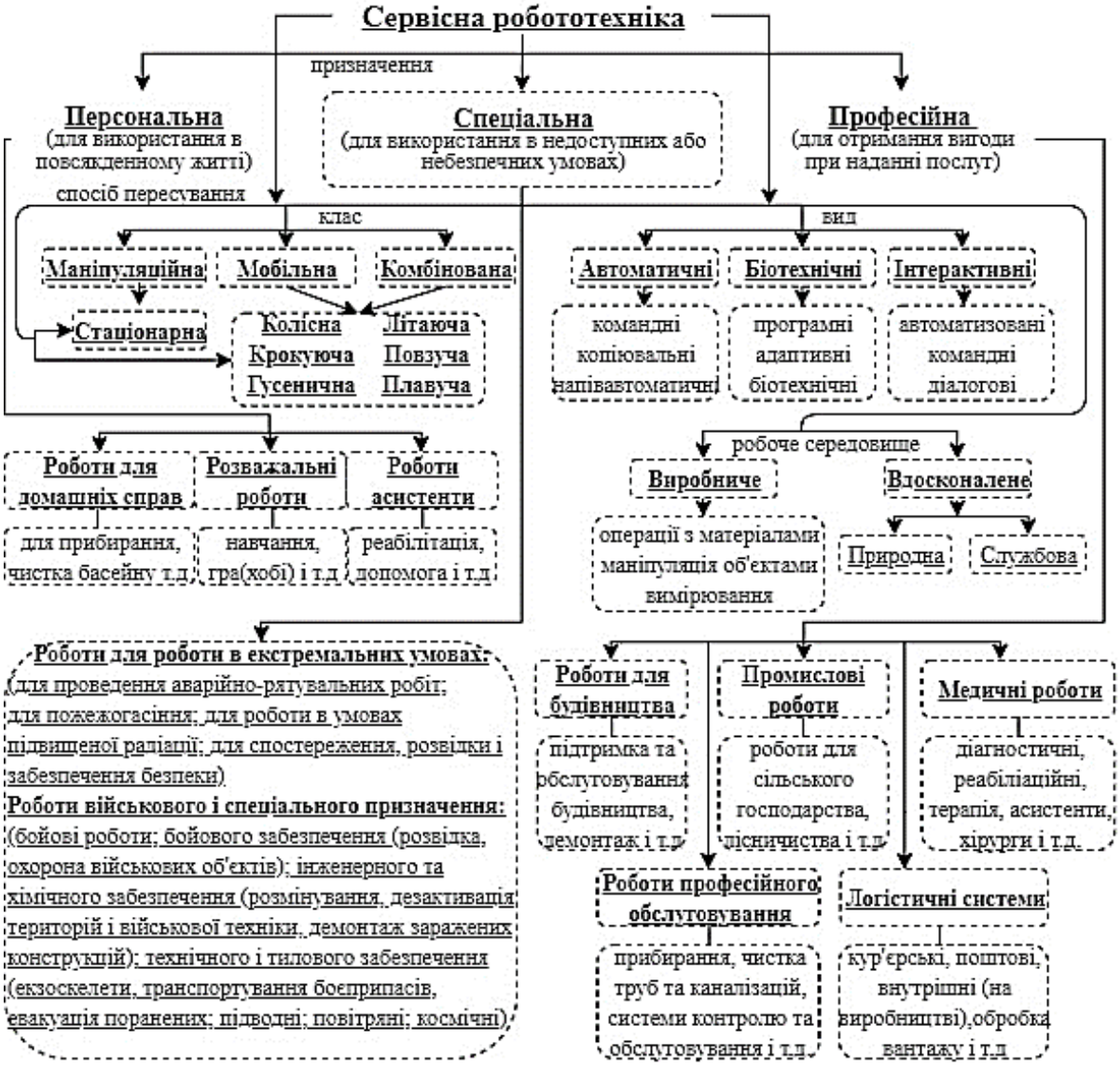



*Рис. 1. Класифікація сервісної робототехніки*

Більш детально представимо спеціальні роботизовані маніпулятори, які призначені для виконання своїх функцій у небезпечних умовах та середовищах.

Умовно їх поділимо за специфікою роботи на такі групи:

1. Роботизовані маніпулятори для використання під час проведення операцій у зоні дії рентгенівського випромінювання (при комп'ютерній томографії, ангіографії і т. ін.) (рис. 2) та/або які потребують високоточних маніпуляцій із неймовірною точністю (рис. 3).

*Рис. 2. Роботизована система для внутрішньошкірного коронарного втручання «CorPath GRX»*

*Рис. 3. Роботизована хірургічна система-маніпулятор «Da Vinci»*

2. Роботизовані маніпулятори для використання під час пошуку мін та розмінування (рис. 4-5), підводно-технічних операцій на великих глибинах (рис. 6) та у космосі (рис. 7).

*Рис. 4. Робот для пошуку мін та розмінування «Talon GEN IV»*

*Рис. 5. Робот для пошуку мін та розмінування «Caliber MK3»*

*Рис. 6. Робот для підводно-технічних операцій «Ageotec Sirio»*

*Рис. 7. Гнучкий маніпулятор спеціального призначення «Dextre»*

3. При роботі з радіоактивними речовинами великої активності, у тому числі й операцій з обслуговування та ремонту атомних енергетичних установок застосовують автоматизоване роботизоване устаткування із системою дистанційного керування (рис. 8-9).

*Рис. 8. Робот-павук для видалення та сортування радіоактивних матеріалів «Latro»*

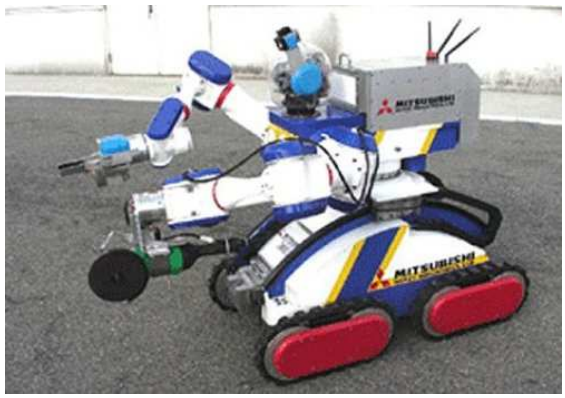


*Рис. 9. Робот спеціального призначення для роботи на атомних станціях «MHI-MEISTeR»*

4. Роботизовані комплекси пожежогасіння використовуються для гасіння пожеж у небезпечних для життя умовах та важкодоступних районах (рис. 10-11).

*Рис. 10. Багатофункціональний пожежний робот «MVF-5»*

*Рис. 11. Пожежний робот «COLOSSUS»*

У разі виникнення техногенних аварій у зонах підвищеного ризику, зумовлених наявністю радіації, хімічної або біологічної зараженості місцевості, необхідно максимально скоротити безпосереднє знаходження людей у небезпечних зонах, виключивши при цьому можливість їх ураження. Для цього використовують роботизовані маніпулятори.

Саме екстремальні середовища, з їх недетермінованими умовами роботи та різноманітністю операцій, зумовлюють проведення інтенсивних дій зі створення і вдосконалення маніпуляційних пристроїв, керованих людиною-оператором. Це пояснюється тим, що в подібних середовищах здебільшого виконуються складні нетипові операції дослідного, монтажно-складального або ремонтного характеру. Використання сучасних засобів автоматичного управління маніпуляційними механізмами, в умовах підвищеного ризику, вимагає стійких характеристик апаратури спостереження, аналізу ситуації, прийняття рішення і формування керуючих впливів.

На цьому етапі розвитку сервісної робототехніки на ринку представлена велика кількість їх різновидів. Швидкий розвиток та поширення сфер застосування викликає великий інтерес, що породжує попит на цей клас робототехніки.

Так, за даними IFR, темп зростання професійної сервісної робототехніки в 2017 році збільшився на 85 %, що кратно перевищило темпи зростання промислової робототехніки (31 %) і світового ВВП (3,7 %). Таким чином, за результатами 2017 року в усьому світі було продано 109 500 сервісних роботів. За оцінками експертів, у 2018 році було продано на 50 % роботів більше, ніж у 2017 році. У результаті обсяг

ринку до 2018 року вже досяг 8,7 млрд дол. За прогнозами експертів, з 2019 по 2021 рр. продажу професійних сервісних роботів щорічно будуть збільшуватися в середньому на 21 % (рис. 12) [10].

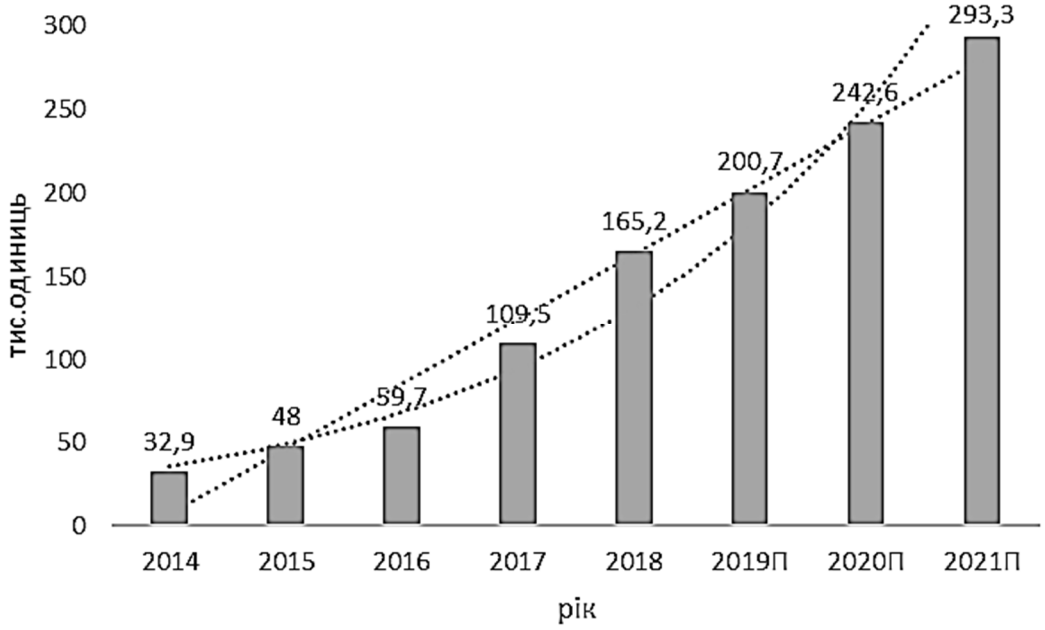



*Рис. 12. Динаміка продажу професійної сервісної робототехніки в 2014–2017 рр. та прогноз (П) на 2019–2021 рр.*

**Висновки відповідно до статті.** Представлений аналіз роботизованих маніпуляторів спеціального призначення та класифікація сервісної робототехніки дозволять узагальнити сучасні уявлення про можливості та сфери їх застосування в наші дні. З проведеного аналізу можемо спостерігати як робототехніка проникла й успішно використовується в різних сферах життєдіяльності людини. При всьому цьому, робототехніка все ще залишається дуже перспективною та швидкорозвиваючою наукою.

За результатами проведеного аналізу та згідно з розробленою класифікацією буде поставлена концепція щодо вдосконалення наявних чи створення нових прототипів роботизованих механізмів. Аналіз та диференціація спільних ознак буде в подальшому використана для створення методики синтезу конструктивних елементів роботизованих маніпуляторів особливого призначення або оптимізації існуючих [11] на основі нових технологій із використанням машинного навчання [12].

**Список використаних джерел**

1. Kasina H., Bahubalendruni M. R., & Botcha R. Robots in medicine: past, present and future. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering (IJMMME)*. 2017. Vol. 7(4). P. 44-64. DOI: 10.4018/IJMMME.2017100104.

2. Краевский С. В., Рогаткин Д. А. Медицинская робототехника: первые шаги медицинских роботов. *Технологии живых систем.* 2010. Т. 7, № 4. С. 3-14.

3. Wong C., Yang E., Yan X., & Gu D. Autonomous robots for harsh environments: a holistic overview of current solutions and ongoing challenges. *Syst. Sci. Control Eng.* 2018. Vol. 6. P. 213–219. DOI: 10.1080/21642583.2018.1477634.

4. Sapaty P. Military robotics: latest trends and spatial grasp solutions. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*. 2015. Vol. 4(4). P. 9-18. DOI: 10.14569/IJARAI.2015.040402.

5. Кучеров Д. П., Копилова З. М., Мякухін Ю. В. Перспективи розвитку роботизованих систем військового призначення. *Системи озброєння і військова техніка*. 2007. № 1. С. 44-46.

6. Yoshida K., Wilcox B., Hirzinger G., & Lampariello R. Space Robotics. *Springer Handbook of Robotics*. 2016. P. 1423–1462. DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_55.

7. Chutia S., Kakoty N. M., & Deka D. A Review of Underwater Robotics, Navigation, Sensing Techniques and Applications. *Proceedings of the Advances in Robotics on – AIR '17*. 2017. DOI: 10.1145/3132446.3134872.

8. Service Robots. *International Federation of Robotics*. URL: https://www.ifr.org/service-robots.

9. *World Robotics 2017. International Federation of Robotics*. URL: https://ifr.org/downloads/press/WR_Industrial_Robots_2017_Chapter_1.pdf.

10. World Robotics. *International Federation of Robotics*. URL: https://ifr.org/worldrobotics.

11. Литвин О. В., Ящук І. Р., Паньков С. Б. Аналіз передумов застосування нейронних мереж при синтезі конструкцій в машинобудуванні. *Наукові нотатки.* 2018. № 64. С. 92-98.

12. Ящук И. Р., Паньков С. Б. Оптимизация процесса синтеза новых технических решений в машиностроении. *Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления*: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апреля 2019 г. Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. С. 65-68.

## References

1. Kasina, H., Bahubalendruni, M. R., & Botcha, R. (2017). Robots in medicine: past, present and future. *International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering (IJMMME)*, *7*(4), 44-64. DOI: 10.4018/IJMMME.2017100104.

2. Kraevskij, S. V., & Rogatkin, D. A. (2010). Mediczinskaya robototekhnika: pervy`e shagi mediczinskikh robotov [Medical robotics: the first steps of medical robots]. *Tekhnologii zhivy`kh system - Journal Technologies of Living Systems,* 7(4), 3-14 [in Russian].

3. Wong, C., Yang, E., Yan, X., & Gu, D. (2018). Autonomous robots for harsh environments: a holistic overview of current solutions and ongoing challenges. *Syst. Sci. Control Eng.* 6, 213–219. DOI: 10.1080/21642583.2018.1477634.

4. Sapaty, P. (2015). Military robotics: latest trends and spatial grasp solutions. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, *4*(4), 9-18. doi:10.14569/IJARAI.2015.040402.

5. Kucherov, D. P., Kopylova, Z. M., & Miakukhin, Yu. V. (2007). Perspektyvy rozvytku robotyzovanykh system viiskovoho pryznachennia [Prospects of development of militaries robotic systems]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika - Systems of Arms and Military Equipment,* (1), 44-46 [in Ukrainian].

6. Yoshida, K., Wilcox, B., Hirzinger, G., & Lampariello, R. (2016). Space Robotics. *Springer Handbook of Robotics, 1423–1462.* DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1_55.

7. Chutia, S., Kakoty, N. M., & Deka, D. (2017). A Review of Underwater Robotics, Navigation, Sensing Techniques and Applications. *Proceedings of the Advances in Robotics on – AIR '17*. DOI: 10.1145/3132446.3134872.

8. International Federation of Robotics (2015). *Service Robots*. Retrieved from https://www.ifr.org/service-robots/.

9. International Federation of Robotics (2017). *World Robotics 2017.* Retrieved from https://ifr.org/downloads/press/WR_Industrial_Robots_2017_Chapter_1.pdf.

10. International Federation of Robotics (2018). *World Robotics 2018.* Retrieved from https://ifr.org/worldrobotics/.

11. Lytvyn, O. V., Yashchuk, I. R., & Pankov, S. B. (2018). Analiz peredumov zastosuvannia neironnykh merezh pry syntezi konstruktsii v mashynobuduvanni [Analysis of the background of the application of neural networks in the design synthesis in mechanical engineering]. *Naukovi notatky – Scientific notes,* (64), 92-98 [in Ukrainian].

12. Yashhuk, I. R., Pankov, S. B. (2019). Optimizatsiia protsessa sinteza novykh tekhnicheskikh reshenii v mashinostroenii [Optimization of the synthesis of new technical solutions in mechanical engineering]. Proceeding from *Issledovaniia i razrabotki v oblasti mashinostroeniia energetiki i upravleniia: materialy XIX Mezhdunar nauch.-tekhn. konf. studentov aspirantov i molodykh uchenykh – Research and development in the field of engineering, energy and management: materials of the XIX Intern. scientific and technical conf. students, graduate students and young scientists* (Gomel, April 25–26) (pp. 65-68). Gomel: GSTU named after P. O. Sukhoi [in Russian].

*UDC 621.865.8 (045)*

*Oleksandr Litvin, Serhii Pankov*

# ROBOTIC MANIPULATORS SPECIAL PURPOSE

***Urgency of the research.*** *Research on robotic manipulators with remote control is especially important today because they are used to perform work in difficult or dangerous conditions for human health.*

***Target setting.*** *The study and research of robotic manipulators for special purposes are given less attention. Therefore, the study of robotic special-purpose devices will allow them to improve the systems taking into account their features, which will allow them to adapt more quickly to the performance of work in inaccessible or dangerous conditions for human health.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *The analysis showed that scientists are widely researching industrial robots, at the same time, less attention is paid to the study of service robotics.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *One of the main disadvantages of the existing classifications is that it is not separated into a separate subclass of special purpose robotics, which makes it impossible to consider systems by similar characteristics, extreme environment, and conditions of their use.*

***The research objective.*** *The main task at the beginning of the development of new prototypes of robotic mechanisms is to specify the parameters of the future robot, according to the scope and conditions of its application. This is clearly helped by their classification.*

***The statement of basic materials.*** *The introduction of the classification of special-purpose robotics, where the main parameters are the function of the robots, the area, conditions and environment of application, as well as the special characteristics of the manipulator, will solve the problem of the lack of a single terminological apparatus, including ensuring their division into categories for further differentiation.*

***Conclusions.*** *Based on the results of the analysis, a concept will be put forward to improve existing or create new prototypes of robotic mechanisms. Analysis and differentiation of joint features will be further used to create methods for the synthesis of structural elements of robotic manipulators for special purposes.*

***Keywords:*** *classification; robotics; robot manipulator; service robotics; extreme robotics; military robotics.*

*Fig.:12. References: 12.*

**Литвин Олександр Валеріанович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання верстатів і машин, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Litvin Oleksandr** – PhD in Technical science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Design of Machine Tools and Machines, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** litvinkpi@gmail.com

**SCOPUS Author ID:** 57210737943.

**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0137-9177

**Паньков Сергій Борисович** – аспірант кафедри конструювання верстатів і машин, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Pankov Serhii** – PhD Student of Department of Design of Machine Tools and Machines, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

Литвин О., Паньков С. Роботизовані маніпулятори особливого призначення. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 81-88.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 658.512.8*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-89-97*

*Наталія Стельмах, Сергій Сапон, Ярослав Рижук*

# ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НА БАЗІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ОЦІНКИ ЙОГО ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

***Актуальність теми дослідження***. *Технологічне підготовлення виробництва є важливим етапом, оскільки саме на ньому розробляється технологічний процес (ТП) виготовлення деталі, від якого залежать техніко-економічні показники, які визначають конкурентоспроможність деталі на ринку продукції.*

***Постановка проблеми.*** *Час, який витрачається багатьма вітчизняними підприємствами на розрахунок техніко-економічних показників технологічного процесу виготовлення деталі, сьогодні є досить значним, що суттєво сповільнює технологічне підготовлення виробництва. У сучасних умовах швидкості навколишніх змін, перетворень та конкуренції на ринку це недопустимо.*

***Аналіз досліджень і публікацій***. *Нині є значна кількість програмного забезпечення для розрахунку техніко-економічних показників ТП виготовлення деталей. Кожна програма має свої переваги і недоліки.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми***. *Важливим елементом програмного забезпечення для розрахунку техніко-економічних показників ТП виготовлення деталей має бути можливість оперативного розрахунку оптимального ТП за показниками, які є найбільш важливими в конкретних виробничих умовах. Тобто має бути можливість вибору параметра оптимізації.*

***Метою статті*** *є удосконалення методу розрахунку вартості та часу виготовлення деталі залежно від типу виробництва.*

***Виклад основного матеріалу.*** *На прикладі конкретної деталі, продемонстровано можливості програмного забезпечення «Auto_price» для розрахунку вартості деталі, залежно від типу виробництва і структури технологічного процесу. Вибрано оптимальне рішення, враховуючи вартість та час виготовлення, зважаючи на ваговий коефіцієнт, який було обрано за допомогою експертної оцінки.*

***Висновки відповідно до статті.*** *У роботі було удосконалено метод розрахунку вартості та часу виготовлення деталі залежно від типу виробництва, що дозволило отримати оптимальний технологічний процес з урахуванням техніко-економічних показників та реалізувати цей метод програмно.*

***Ключові слова:*** *приладобудування; вартість виготовлення; час виготовлення; оптимальний технологічний процес; тип виробництва.*

*Рис.: 7. Бібл.: 5.*

**Актуальність теми дослідження.** У приладобудуванні важливим етапом виготовлення деталі є технологічне підготовлення виробництва, оскільки саме на цьому етапі розробляється технологічний процес (ТП) виготовлення деталі, виконуються розрахунки вартості та часу, виготовлення заданої партії деталей. Від того, наскільки ефективно побудовано ТП, залежать техніко-економічні показники виготовлення деталі, які є ключовими факторами конкурентоспроможності на ринку продукції.

**Постановка проблеми.** Час, який витрачається багатьма вітчизняними підприємствами на розрахунок техніко-економічних показників технологічного процесу виготовлення деталі, на сьогодні є досить значним, що суттєво сповільнює технологічне підготовлення виробництва. Це можна пояснити використанням застарілих методик та підходів для подібних розрахунків. Проте в сучасних умовах швидкості навколишніх змін, перетворень та конкуренції на ринку це недопустимо.

Деякі підприємства використовують програми, що виконують розрахунок в досить спрощеному варіанті для розрахунку вартості, але недоліком таких програм є те, що кількість параметрів, які використовуються для розрахунку, зазвичай обмежується габаритними розмірами. Такі розрахунки мають низьку точність, тому можна отримати достатньо приблизне уявлення про вартість виготовлення деталі, що не завжди задовольняє замовника. З іншого боку, занадто велика ціна буде не конкурентоспроможною, а недостатня вартість загрожує збитками для підприємства.

Отже, питання автоматизації розрахунку вартості та часу виготовлення виробу є актуальним науково-прикладним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню продуктивності виробництва, зменшенню часу на розрахунки та, як наслідок, підвищенню конкурентоспроможності продукції приладобудівної промисловості [1].

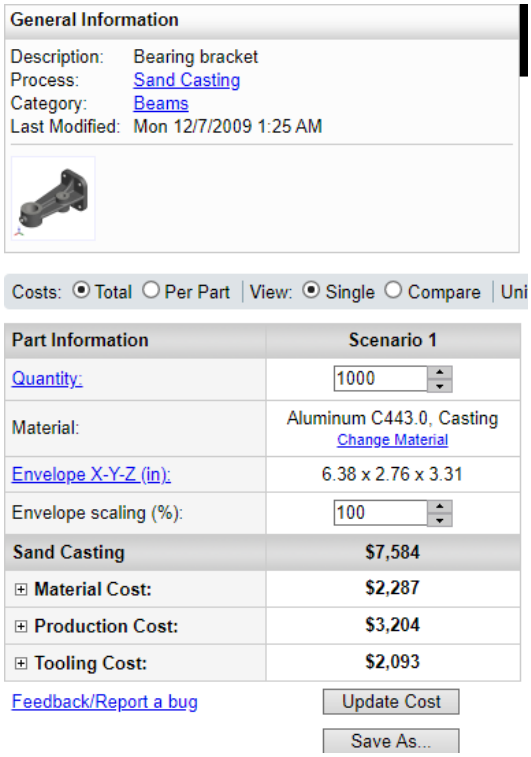
© Стельмах Н. В., Сапон С. П., Рижук Я. О., 2020

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні чимало вітчизняних підприємств використовують для розрахунку вартості виготовлення партії деталей функціональні можливості табличного процесора «Microsoft Excel», що є досить трудомістким процесом та не завжди дає змогу отримати досить точний результат.

На іноземних виробництвах використовуються більш складні спеціалізовані програми для розрахунку вартості виготовлення деталей. Розглянемо приклад розрахунку вартості виготовлення в програмному середовищі «Custom partner» [2]. Для прикладу розрахунку візьмемо деталь типу «кронштейн», яку зображено на рис. 1, *а*.

На рис. 1, *б* представлено інтерфейс програмного забезпечення «Custom partner», де зображено робочий проєкт розрахунку собівартості виготовлення деталі «кронштейн». Розрахункова величина партії деталей 1000 штук.

*а*




*б*

*Рис. 1. Тривимірна модель (а) та приклад розрахунку (б) вартості виготовлення кронштейна підшипника*

Перевагою такого програмного забезпечення є те, що замовник може бачити, як зміниться вартість залежно від партії деталей та як саме формується ціна на виріб, враховуючи вартість матеріалу, вартість виробництва, вартість інструменту. Недоліком такої програми є те, що не вказується час, який необхідний на виготовлення партії деталей, а це важливий конкурентний параметр, який може впливати на вибір замовником того чи іншого виробника деталей. Немає можливості вибрати оптимальний варіант ТП за часом виробництва та вартістю виготовлення.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Важливим елементом програмного забезпечення для розрахунку техніко-економічних показників ТП виготовлення деталей має бути можливість оперативного розрахунку оптимального ТП за показниками, які є найбільш важливими в конкретних виробничих умовах. Тобто має бути можливість вибору параметра оптимізації.

**Метою статті** є удосконалення методу розрахунку вартості та часу виготовлення деталі залежно від типу виробництва.

**Виклад основного матеріалу.** Собівартість продукції – це грошовий еквівалент витрат підприємства на виробництво й реалізацію продукції, що також характеризує ефективність всього процесу виробництва на підприємстві, оскільки в ній відображаються: рівень організації виробничого процесу, технічний рівень виробничих можливостей підприємства, продуктивність праці та інше [3].

Собівартість продукції як показник використовується для контролю за використанням ресурсів виробництва, визначення економічної ефективності організаційно-технічних заходів, встановлення цін на продукцію.

Уцій роботі для розрахунку вартості виготовлення деталі, будемо використовувати такі параметри:

- витрати на амортизацію обладнання;
- енергетичні витрати;
- витрати на оплату праці;
- витрати на оренду/амортизацію приміщення;
- накладні витрати.

Також необхідно визначити час роботи обладнання для кожного переходу ТП, прибуток підприємства та партію деталей [3].

З урахуванням вищезазначеного, для визначення вартості 1-го переходу ТП виготовлення деталі запропоновано таку залежність:

$$Q = \frac{\left(\frac{1}{D}\left(\frac{V*V1*V2}{P*T}+ZK1*\left(1+\frac{1}{K2}+\frac{1}{K3}\right)\right)+E*S\right)*Tr*M}{N}, \text{ грн} \quad (1)$$

де $D$ – кількість робочих годин на добу; $V$ – вартість обладнання, грн; $V_1$ – витрати на обслуговування верстата, грн; $V_2$ – витрати на інструмент, грн; $P$ – кількість робочих днів на рік; $T$ – термін амортизації; $Z$ – заробітна плата робітника за 1 зміну, грн; $K_1$, $K_2$, $K_3$ – вагові коефіцієнти; $E$ – тариф за електроенергію; $S$ – споживча потужність обладнання; $Tr$ – час роботи обладнання; $M$ – прибуток підприємства.

Використовуючи цю формулу можна розрахувати вартість кожного переходу технологічного процесу.

На базі запропонованої залежності (1) для визначення вартості технологічного процесу було розроблено програмне забезпечення «Auto_price» для розрахунку вартості та часу виготовлення деталі при різних типах виробництва [4].

Вартість виготовлення деталі в кожному окремому переході ТП визначається за допомогою формули (1).

Програма «Auto_price» написана мовою програмування Delphi XE8. Ядро середовища розробки Delphi складають програмні бібліотеки, що містять багатий базовий функціонал. Під час розробки програмного забезпечення «Auto_price» зокрема використовувалися можливості бібліотеки «VisualComponentLibrary». VCL- бібліотека елементів керування (контролів, віджетів), невізуальних компонентів і допоміжних класів Delphi для розробки Windows-додатків.

Для роботи з програмою необхідно таке технічне забезпечення: персональний комп'ютер зі встановленим програмним забезпеченням Windows 7, 8, 10 або MacOS, клавіатура, комп'ютерна миша або тачпад, не менш ніж 1 ГБ оперативної пам'яті. Об'єм пам'яті, необхідний для зберігання програми на жорсткому диску, не менш ніж 3,05 МБ.

Виконання розрахунку вартості та часу виготовлення здійснюється при дотриманні такого алгоритму дій. Спочатку необхідно запустити файл «Auto_price.exe», який знаходиться в папці проєкту, щоб відкрити файл, необхідно двічі натиснути лівою кнопкою миші на нього, або натиснути лівою кнопкою миші на файл та нажати клавішу «Enter», після чого відкриється діалогове вікно рис. 2.

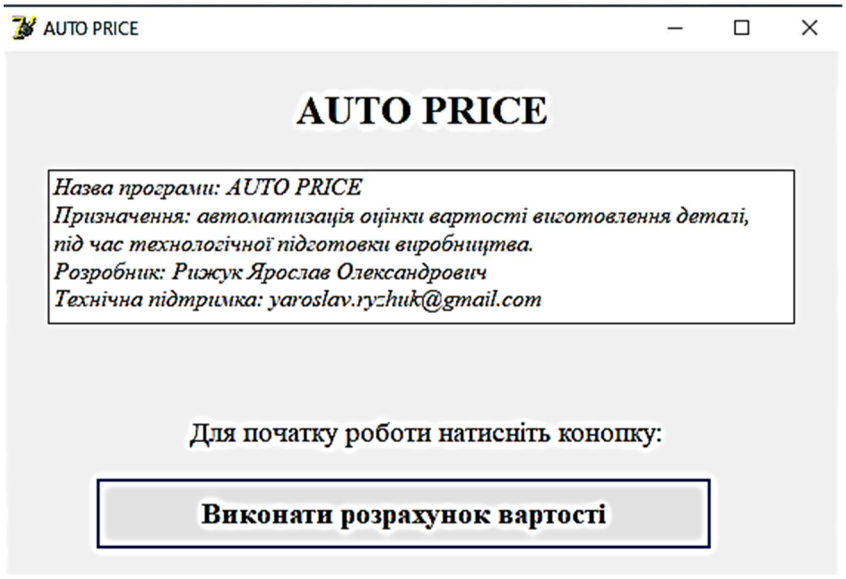



*Рис. 2. Стартове вікно програми «Auto_price»*

Як контрольний приклад було обрано деталь «корпус шасі», яка являє собою корпусну деталь, виготовлену з алюмінієвого сплаву АЛ2Д ГОСТ 1583-93. Габаритні розміри деталі: довжина – 50 мм, висота – 61 мм, ширина – 32,5 мм. На рис. 3 наведено 3-D зображення обраної деталі.

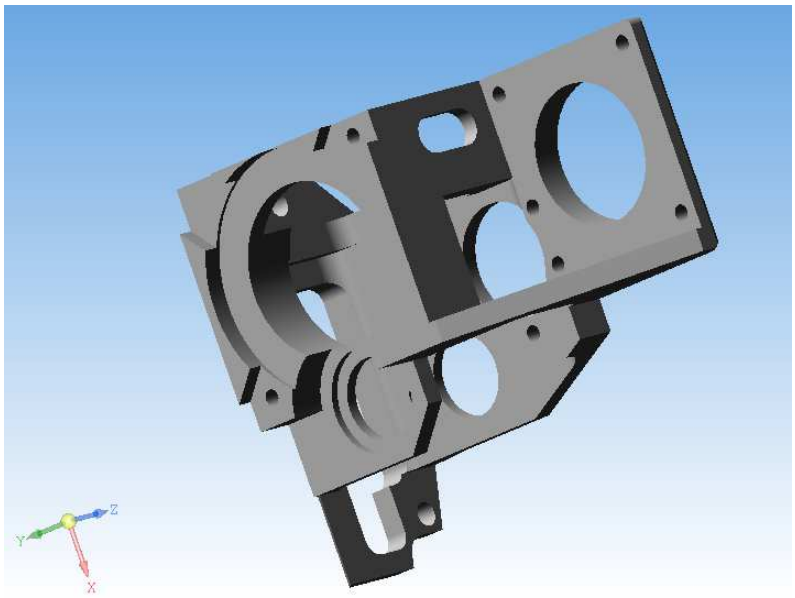


*Рис. 3. Корпус шасі*

Для цієї деталі було спроєктовано 6 різних технологічних процесів виготовлення, по два для одиничного, серійного та масового виробництв. Усі 6 технологічних процесів були внесенні до ПЗ «Auto_price» для подальшого їх аналізу й вибору оптимального варіанта технологічного процесу.

Отже, для того щоб перейти у вікно введення початкових даних ПЗ «Auto_price», необхідно натиснути лівою кнопкою миші, на кнопку ***«Виконати розрахунок вартості»*** , після чого відкривається наступне вікно програми для розрахунку вартості та часу виготовлення деталі. Зазначене вікно містить порожні поля, куди необхідно ввести дані. Для того щоб ввести початкові дані в програму, нам необхідно спочатку натиснути на кнопку ***«Читати початкові дані з файла»*** програма запропонує нам вибрати необхідний файл формату .dat. У цьому файлі повинні бути записані параметри, необхідні

для розрахунку програми, а саме: вартість верстата, кількість робочих годин на добу, кількість робочих днів на рік, витати на обслуговування, термін окупності верстата, витрати на інструмент, споживча потужність станка, тариф за електроенергію, зарплата робітника за 1 зміну, вагові коефіцієнти, час роботи верстата, прибуток, партія деталей. Це програмне рішення було зроблено з метою скорочення часу при повторному розрахунку цього ТП, оскільки файл із даними можна використовувати необмежену кількість разів, і не потрібно заново вводити початкові дані.

Після того як було введено початкові дані, необхідно завантажити в програму ТП виготовлення деталі у форматі XXX-Y, де XXX – це номер операції, Y – номер переходу. Для того щоб завантажити ТП, необхідно натиснути на клавішу ***«Читати тех. процес з файла»***, далі програма запропонує вибрати файл у форматі .dat, після вибору необхідного файла він буде автоматично завантажений та представлений у діалоговому вікні, також буде пораховано кількість переходів, які є в ТП.

Щоб отримати результат розрахунку, необхідно натиснути на кнопку ***«Розрахувати»***, після чого відбудеться автоматичний процес розрахунку вартості та часу виготовлення деталі, результат розрахунку представлено на рис. 4.

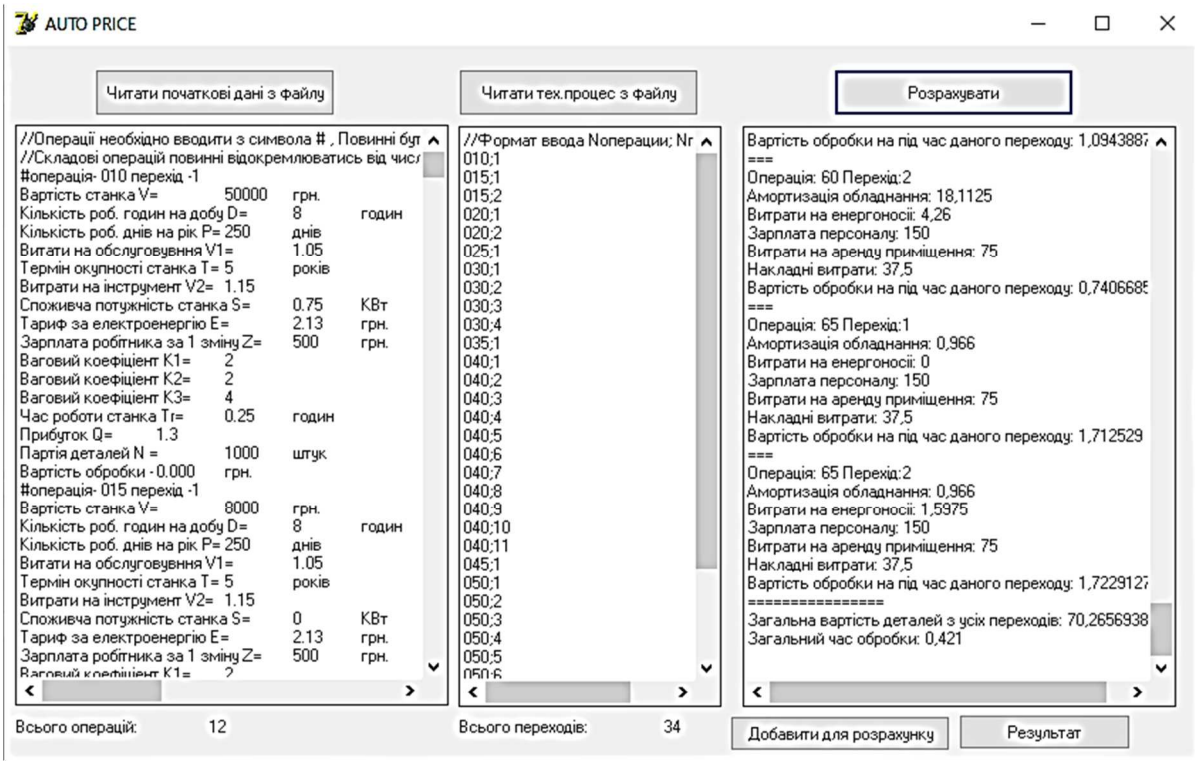



*Рис. 4. Приклад розрахунку вартості та часу виготовлення деталі типу «корпус шасі»*

Результат розрахунку представлено детально, розраховано не тільки вартість кожного окремого переходу в технологічному процесі, але й такі показники, як витрати на амортизацію обладнання; енергетичні витрати; витрати на оплату праці; витрати на оренду/амортизацію приміщення; накладні витрати. Такий детальний розрахунок дає змогу дізнатися максимально точно про вартість виготовлення, на яких переходах вона найвища, та які параметри на це впливають, що дає змогу технологу можливість заміни того чи іншого переходу на більш дешевий, при незмінній якості виготовлення виробу загалом.

Після розрахунку необхідно натиснути на кнопку ***«Добавити для розрахунку»***, натиснувши на цю кнопку з'явиться інформаційне вікно, де буде вказано, що дані розрахунку збережено для порівняння з іншими ТП. Натиснувши кнопку ***«ОК»*** на інформаційному вікні, можна вводити дані для наступних ТП, для цього необхідно виконати описані вище дії.

Додавши необхідну кількість ТП для порівняння (6 ТП максимально можлива кількість для порівняння в програмі), необхідно натиснути на кнопку ***«Результат»***, після цього відкриється діалогове вікно, зображене на рис. 5.

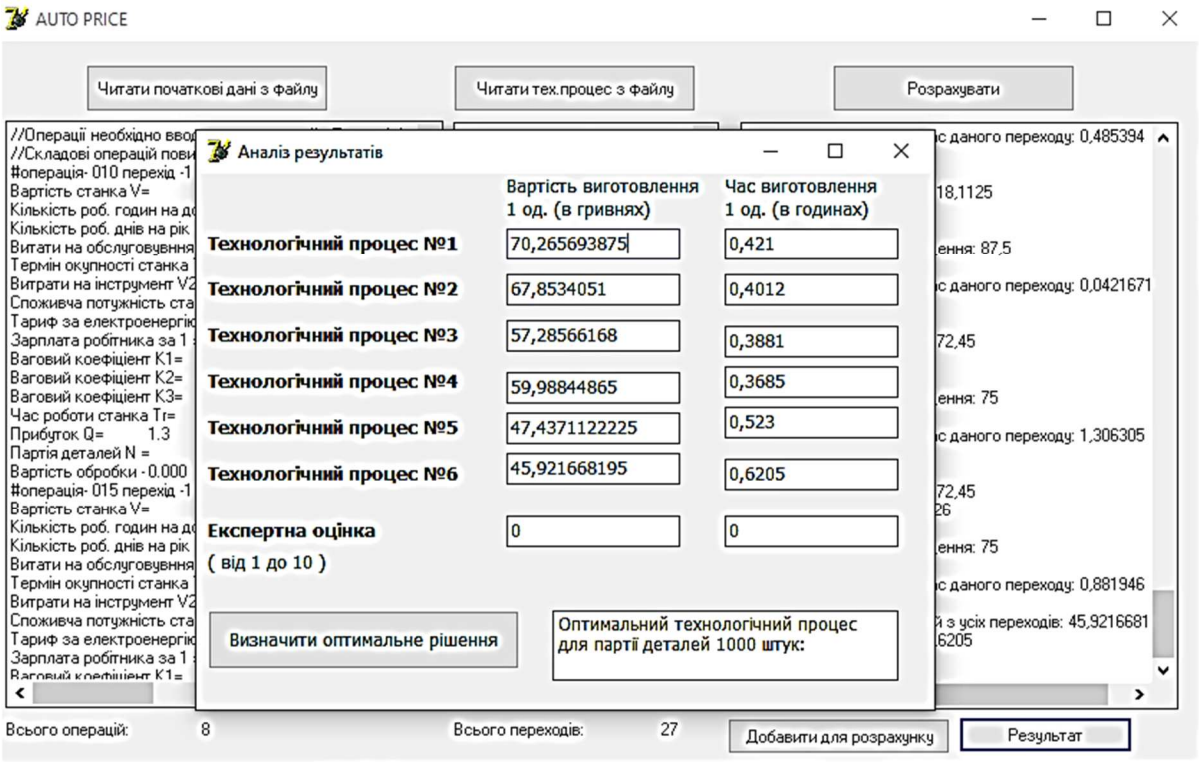



*Рис. 5. Результат розрахунку вартості та часу ТП для шести ТП*

У ПЗ «Auto_price» передбачена можливість порівняння різних ТП виготовлення партії деталей у розмірі 1000 штук. Максимальна похибка між ручним розрахунком та розрахунком виконаним програмою становить 0,2 %. Це може бути пов’язано з тим, що під час ручного розрахунку значення були менш точними, та містили менше значень після коми, ніж при розрахунку в програмі, де точність становить до 9 знаків після коми.

Також у програмі є можливість впливати на оптимальне рішення при виборі ТП, за допомогою експертної оцінки, яку необхідно ввести у спеціальні поля в програмі, які знаходяться під табличкою з вартістю та часом відповідно (початкове значення = 0). Значення експертної оцінки, які являють собою вагові коефіцієнти, повинні бути в межах від 1 до 10,та лише цілими значеннями, при введені від’ємних або дробових значень програма видасть помилку.

У роботі використовувався аналітичний спосіб проведення експертної оцінки для визначення оптимального ТП. Так, експертам було запропоновано визначити пріоритетність для замовника одного з параметрів, а саме вартість виготовлення або час виготовлення замовлення у відсотковому співвідношенні [5].

Після виконання експертної оцінки необхідно натиснути на кнопку «***Визначити оптимальне рішення»*** для визначення оптимального рішення вибору ТП. На рис. 6 представлено оптимальний результат вибору залежно від вартості та часу виготовлення деталі.

На основі отриманих розрахункових даних було побудовано графічні залежності (рис. 7), які чітко відображають вибір оптимального рішення ТП виготовлення деталі, на базі експертної оцінки для різних типів виробництва.

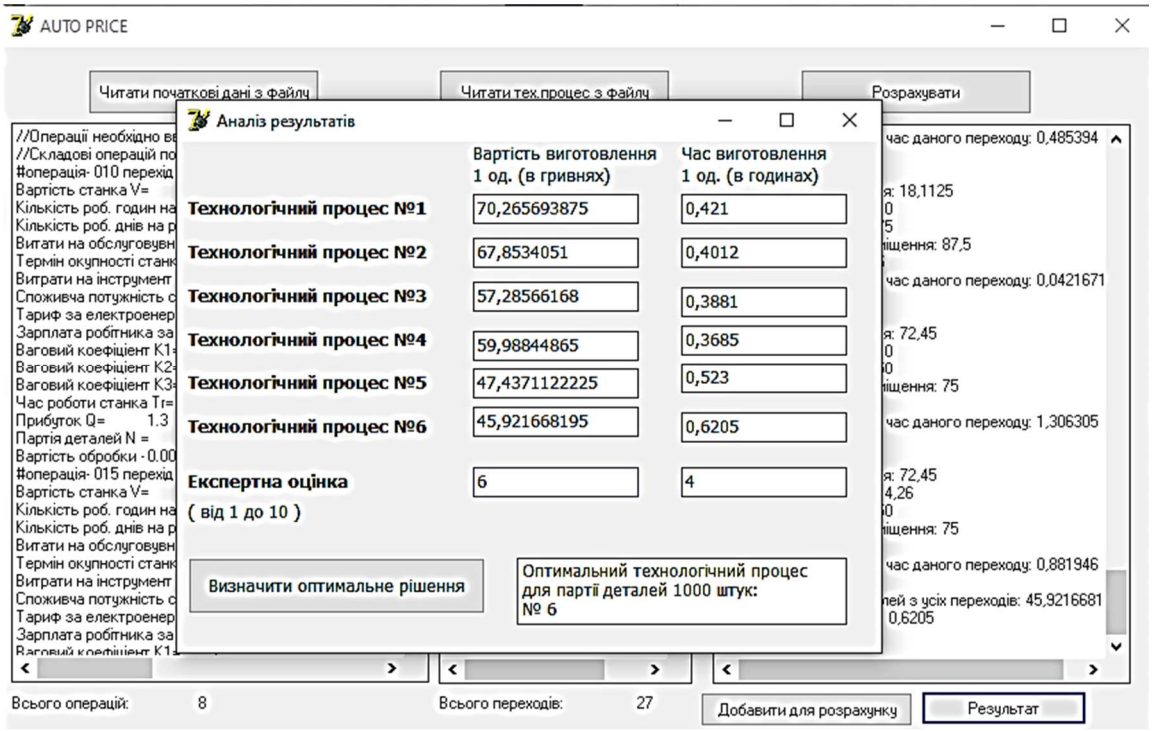



*Рис. 6. Вибір оптимального рішення в ПЗ «Auto_price»*

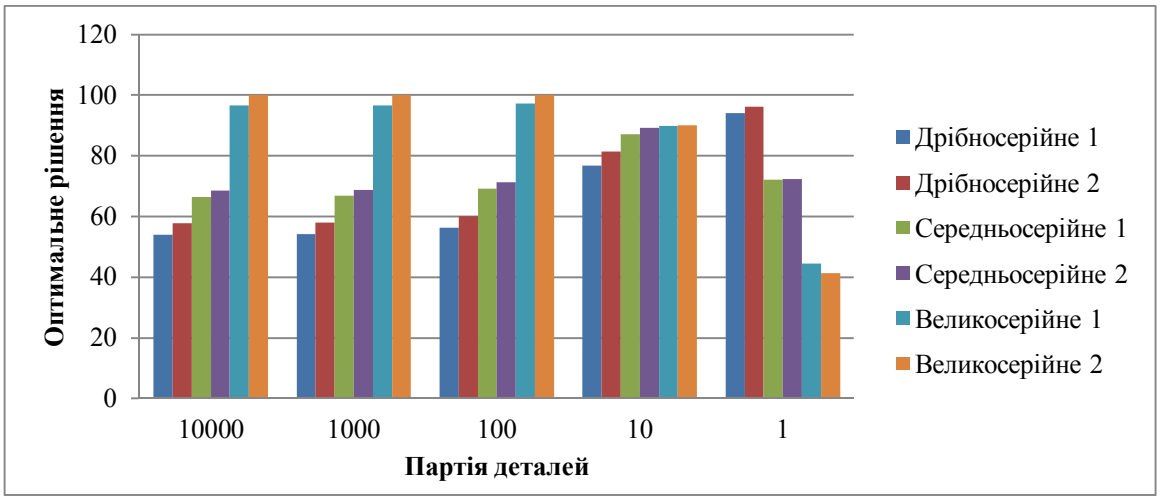



*Рис. 7. Вибір оптимального рішення ТП виготовлення деталі, на базі експертної оцінки для різних типів виробництва*

**Висновки відповідно до статті.** У цій роботі було удосконалено метод розрахунку вартості та часу виготовлення деталі залежно від типу виробництва, що дозволило отримати оптимальний технологічний процес з урахуванням техніко-економічних показників та реалізувати цей метод програмно. На прикладі конкретної деталі продемонстровано можливості програмного забезпечення «Auto_price» для розрахунку вартості деталі залежно від типу виробництва і структури технологічного процесу. Вибрано оптимальне рішення, враховуючи вартість та час виготовлення, зважаючи на ваговий коефіцієнт, який було обрано за допомогою експертної оцінки.

## Список використаних джерел

1. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник / Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка»; відпов. ред. З. А. Стоцько. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. Вип. 50. 140 с.

2. CustomPart.Net. URL: https://www.custompartnet.com.

3. Гриньова В., Салун М. Організація виробництва: навчальний посібник. Харків: ВД «ІНЖЕК», 2005. 550 с.

4. Системи автоматизованого проектування: комп'ютерний практикум: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів» / уклад.: Н. В. Стельмах, К. С. Барандич. Електронні текстові дані (1 файл 24 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 62 с.

5. Румбешта В. О., Стельмах Н. В. Прийняття рішень в автоматизованій системі технологічної підготовки приладобудівного виробництва на базі дискретної оптимізації. *Науковий вісник Кремен. ун-ту економіки, інформ. технол. і управ. Нові технології.* 2009. № 1 (23). С. 189–191.

## References

1. Stotsko, Z. A. (2016). Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni: ukrainskyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk [Automation of production processes in mechanical engineering and instrument making: Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection] (Issue 50). Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky [in Ukrainian].

2. CustomPart.Net. *custompartnet.com.* Retrieved from: https://www.custompartnet.com.

3. Hrynova, V., Salun, M. (2005). Orhanizatsiia vyrobnytstva [Organization of production]. Kharkiv: VD «INZhEK» [in Ukrainian].

4. Stelmakh, N. V., Barandych, K. S. (2018). Systemy avtomatyzovanoho proektuvannia: kompiuternyi praktykum: navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 151 «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii», spetsializatsii «Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii vyrobnytstva pryladiv» [Computer aided design: computer workshop: teaching tool. for students. specialty 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies", specialization "Computer-Integrated Device Manufacturing Technologies"]. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho [in Ukrainian].

5. Rumbeshta, V. O., Stelmakh, N. V. (2009). Pryiniattia rishen v avtomatyzovanii systemi tekhnolohich-noi pidhotovky pryladobudivnoho vyrobnytstva na bazi dyskretnoi optymizatsii [Decision making in the automated system of technological preparation of instrument-making production on the basis of discrete optimization]. *Naukovyi visnyk Kremen. un-tu ekonomiky, inform. tekhnol. i uprav. Novi tekhnolohii – Scientific Bulletin of the Kremenchug University of Economics, Information Technology and Management. New technologies,* 1 (23), 189–191 [in Ukrainian].

*UDC 658.512.8*

*Nataliia Stelmakh, Serhii Sapon, Yaroslav Ryzhuk*

## SELECTION OF OPTIMAL TECHNOLOGICAL PROCESS ON THE BASIS OF AUTOMATED ASSESSMENT OF ITS TECHNICAL AND ECONOMIC PARAMETERS

***Relevance of the research topic**. Technological preparation of production is an important stage, because it is the technological process (TP) of manufacturing a part that determines the technical and economic indicators that determine the competitiveness of a part in the product market.*

***Formulation of the problem.** The time spent by many domestic enterprises to calculate the technical and economic indicators of the technological process of manufacturing a part is quite significant today, which significantly slows down the technological preparation of production. In today's environment, the speed of environmental change, transformation and competition in the market is unacceptable.*

***Analysis of research and publications.** At present, there is a considerable amount of software available to calculate the technical and economic indicators of TP of parts manufacturing. Each program has its advantages and disadvantages.*

***Highlighting previously unresolved parts of a common problem.** An important element of the software for the calculation of the technical and economic indicators of the TP of parts manufacturing is the ability to promptly calculate the optimal TP on the indicators that are most important in specific production conditions. That is, it should be possible to select an optimization parameter.*

***The purpose of the article** is to improve the method of calculating the cost and time of manufacture of a part depending on the type of production.*

***Presenting main material.** On the example of a specific part, are demonstrated the capabilities of the software "Auto_price" for calculating the cost of the part, depending on the type of production and structure of the process. The most optimal is chosen, taking into account the cost and time of manufacturing, taking into account the weight factor that was selected by peer review.*

***Conclusion.*** *In the work the was improved the method of calculation of cost and time of production of a part depending on the type of production, which allowed to obtain the optimal technological process taking into account the technical and economic indicators and to implement this method programmatically.*

***Keywords:*** *manufacturing of parts; cost of manufacture; time of manufacture; optimal technological process; type of production.*

*Fig.: 7. References: 5.*

**Стельмах Наталія Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри виробництва приладів Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).
**Stelmakh Nataliia** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Instrument Production Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).
**E-mail:** n.stelmakh@kpi.ua
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1876-2794

**Сапон Сергій Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій машинобудування і деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Sapon Serhii** – PhD in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of machine building technology and wood processing department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail**: s.sapon@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1082-6431
**ResearcherID:** G-7764-2014
**SCOPUS Author ID:** 56736964700

**Рижук Ярослав Олександрович** – магістр зі спеціальності автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології, Національний Технічний Університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).
**Ryzhuk Yaroslav** – master in automation and computer-integrated technologies, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).
**E-mail:** yaroslav.rizhuk@gmail.com

Стельмах Н., Сапон С., Рижук Я. Вибір оптимального технологічного процесу на базі автоматизованої оцінки його техніко-економічних параметрів. *Технічні науки та технології.* 2020. № 1 (19). С. 89-97.

# РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

*УДК 004.056.5*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-98-103*

*Інна Стеценко, Вікторія Савчук*

## МЕТОД АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕСТУВАННЯ НА ПРОНИКНЕННЯ ВЕБАТАК

***Актуальність теми дослідження.*** *Збільшення можливості для розширення мереж та вибір у використанні сервісів у сучасному світі, призводить до прогалин у безпеці. З цієї причини виконується моделювання системи, що дозволяє відтворити характеристики інформаційної атаки, а також провести оцінювання рівня її небезпеки.*

***Постановка проблеми.*** *Нині немає програмного застосунку, що дозволяє автоматизовано моделювати та оцінювати захищеність власної інформаційної системи без втручання в саму систему.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Процес моделювання атак за допомогою мереж Петрі розглядався в декількох роботах закордонних авторів.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Наявні моделі графових атак створювались лише на прикладі певної архітектури мережі, проблемою залишилось створення універсального автоматизованого застосування, на основі вхідних даних про зв'язки та архітектуру мережі.*

***Постановка завдання.*** *Автоматизація виявлення зовнішніх вразливостей для аналізу захищеності інформаційної системи, шляхом розробки програмного забезпечення, що моделює за допомогою мереж Петрі розповсюдження атаки залежно від її архітектури.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Програмне забезпечення розроблено на основі мови програмування Java, включає графічну оболонку Java FX, для пошуку сервісів хосту використовується Shodan REST API, для ідентифікації вразливостей ресурси NVD і CVE details. Зібрані дані використовує окремий програмний модуль, що працює зі створенням моделі на основі мережі Петрі.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Запропонований метод дозволяє автоматизувати перевірку інформаційної системи на вразливість до хакерських атак.*

***Ключові слова:*** *моделювання кібератак; тест на проникнення; уразливості; мережа Петрі.*
*Рис.: 4. Бібл.: 13.*

**Актуальність теми дослідження.** Сучасні компанії мають великі можливості для розширення своїх інформаційних систем та широкий вибір у використанні сервісів, що надає платформу для розвитку та перспектив. Разом із позитивними можливостями такі зміни привносять складності, що стосуються підтримки великих мереж. Оскільки кількість хостів продовжує рости, оцінка їх вразливості до атак стає все більш важливою для автоматизації.

Велика мережа будується на декількох платформах і різних програмних пакетах і підтримує кілька режимів підключення. Неминуче така мережа буде містити дірки в безпеці, які вислизнули від уваги навіть старанного системного адміністратора.

Щоб оцінити вразливість мережі вузлів, необхідно виявити ефекти взаємодії локальних вразливостей і знаходити глобальні проблеми. Здебільшого ці роботи здійснюються засобами моделювання, що дозволяють відтворити необхідні властивості та характеристики інформаційної атаки, а також провести оцінювання рівня її небезпеки. Моделі дозволяють більш точно визначити ефективність існуючих засобів захисту за допомогою модельованих інформаційних атак.

**Постановка проблеми.** Нині немає програмних засобів, що дозволяють автоматизовано моделювати та оцінювати захищеність власної інформаційної системи без втручання в саму систему. Існують сценарії тестування системи на проникність – пентести, які виконуються спеціалістами з інформаційної безпеки, використовуючи безпосередньо саму систему.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процес моделювання атак за допомогою мереж Петрі розглядався в декількох роботах закордонних авторів.

У роботі [1] J. P. McDermott запропонував моделювання атак мережами Петрі, в яких позиції – це важливі для безпеки інформаційної системи стани. Переходи – події, команди чи дані, які можуть бути важливими для зміни стану системи відносно безпе-

© Стеценко І. В., Савчук В. В., 2020

ки. Маркери в моделі переходять від позиції до позиції, показуючи розвиток атаки. Цей метод добре показує процес розвитку атаки. Але великим мінусом є те, що неможливо отримати вимоги до безпеки та яким чином впливає архітектура системи на безпеку.

Недавні дослідження були зосереджені на впливі мережевих топологій на поширення шкідливих програм. У роботі [2] авторами отримані результати для безрозмірної топології мережі з використанням математичної моделі. Топологія характеризувалася кількістю вузлів і параметрами степеневого показника. У дослідженні [3] структура соціальних і технологічних мереж досліджувалася при їх атаці комп'ютерним вірусом або хробаком. Автори використовували моделювання поширення атаки на основі моделі сприйнятливої інфікованої відновленої епідемії. Вони запропонували структурну модель ризику.

У роботі [4] розглянуто моделювання атак за допомогою кольорових мереж Петрі. Така модель є досить гнучкою для моделювання вторгнень з Інтернету, включаючи статичні і динамічні аспекти атаки. Для того щоб оцінити можливі втрати від вторгнення, у модель були введені вартісні оцінки. Також показано, як можливо її використовувати для моделювання методів захисту, але в цій роботі не було спроб зв'язати можливість проведення атаки з властивостями компонентів інформаційної системи та налаштуваннями систем захисту.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Наявні моделі графових атак створювались лише на прикладі певної архітектури мережі, проблемою залишилось створення універсального автоматизованого застосування, на основі вхідних даних про зв'язки про архітектуру мережі.

**Постановка завдання (мета статті).** Головною метою є автоматизація виявлення зовнішніх вразливостей для аналізу захищеності інформаційної системи, шляхом розробки програмного забезпечення, що моделює за допомогою мереж Петрі розповсюдження атаки залежно від її архітектури.

**Виклад основного матеріалу.** Моделювання атак проводилось у спеціально розробленому середовищі об'єктно орієнтованою мовою програмування Java. Компоненти мережі Петрі (позиції, переходи, дуги) представлені у вигляді об'єктів і всі процеси відтворюються методами ООП. Застосування використовує графічну оболонку для спрощення створення та редагування моделі. Його особливістю є можливість зберігання моделі в кількох форматах, автоматизоване генерування програмного коду методу для створення мережі Петрі за її графічним зображенням у редакторі та можливість відновлення графічного зображення мережі Петрі виключно за програмним кодом відповідного методу [5].

На рис. 1 представлено фрагмент моделі проникнення хакера. Мережа Петрі містить два переходи на атаку відповідно до двох подій «вхід через Інтернет» та «використання вразливості». Перехід «Internet» має вхідну позицію «hacker», маркер в якій символізує вихід хакера в Інтернет. Перехід «service», оточений позиціями «vulnerability» і «target_host», спрацьовує за наявності відповідної вразливості в системі, що символізує маркер в позиції, з'єднаній із переходом інформаційним (пунктирним) зв'язком. Позиція «vulnerability» демонструє ініціацію атаки, використовуючи певну вразливість сервісу, перехід «service» показує експлуатацію сервісу, після якого хакер опиняється всередині цільового хосту. Наявність позицій з інформаційним зв'язком надає можливість відтворювати умови для подій, які після здійснення події не зникають. Дійсно, наявність вразливості в системі є необхідною умовою для події «service», проте запуск сервісу для конкретного користувача не означає, що вразливість зникла. Якщо відповідної вразливості в системі немає, то відсутність маркера у вхідній позиції не дозволить використання сервісу.

На рисунку 2 зображено фрагмент моделі, де представлено три можливі варіанти проникнення хакера в інформаційну систему, використовуючи одну з вразливостей (“vulnerability_1”, “vulnerability_2”, “vulnerability_3”) певного сервісу “service”. Це означає, що в інформаційній системі на певній IP-адресі є сервіс з версією, встановлення якого призводить до наявності трьох вразливостей.

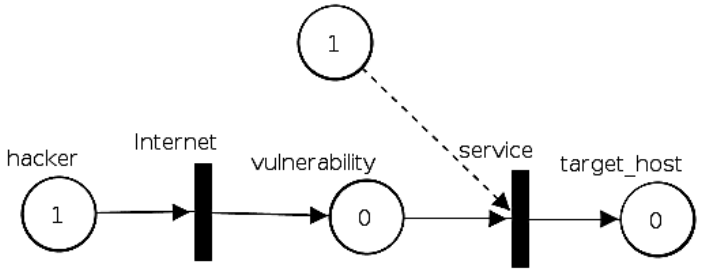



*Рис. 1. Проста мережа Петрі, що моделює проникнення хакера всередину хосту, використовуючи вразливість сервісу*

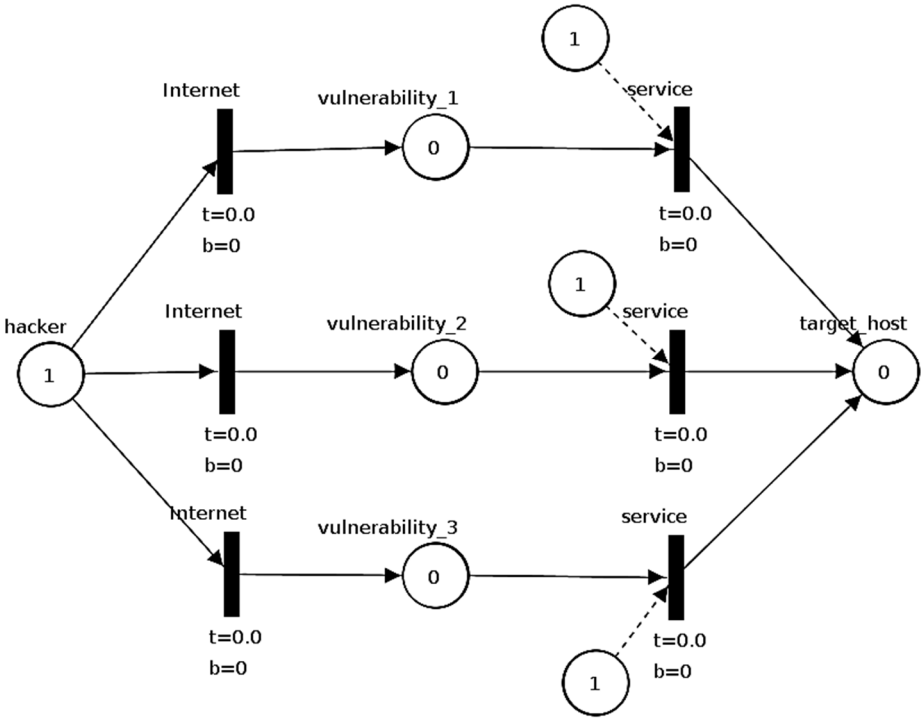



*Рис. 2. Проста мережа Петрі, що моделює проникнення хакера всередину хосту, використовуючи вразливість сервісу*

Найчастіше дані, що є цільовими, тобто важливими, не лежать на вузлах, що мають вихід у Всесвітню мережу. У такому випадку для досягнення своєї мети, хакер має пройти через низку мереж до тієї, де, наприклад, розгорнута база даних. На рис. 3 зображено побудову моделі мережі Петрі для розповсюдження атаки хакером по інформаційній системі, що має просту архітектуру і складається з вебсервера, файл-серверу та сервера з базою даних (БД). До сервера з БД можливо потрапити через вебсервер або файл-сервер. Вебсервер містить вебсервіс «service_1», який має дві вразливості «vulnerability_1» та «vulnerability_2». Файл-сервер, у свою чергу, містить файловий сервіс «service_2», який має вразливість «vulnerability_3». Експлуатація однієї з трьох представлених вразливостей призводить до отримання прав на проміжному хості «transitional_host», який має доступ до цільового хосту «target_host», базою даних у сервісі «service_3».

Пошукова система Shodan [6] надає можливість за хостом визначити відкриті сервіси, що розгорнуті на ньому. Система має відкрите безкоштовне API – Shodan REST API [7]. Запит повертає достатньо велику кількість інформації про хост та його сервіси, але в застосуванні використовуються такі дані: IP, порт та CPE (Common Platform Enumeration). CPE – це стандартизований метод опису та ідентифікації класів програм, операційних систем і апаратних пристроїв, присутніх серед обчислювальних активів підприємства [8].

Застосування, як було зазначено, включає в себе тестування на проникнення. З цієї причини першим завданням є виявлення вразливих місць, які можна використати для проникнення в комп'ютерну мережу, що тестується.

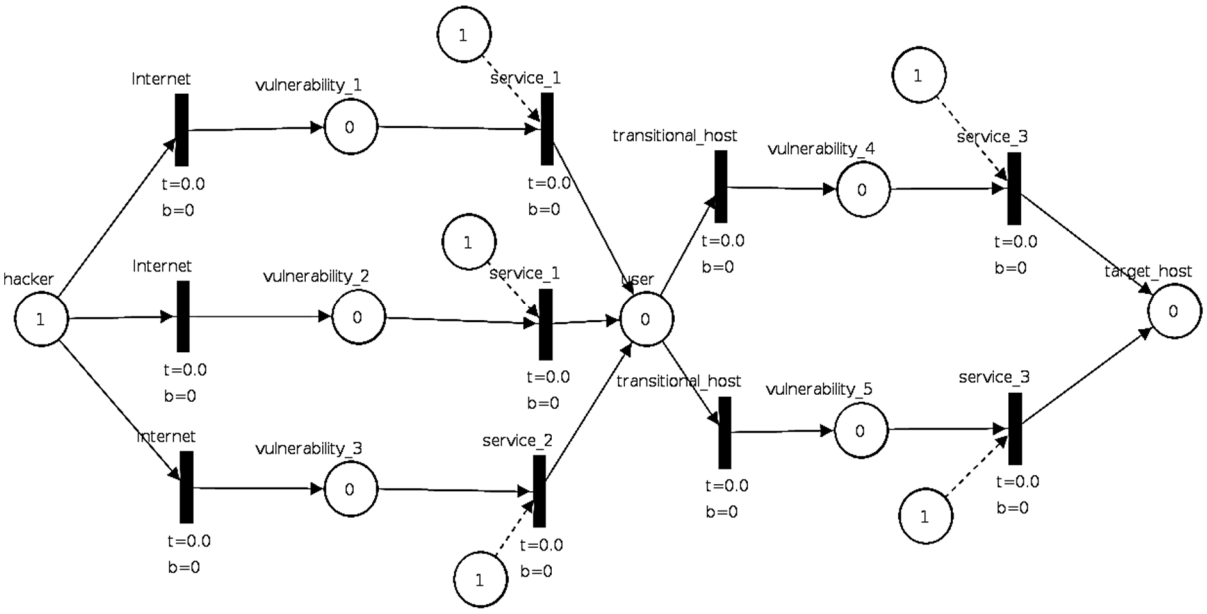



*Рис. 3. Мережа Петрі, що моделює проникнення хакера всередину інформаційної системи, що має просту архітектуру*

IP та порт – це дані, що в подальшому використовуються як вхідні дані мережі Петрі, а за допомогою CPE відбувається ідентифікація наявних вразливостей, використовуючи пошук у NVD (National Vulnerability Database). NVD – це державне сховище даних управління вразливостями на основі стандартів США [9]. Пошук у NVD за CPE повертає список ідентифікаторів вразливостей сервісу CVE (Common Vulnerabilities and Exposures), що є списком загроз і ризиків інформаційної безпеки. Ідентифікатор вразливостей має формат CVE-0000-0000 [10-12].

Для генерування моделі за допомогою мережі Петрі необхідні характеристики кожної вразливості. Така інформація представлена в зручному вигляді на ресурсі CVE Details [13]. Через відсутність бібліотеки для взаємодії з ресурсом, збір даних відбувається з використанням фреймворку Selenium для Java, який є платформою для управління браузерами за допомогою драйвера WebDriver.

Вхідними даними моделі є IP-адреси, CVE ID, тип доступу (локальний/віддалений) складність (проста, середня, висока), автентифікація (права необхідні для експлуатації сервісу) і набуті права доступу.

Рисунок 4 демонструє архітектуру програмного забезпечення, що розроблено.

**Висновки відповідно до статті.** Запропоновано спосіб проведення тестів на проникнення без експлуатації інформаційної системи. Проникність системи оцінюється за допомогою моделі, побудованої з використанням мережі Петрі. Представлено архітектуру програмного забезпечення, що за допомогою загальнодоступних способів пасивного сканування хостів організації визначає сервіси та їх вразливості. На основі зібраної та наданої інформації про інфраструктуру системи автоматично генерується модель системи, результатом імітації якої є час розповсюдження атаки. Таким чином, це дає можливість оцінити критичність наявності певної вразливості в системі та зробити висновки щодо її усунення або прийняття ризику, який існує через її наявність у системі.

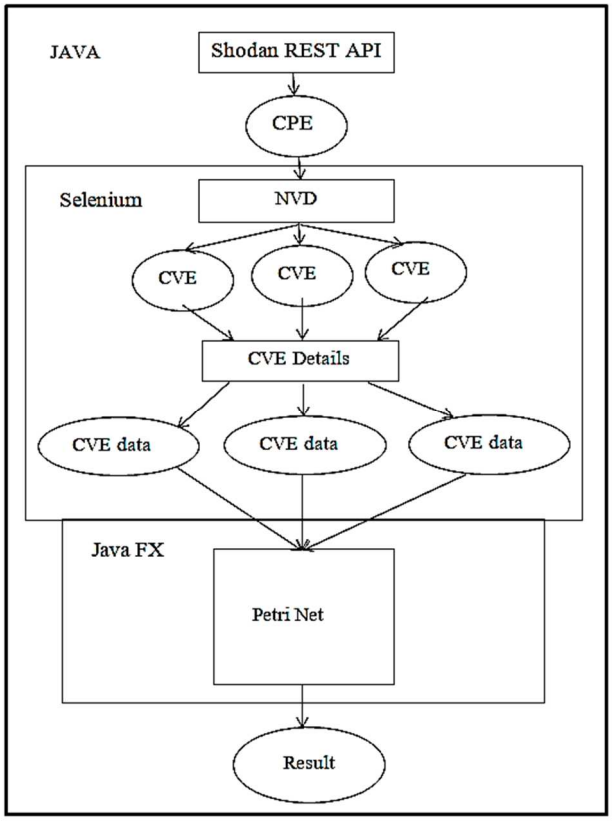



*Рис. 4. Архітектура програмного забезпечення*

## Список використаних джерел

1. McDermott J. P. Attack Net Penetration Testing. *Proc. of the 2000 Workshop on New Security Paradigm*. 2000. URL: https://www.nspw.org/papers/2000/nspw2000-mcdermott.pdf.
2. Yang L., Yang X. The effect of network topology on the spread of computer viruses: A modeling study. *International Journal of Computer Mathematic.* 2017. Vol. 94, № 8. P. 1–19.
3. Guo H., Cheng H. K., Kelley K. Impact of Network Structure on Malware Propagation: A Growth Curve Perspective. *Journal of Management Information Systems.* 2016. Vol. 33, № 1. P. 296–325.
4. Xinlei Li, Di Li. A Network Attack Model based on Colored Petri Net. *Journal of networks.* 2014. Vol. 9, № 7. P. 1883–1891. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/003a/05bc845716439ed2c1ef494ac1e8ae7585bb.pdf.
5. Stetsenko I. V., Dyfuchyn A., Leshchenko K., Davies J. Web application for visual modeling of discrete event systems. *Proceedings of the Seventh International Conference on Internet Technologies and Applications (ITA2017)* / Picking R., Cunningham S., Houlden N., Oram D., Grout V., Mayers J. (eds). Wrexham, UK, 2017. P. 86–91.
6. Shodan. URL: https://www.shodan.io.
7. Shodan REST API Documentation. URL: https://developer.shodan.io/api/.
8. Common Platform Enumeration (CPE). URL: https://csrc.nist.gov/Projects/Security-Content-Automation-Protocol/Specifications/cpe.
9. National Vulnerability Database. URL: https://nvd.nist.gov.
10. A Complete Guide to the Common Vulnerability Scoring System Common Vulnerabilities and Exposures. URL: https://www.first.org/cvss/v2/guide.
11. CVE official. URL: https://cve.mitre.org.
12. CVE format. URL: https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE.
13. CVE Details – the ultimate security. URL: https://www.cvedetails.com.

## References

1. McDermott, J. P. (2000). Attack Net Penetration Testing. *Proc. of the 2000 Workshop on New Security Paradigm*. Retrieved from https://www.nspw.org/papers/2000/nspw2000-mcdermott.pdf.
2. Yang, L., Yang, X. (2017). The effect of network topology on the spread of computer viruses: A modeling study. *International Journal of Computer Mathematic*, 94 (8), 1–19.

3. Guo, H., Cheng, H. K., Kelley, K. (2016). Impact of Network Structure on Malware Propagation: A Growth Curve Perspective. *Journal of Management Information Systems*, 33 (1), 296–325.

4. Xinlei, Li, Di, Li (2014). A Network Attack Model based on Colored Petri Net. *Journal of networks,* 9 (7), 1883–1891. Retrieved from https://pdfs.semanticscholar.org/003a/05bc845716439ed2c1ef494ac1e8ae7585bb.pdf.

5. Stetsenko, I. V., Dyfuchyn, A., Leshchenko, K., Davies, J. (2017). Web application for visual modeling of discrete event systems. *In: Picking R., Cunningham S., Houlden N., Oram D., Grout V., Mayers J. (eds) Proceedings of the Seventh International Conference on Internet Technologies and Applications (ITA2017)* (pp. 86-91). Wrexham, UK [in English].

6. Shodan. shodan.io. Retrieved from https://www.shodan.io.

7. Shodan REST API Documentation. *developer.shodan.io*. Retrieved from https://developer.shodan.io/api/.

8. Common Platform Enumeration (CPE). *csrc.nist.gov.* Retrieved from https://csrc.nist.gov/Projects/Security-Content-Automation-Protocol/Specifications/cpe.

9. National Vulnerability Database. *nvd.nist.gov.* Retrieved from https://nvd.nist.gov.

10. A Complete Guide to the Common Vulnerability Scoring System Common Vulnerabilities and Exposures. *first.org*. Retrieved from https://www.first.org/cvss/v2/guide.

11. CVE official. *cve.mitre.org*. Retrieved from https://cve.mitre.org.

12. CVE format. *nvd.nist.gov*. Retrieved from https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE.

13. CVE Details – the ultimate security. *cvedetails.com*. Retrieved from https://www.cvedetails.com/.

*UDC 004.056.5*

*Inna Stetsenko, Viktoriia Savchuk*

## AUTOMATING WEB ATTACK PENETRATION TESTING METHOD

***Urgency of the research.*** *Increasing opportunities for network expansion and choice in the use of services in today's world leads to security gaps. For this reason, the simulation of the system allows reproducing the characteristics of an information attack, as well as assessing the level of its danger.*

***Target setting.*** *No software application allows you to simulate and evaluate the security of an information system without interfering with the system.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *The process of modeling attacks using Petri nets has been discussed in several papers by foreign authors.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *The existing models of graph attacks were created only for specific network architecture. The problem remained is the creation of a universal automated application based on the input data about the network architecture.*

***The research objective.*** *Automation of detection of external vulnerabilities for the analysis of the security of information system, by the development of software application, models using Petri nets of distribution of attack depending on its architecture.*

***The statement of basic materials.*** *The software application is developed based on the Java programming language, including the Java FX graphical shell, Shodan REST API is used to search for host services, NVD and CVE details resources are used to identify vulnerabilities. The collected data uses a separate software module that works with the creation of a model based on the Petri net.*

***Conclusions.*** *The proposed method makes it possible to automate the verification of the information system for vulnerability to hacker attacks.*

***Keywords:*** *cyber-attack simulation; penetration test; vulnerabilities; Petri net.*

*Fig.: 4. References: 13.*

**Стеценко Інна Вячеславівна** – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна).
**Stetsenko Inna** – Doctor of Science, Professor of Computer-Aided Management And Data Processing Systems Department, NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).
**E-mail:** stiv.inna@gmail.com
**SCOPUS Author ID:** 55368781500
**ORCID:** https:// orcid.org/0000-0002-4601-0058
**ResearcherID:** C-1512-2019

**Савчук Вікторія Володимирівна** – студентка, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна).
**Savchuk Viktoriia** – student, NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremogy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).
**E-mail:** viktoria859@gmail.com

Стеценко І., Савчук В. Метод автоматизації тестування на проникнення вебатак. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 98-103.

*УДК 004.78:004.056*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-104-113*

*Тетяна Смірнова*

# ФОРМАЛІЗАЦІЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЕННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ

***Актуальність теми дослідження.*** *У наш час будь-яка галузь виробництва потребує застосування інформаційних технологій. Виготовлення деталей із покриттями, їх зміцнення та відновлення не є винятком. У цій роботі запропонована формалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи, наведена її реалізація.*

***Постановка проблеми.*** *Комбінаторна складність технологічного процесу налічує чотири можливих варіанти. Для такої кількості варіантів, є доцільним проведення оптимізації для чотирьох ланцюгів технологічних операцій, з обранням результату, що матиме кращий результат згідно ваговій функції. Аналізування руху інформації при проведені оптимізації технологічного процесу на основі ланцюга технологічних операцій виявляє потребу в забезпеченні в інформаційній системі, що є актуальною задачею. Також актуальним є необхідність підтримки в інформаційній системі визначення залежностей між величинами аналітичними методами, таблично, алгоритмічно та за допомогою імітаційних моделей.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *У теперішній час активно розроблюються інформаційні системи підтримки прийняття рішень для забезпечення оптимізації окремих технологічних процесів. Однак не вистачає систем для вирішення задачі побудови оптимізованого ланцюга технологічного процесу та систем вибору більш оптимального технологічного процесу. Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що питання застосування інформаційних технологій у вигляді відповідних експертних систем в технологічних процесах дуже актуальне. Тому проблема оптимізації ланцюга технологічного процесу в інформаційному забезпеченні експертних систем, актуальна.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Інформаційні одиниці є функціонально різними, деякі величини мають здатність змінювати функціональну здатність переходом від шуканих величин до обмежень на технологічну операцію, що накладає на систему керування змінними додаткові функціональні можливості та універсальність до трансформації моделювання технологічного процесу.*

***Постановкою завдання*** *є формалізація та реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Зроблено формалізацію технологічного процесу електродугового напилення та запропоновано реалізацію структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи.*

***Висновки відповідно до статті.*** *У результаті аналізу руху інформації при проведені оптимізації технологічного процесу на основі ланцюга технологічних операцій виявлено потребу в забезпеченні в інформаційній системі.*

***Ключові слова:*** *технологічний процес; електродугове напилення; експертна система.*

*Рис.: 2. Табл.: 4. Бібл.: 10.*

**Актуальність теми дослідження.** Нині будь-яка галузь виробництва потребує застосування інформаційних технологій. Виготовлення деталей із покриттями, їх зміцнення та відновлення не є винятком. У цій роботі розглянуто формалізацію та запропоновано реалізацію структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи.

**Постановка проблеми.** Комбінаторна складність технологічного процесу налічує чотири можливих варіанти. Для такої кількості варіантів, є доцільним проведення оптимізації для чотирьох ланцюгів технологічних операцій, з обранням результату, що матиме кращий результат згідно з ваговою функцією. Аналізування руху інформації при проведені оптимізації технологічного процесу на основі ланцюга технологічних операцій виявлено потребу в забезпеченні в інформаційній системі, що є актуальним завданням. Також актуальним є необхідність підтримки в інформаційній системі визначення залежностей між величинами аналітичними методами, таблично, алгоритмічно та за допомогою імітаційних моделей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У теперішній час активно розроблюються інформаційні системи підтримки прийняття рішень для забезпечення оптимізації окремих технологічних процесів [1-8]. Систем для вирішення задачі побудови оптимізованого ланцюга технологічного процесу та систем вибору більш оптимального технологічного процесу не вистачає. Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що питання застосування інформаційних технологій у вигляді відповідних експертних систем в технологічних процесах дуже актуальне [1-3; 5-8]. Тому проблема оптимізації ланцюга технологічного процесу в інформаційному забезпеченні експертних систем актуальна.

© Смірнова Т. В., 2020

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Інформаційні одиниці є функціонально різними, деякі величини мають здатність змінювати функціональну здатність переходом від шуканих величин до обмежень на технологічну операцію, що накладає на систему керування змінними додаткові функціональні можливості та універсальність до трансформації моделювання технологічного процесу.

**Метою статті** є формалізація та реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи.

**Виклад основного матеріалу.**

**Формалізація структури технологічного процесу електродугового напилення.**

Технологічний процес електродугового напилення в процесі створення виробів із покриттям, а також при відновленні або зміцненні поверхонь деталей, складається з поетапної обробки:

1) струменево-абразивної обробки (САО);

2) при потребі нанесення підшару;

3) основний процес нанесення покриття;

4) доведення утвореної поверхні з покриттям до необхідних розмірів і якості (параметри $R_z$ або $R_a$) методами механічної обробки (МО), найчастіше чорновим або чистовим шліфуванням і методами поверхнево-пластичної обробки (ППД), а саме обкаткою кульками й роликами, електроконтактною обробкою та інше.

Перший етап призначений для збільшення шорсткості поверхні деталі, на яку наноситься покриття, для отримання необхідної адгезійної міцності (міцності зчеплення) системи «основа-покриття». Підшар має функцію усунення несумісності властивостей основного матеріалу (матеріалу поверхні деталі, на яку наноситься покриття) та матеріалу покриття. Для забезпечення міцності зчеплення системи «основа-покриття» використовують підшар із молібдену або ніхрому.

Основний процес нанесення покриття здійснюється розплавленням його електричною дугою і перенесенням за допомогою струменя стисненого повітря на поверхню деталі. Для запобігання утворення окислів і регулювання вмісту вуглецю, у повітря можна додавати пропан, завдяки горінню якого зменшується вміст кисню в струмені, а швидкість витоку газу в струмені може сягати кілька швидкостей звуку.

Доведення поверхні до стандартів деталі проводять механічною обробкою на шліфувальних верстатах, методами поверхнево-пластичного деформування, електроконтактною обробкою та іншими.

У результаті огляду процесу створення поверхонь деталей із покриттями методом електродугового напилення (ЕДН) отримано таку структурну схему ланцюга технологічних операцій (рис. 1):

*Рис. 1. Структура операцій створення поверхонь деталей із покриттями методом електродугового напилення*

Відповідно до початкових умов та вимог до результату, друга технологічна операція може і не виконуватися, тому комбінаторна складність технологічного процесу (ТП) має чотири можливих варіанти. Для такої кількості варіантів є доцільним проведення оптимізації для чотирьох ланцюгів технологічних операцій з обранням результату, що матиме кращий результат згідно з ваговою функцією.

Схема руху інформації в процесі оптимізації технологічного процесу творення поверхонь деталей із покриттями методом ЕДН навеена на рис. 2.

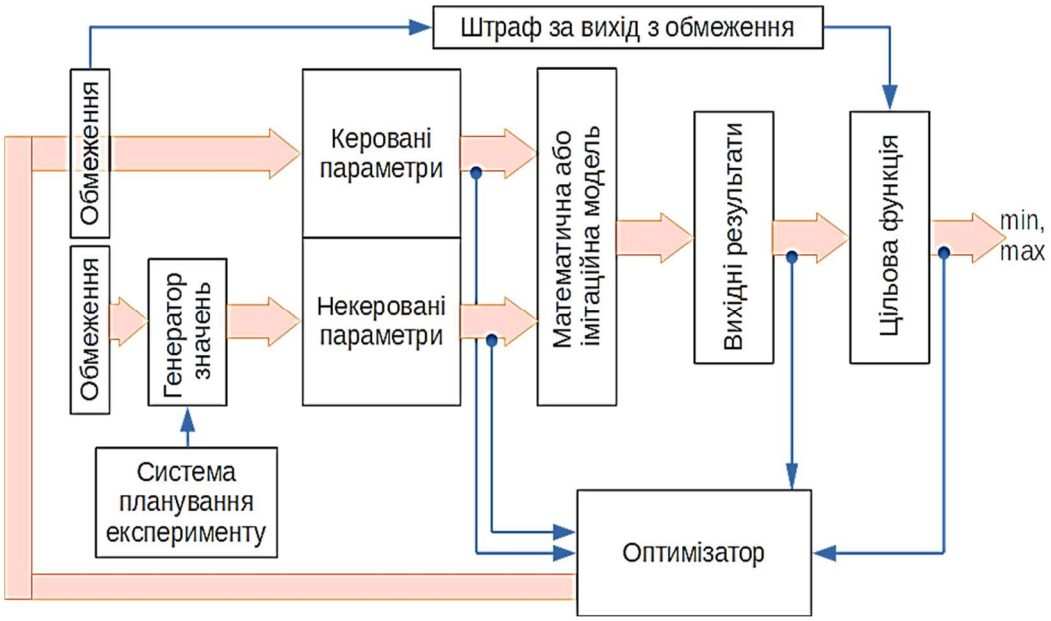



*Рис. 2. Схема руху інформації в процесі оптимізації технологічного процесу створення поверхонь деталей із покриттями методом ЕДН*

Як видно зі схеми руху інформації на рис. 2, яка побудована на основі [1, рис. 4], кожна технологічна операція повинна відокремити такі вектори величин:

– $\vec{X}$ – контрольовані величини процесу. Для цих величин існують обмеження $x_{\min i} \le x_i \le x_{\max i}$;

– $\vec{V}$ – відомі але не контрольовані величини процесу;

– $\vec{Z}$ – невідомі та не контрольовані величини;

– $\vec{R}$ – випадкові величини, що впливають на процес;

– $\vec{Y}$ – параметри, які досягаються в процесі технологічної обробки.

Для вказаних величин технологічного процесу є рівняння (1), де параметри процесу $\vec{X}$ є шуканою величиною:

$$\vec{Y} = F\left(\vec{X}, \vec{V}, \vec{Z}, \vec{R}\right), \tag{1}$$

Однак для технологічного процесу, який складається з ланцюга технологічних операцій, рівняння (1) перетворюється в систему рівнянь (2):

$$\begin{cases} \vec{Y}_k = F_k\left(\vec{X}_k, \vec{V}_k, \vec{Z}_k, \vec{R}_k\right), \\ \vec{Y}_{k-1} = F_{k-1}\left(\vec{X}_{k-1}, \vec{V}_{k-1}, \vec{Z}_{k-1}, \vec{R}_{k-1}\right), \\ \dots \\ \vec{Y}_1 = F_1\left(\vec{X}_1, \vec{V}_1, \vec{Z}_1, \vec{R}_1\right), \end{cases} \tag{2}$$

де результати попередньої технологічної операції можуть бути частково або повністю входити як параметр наступної технологічної операції, тобто:

$$\vec{X}_i \cap \vec{Y}_{i-1} \neq 0 .$$

На практиці невідомі та випадкові параметри не враховують, або допускають їх використання, як випадкових величин. У разі наявності переліку таких випадкових параметрів, необхідно визначити (або визначають) межі зміни керованих величин за допомогою методів або аналітичного оцінювання відхилення результату, або використавши повно факторний експеримент, при змінюванні лише величин, які входять до $\vec{Z}$ та $\vec{R}$ .

Технологія електродугового напилення складається з трьох операцій (3):

$$\begin{cases} \vec{Y_3} = F_3\left( \vec{X_3} \cup \vec{Y_2}, \vec{V_3}, \vec{Z_3}, \vec{R_3} \right), \\ \vec{Y_2} = F_2\left( \vec{X_2} \cup \vec{Y_1}, \vec{V_2}, \vec{Z_2}, \vec{R_2} \right), \\ \vec{Y_1} = F_1\left( \vec{X_1}, \vec{V_1}, \vec{Z_1}, \vec{R_1} \right), \end{cases} \tag{3}$$

де $F_1$ – математична модель абразивно-струменевої обробки (САО); $F_2$ – математична модель процесу нанесення підшару; $F_3$ – математична модель процесу нанесення основного шару (покриття).

Завдяки розділенню технологічних операцій спрощується побудова цільової функції. Окремо будуються функції за такими параметрами:

Відповідність до вимог готового виробу:

$$G(\vec{Y_3}) = \sum_{i=0}^{n-1} \mathrm{ReLu}\left( \vec{Y_в} - \vec{Y_3} \right)_i , \tag{4}$$

де $\vec{Y_в}$ – вимоги до виробу, як n-вимірний вектор значень, $\vec{Y_3}$ – результат обробки; $i$ – індекс параметру у векторі; ReLu() – функція відсікання від'ємних значень (5):

$$\mathrm{ReLu}(x) = \begin{cases} x, if(x > 0), \\ 0, if(x \le 0). \end{cases} \tag{5}$$

Мінімальне значення (4) є нуль, коли всі параметри відповідають або перевищують задані вимоги. Так можна формувати вимоги до різальних кромок інструментів, наприклад, плугів. У разі потреби штрафування системи, коли результати обробки також перевищують задані параметри, можна ReLu() замінити абсолютним значенням або квадратичною функцією. Це відбувається, коли деталі взаємодіють тертю. Тоді поверхні повинні мати схожі характеристики матеріалів, тому що тут є важливим зменшення саме відхилення параметрів від заданих величин, і перевищення вимог до твердості так само погано як і недостача. Часто для таких випадках використовують Декартову відстань на багатовимірному просторі, що відкриває можливість використовувати для багатьох випадків аналітичні методи оптимізації – метод найменших квадратів. У розглянутому прикладі створення різального інструменту з покриттям підвищення вимог щодо зносостійкості, твердості, міцності зчеплення покриття з основою, зверху не регламентується, тому використання обмеження за мірою (4) є обґрунтованим.

Для врахування часових $T$ та матеріальних $M$ витрат, відповідно використовують залежності (6):

$$\begin{aligned} T &= \sum_{k=1}^{3} T_k(\vec{X_k} \cup \vec{Y_{k-1}}, \vec{V_k}), \\ M &= \sum_{k=1}^{3} M_k(T_k, \vec{X_k} \cup \vec{Y_{k-1}}, \vec{V_k}), \\ \vec{Y_0} &= 0. \end{aligned} \tag{6}$$

До системи (6) додано $\vec{Y}_0 = 0$, бо перша операція не вимагає результатів попередньої, тому до керованих величин першої операції додається пуста множина.

До матеріальних витрат входять заробітна плата працівникам, оренда приміщення, та інші параметри, які залежать від часу проведення технологічної операції, видів і об'ємів матеріалів та енергоносіїв у грошовому еквіваленті. Повна функція втрат *G*, результат якої повинен бути дійсним числом, є лінійною комбінацією (4) та (6):

$$G = c_0 G(\vec{Y}_3) + c_1 \sum_{k=1}^{3} M_k + c_2 \sum_{k=1}^{3} T_k \to \min, \tag{7}$$

де $c_0$, $c_1$, $c_2$ – додатні дійсні коефіцієнти, які відбивають пріоритетність досягнення тих чи інших показників.

У випадках необхідності дотримання технічних вимог до виробу та обмеженні максимального часу виробництва, вираз (7) можна представити в інший формі, наприклад:

$$\begin{cases} G(\vec{Y}_3) = 0, \\ c_1 \sum_{k=1}^{3} M_k + c_2 \sum_{k=1}^{3} T_k \to \min. \end{cases} \tag{8}$$

Це свідчить про поділ вагового виразу на вимоги та критерій оптимальності, де вимог може бути кілька, а критерій оптимальності повинен бути єдиним. У разі відсутності критичних вимог, критерію оптимальності (7) достатньо для оптимізації ланцюга технологічних операцій.

**Реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення.**

Відповідно до формалізованих записів (3), (6) та (8) для побудови системи оптимізації потрібно визначити перелік використовуваних змінних та залежностей.

З погляду матеріалознавства, методом повнофакторного планування та проведення експерименту визначено параметри, які з достатньою точністю дають керування результатами обробки [10]. Також для визначення міцності зчеплення часто доступні дані. Приклад експериментальної залежності зміни міцності зчеплення основи з нанесеним покриттям наведено в табл. 1 [9].

Таблиця 1

*Вплив способу підготовки поверхні із сталі 20 на міцність зчеплення її з покриттям із порошкового дроту 40Х13*

| **Спосіб підготовки поверхні** | **Шорсткість $R_z$, мкм** | **Міцність зчеплення, МН/м²** |
|---|---|---|
| Механічна обробка (точіння) | 10 | 50 |
| | 14 | 65 |
| | 16 | 120 |
| Струменево-абразивна обробка корундом зернистістю 450-980 мкм при тиску повітря 0,45 МПа | 20 | 56 |
| | 22 | 101 |
| | 24 | 115 |
| | 27 | 140 |
| | 36 | 90 |
| | 38 | 65 |
| | 39 | 35 |
| Струменево-абразивна обробка сталевими кульками 0,5…1 мм при тиску повітря 0,45 МПа протягом 150 с | 2..3 | 43..72 |

У результаті, для першої операції струменево-абразивної обробки маємо основні параметри:

– $t_1$ – час обробки;

– $p_1$ – тиск повітря в системі обробки;

– $P_1$ – енергоспоживання устаткування для струменево-абразивної обробки;

– $r_1$ – час амортизації устаткування;

– $m_1$ – вартість устаткування;

– $m_{P1}$ – вартість енергетичних ресурсів та матеріалів, які використовуються за одиницю часу в обраному режимі роботи;

σ – твердість матеріалу, який обробляється.

Однак не всі вказані величини впливають на міцність зчеплення покриття:

$Y_1 = H$ ( $<t_1$, $p_1$, σ, {*хімічний склад основи*}, {*вид покриття*}, {*технологія нанесення покриття*}$>$).

де – $t_1 = T_1$ ( $<p_1$, σ $>$) – тут час обробки залежить від тиску повітря в системі, тобто від сили взаємодії абразиву з матеріалом та від твердості оброблювального матеріалу. Абразив у цьому процесі вважається незмінним і входить до вартості устаткування;

– $M_1 = M_1$ ( $<t_1$, $r_1$, $P_1$, $m_1$, $m_{P1}$, $p_1>$) – матеріальні витрати здебільшого залежать від часу роботи устаткування та його зносостійкості. Ці параметри можна виразити з режиму навантаження та часу роботи. Також залежить від режиму роботи й потужність енергоспоживання. Ці величини можна визначити з робочого тиску повітря в системі та часу роботи системи, який потрібний до досягнення бажаного результату. Матеріальні витрати зводять до скалярної величини через їхню вартість, або за кількістю або за часом використання в процесі.

У випадках нехтування вартістю процесу на користь зменшення часу виробництва, функцією вартості знехтувати повністю не можна, бо устаткування при перенавантажені може вийти з ладу, що зупинить виробничий процес. Тому розрахунок розпадається на оптимізацію за мінімізацією часу з обмеженням на гарантованість залишення устаткування в стані можливості обробити задану кількість деталей.

Залежність вказаних величин можна побачити в табл. 2.

Таблиця 2

*Величини, які враховуватимуться в підготовчому етапі створення виробів із покриттям, а також при відновленні або зміцненні поверхонь деталей*

| № | Назва | Позначення | Залежність |
|---|---|---|---|
| 1 | Час обробки | $t_1$ | Шукане/задане $p_1$, σ, {*вид покриття*}, {*технологія нанесення покриття*} |
| 2 | Тиск повітря в системі обробки | $p_1$ | Шукане $t_1$, σ, {*вид покриття*}, {*технологія нанесення покриття*} |
| 3 | Енергоспоживання устаткування для струменево-абразивної обробки | $P_1$ | Шукане, $p_1$ |
| 4 | Час амортизації устаткування | $r_1$ | Задане, $p_1$ |
| 5 | Вартість устаткування | $m_1$ | Задане |
| 6 | Вартість енергетичних ресурсів та матеріалів | $m_{P1}$ | Задане |
| 7 | Твердість матеріалу, який обробляється | σ | Задане |
| 8 | Хімічний склад основи | {*хімічний склад основи*} | Шукане/задане, з переліку доступних {*вид покриття*}, {*технологія нанесення покриття*} |
| 9 | Вид покриття | {*вид покриття*} | Шукане/задане, з переліку доступних {*хімічний склад основи*}, {*технологія нанесення покриття*} |
| 10 | Технологія нанесення покриття | {*технологія нанесення покриття*} | Шукане/задане, з переліку доступних {*хімічний склад основи*}, {*вид покриття*} |
| 11 | Міцність зчеплення (адгезійна міцність) | $A_1$ | $t_1$, $p_1$, {*хімічний склад основи*}, {*технологія нанесення покриття*}, {*вид покриття*} |

У табл. 2 наведено назви величин, які враховуються в процесі оптимізації технологічної операції струменево-абразивної обробки поверхні для підвищення адгезії $A$ до заданого значення при мінімальних витратах ресурсів. Деякі величини з таблиці мають взаємну залежність, що свідчить про те, що система утворює систему, можливо нелінійних, рівнянь з кількома невідомими. В загальному випадку таку систему розв'язувати аналітично є не доцільним з причини відсутності способів аналітичного розв'язання або значної складності цих методів розв'язання.

Натомість, для вираження групи шуканих параметрів через відомі параметри з виконанням накладених на них обмежень та досягнення мінімального/максимального значення вагової функції, яка виражає обсяг витрат, використовують чисельні методи та аналітичні регресійні поліноми за експериментальними даними, які або дозволяють отримати аналітичний розв'язок або прямо виражають параметри процесу через задані результати та обмеження.

Наступні етапи обробки проводять на однаковому устаткуванні, лише процеси відмінні в матеріалах, які утворюють шар та підшар, а також відрізняються товщиною шару та прошарку.

Прошарок використовується в технології електродугового напилення, коли матеріал поверхневого шару має хімічну несумісність з основним матеріалом, або основний шар не може утворити достатню адгезійну міцність із основним матеріалом. Тому матеріал для утворення прошарку має бути хімічно нейтральним до матеріалу деталі та основного шару і мати достатню адгезію до матеріалів основи та покриття. В особливо важких випадках є виправданим використання прошарку з молібдену або ніхрому, який має високу адгезію з більшістю матеріалів. Важливим є те, що для адгезійного прошарку достатньо нанесення матеріалу шаром в декілька десятків мікрон, тому використання молібдену або ніхрому не призводить до значного зростання вартості процесу. Приведемо результати експериментів з нанесення покриттів методом електродугового напилення [10] (табл. 3).

Таблиця 3

*Величини, які враховуватимуться на етапі електродугового напилення при створенні покриттів при виготовленні деталей або їх відновленні та зміцненні*

| № | Назва | Позначення | Залежність |
|---|---|---|---|
| 1 | Напруга дуги | $U$ | Шукане 28…34 В |
| 2 | Дистанція напилення | $L$ | Шукане 80…200 мм |
| 3 | Діаметр дроту | $d$ | Шукане 1,2…2,2 мм |
| 4 | Товщина прошарку/покриття | $h$ | Шукане<br>0,5…3,0 мм – для покриття<br><0,5 – для прошарку |
| 5 | Тиск в камері | $p$ | Шукане 2..10 МПа |
| 6 | Швидкість ковзання | $v$ | Шукане 2,0…2,75 м/с |
| 7 | Пористість | $\rho$ | Шукане/задане, <10% |
| 8 | Мікротвердість | $\sigma$ | Шукане/задане,<br>6900..73000 МПа |
| 9 | Зносостійкість | $J$ | Шукане/задане,<br>11…15 мкм/км ($10^{-12}$) |
| 10 | Хімічний склад основи | {хімічний склад основи} | Задане, з переліку доступних<br>{вид покриття} |
| 11 | Вид покриття | {вид покриття} | Шукане/задане, з переліку доступних<br>{хімічний склад основи} |

На жаль, моделювання фізико-хімічних процесів при електродуговому нанесенні покриттів є складним, у результаті чого відокремити незалежні параметри майже неможливо. Тому для побудови математичних залежностей для електродугового напилення було використано метод регресійного аналізу на отриманих експериментально даних [10] (табл. 4).

Таблиця 4

*Експеримент з виявлення залежності між керованими та шуканими величинами процесу електродугового напилення*

| **Фактори** | **Напруга дуги** | **Дистанція напилення** | **Діаметр дроту** | **Товщина покриття** | **Навантаження** | **Швидкість ковзання** | **Міцність зчеплення** | **Зносостійкість** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| № експ. | $U$, В | $L$, мм | $d$, мм | $h$, мм | $P$, МПа | $V_{ск}$, м/с | $A$, МПа | $J_h$, мкм/км ($10^{-9}$) |
| 1 | 30 | 140 | 1,6 | 1,5 | 6 | 2,3 | 115 | 0,014 |
| 2 | 32 | 100 | 1,4 | 2,5 | 4 | 2,6 | 90 | 0,013 |
| 3 | 29 | 180 | 2 | 1 | 8 | 2,15 | 120 | 0,013 |
| 4 | 34 | 200 | 1,2 | 2 | 8 | 2 | 95 | 0,014 |
| 5 | 30 | 120 | 1,8 | 0,5 | 2 | 2,45 | 100 | 0,012 |
| 6 | 28 | 160 | 1,6 | 1,5 | 10 | 2,75 | 80 | 0,015 |
| 7 | 31 | 80 | 2,2 | 3 | 4 | 2,3 | 110 | 0,013 |
| 8 | 29 | 160 | 1,2 | 3 | 2 | 2 | 80 | 0,011 |
| 9 | 32 | 100 | 1,8 | 1,5 | 8 | 2,45 | 115 | 0,015 |
| 10 | 31 | 200 | 1,4 | 1 | 6 | 2,6 | 70 | 0,014 |
| 11 | 28 | 140 | 2 | 2,5 | 10 | 2,15 | 90 | 0,015 |
| 12 | 32 | 120 | 1,4 | 1 | 6 | 2,15 | 105 | 0,013 |
| 13 | 29 | 180 | 2 | 2,5 | 2 | 2,6 | 90 | 0,012 |
| 14 | 30 | 80 | 1,6 | 2 | 10 | 2,75 | 120 | 0,015 |
| 15 | 34 | 140 | 2,2 | 0,5 | 4 | 2,3 | 60 | 0,013 |
| 16 | 29 | 120 | 1,2 | 2 | 6 | 2,15 | 75 | 0,012 |

Відповідно до обраного методу реалізації математичної моделі процесу, користувач інформаційної системи повинен мати можливість використовувати аналітичні моделі, табличне задання залежності між величинами, або аналітичні або алгоритмічні методи числових засобів моделювання процесу, який оптимізується.

**Висновки відповідно до статті.** У результаті аналізування руху інформації при проведені оптимізації технологічного процесу на основі ланцюга технологічних операцій виявлено потребу в забезпеченні в інформаційній системі можливості:

– визначення множини технологічних операцій $F_k$;

– забезпечення для кожної з операцій перелік керованих $\vec{X}_k$ та некерованих $\vec{V}_k$ параметрів з їх обмеженнями;

– завдання методів розрахунку близькості виконання поставлених вимог $G(\vec{Y}_k)$;

– завдання методів розрахунку часових та матеріальних витрат по кожній технологічній операції за формулами (7) або (8);

– забезпечення таблично, аналітично або комп'ютерним симулюванням реалізації методів моделювання технологічних операцій (3).

У результаті аналізу технологічних операцій підготовки поверхні деталей методом струменево-абразивної обробки, з метою підвищення адгезії покриття з основою, та нанесення електродуговим методом підшарку та шару основного покриття, виділено величини, які можуть виступати як характеристики результатів технологічної операції та як керовані

параметри технологічних операцій. Зазначено необхідність підтримки в інформаційній системі визначення залежностей між величинами аналітичними методами, таблично, алгоритмічно та за допомогою імітаційних моделей. Розглянуті інформаційні одиниці є функціонально різними, деякі величини мають здатність змінювати функціональну здатність переходом від шуканих величин до обмежень на технологічну операцію, що накладає на систему керування змінними додаткові функціональні можливості та універсальність до трансформації моделювання технологічного процесу.

## Список використаних джерел

1. Хох В. Д., Мелешко Є. В., Якименко М. С. Дослідження методів побудови експертних систем. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2016. Вип. 4(40). С. 48–52.

2. Скрипка К. І., Зенкин М. А. Експертна система автоматизованого вибору способів відновлення спрацьованих деталей. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. 2004. № 1 (28). С. 66–68.

3. Лимаренко В. В. Інформаційна система підтримки рішень для автоматизації створення технологічних процесів механообробки деталей високоточного обладнання: дис. … канд. техн. наук / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2019.

4. Анфёров М. А., Селиванов С. Г. Структурная оптимизация технологических процессов в машиностроении. Уфа: Гилем, 1996. 185 с.

5. Балдин К. В., Уткин В. Б. Информационные системы в экономике: учебник. 5-е изд. Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К0», 2008. 395 с.

6. Искусственный интеллект. Кн. 1. Системы общения и экспертные системы / под ред. Э. В. Попова. Москва: Радио и связь, 1990. 464 с.

7. Корнеев В. В., Гарев А. Ф., Васютин С. В., Райх В. В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. Нолидж, 2000. 352 с.

8. Макарчук Т. А., Минаков В. Ф., Щугорева В. А. Облачные решения построения информационных систем управления ресурсами организации. *Research Journal of International Studies*. 2014. № 1 (20). С. 68–69.

9. Харламов Ю. О., Романченко О. В., Міцик А. В. Міцність зчеплення детонаційно-газових покриттів на основі карбідів вольфраму та хрому. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 1 (249). С. 99–107.

10. Ворона Т. В. Підвищення зносостійкості сталевих газотермічних покриттів електроконтактною обробкою з використанням вуглецевовмісних наповнювачів: дис. … канд. техн. наук / Національна академія наук України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля. Київ, 2016.

## References

1. Khokh, V. D., Meleshko, Ye. V., Yakymenko, M. S. (2016). Doslidzhennia metodiv pobudovy ekspertnykh system. [Research of methods of construction of expert systems]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Control, navigation and communication systems,* 4 (40), 48–52 [in Ukrainian].

2. Skrypka, K. I., Zenkyn, M. A. (2004). Ekspertna systema avtomatyzovanoho vyboru sposobiv vidnovlennia spratsovanykh detalei [Expert system for automated choice of ways to recover parts]. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni nauky – Bulletin. Engineering sciences*, 1 (28), 66–68 [in Ukrainian].

3. Lymarenko, V. V. (2019). *Informatsiina systema pidtrymky rishen dlia avtomatyzatsii stvorennia tekhnolohichnykh protsesiv mekhanoobrobky detalei vysokotochnoho obladnannia [Information support system for automation of creation of technological processes for machining parts of high-precision equipment]*. (Candidate`s thesis). National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv [in Ukrainian].

4. Anferov, M. A., Selivanov, S. G. (1996). *Strukturnaia optymyzatsyia tekhnolohycheskykh protsessov v mashynostroenyy [Structural optimization of technological processes in mechanical engineering]*. Ufa: Guelem [in Russian].

5. Baldyn, K. V., Utkin, V. B. (2008). *Informatsyonnye sistemy v ekonomike [Information systems in economics]* (5th ed.). Moscow: Dashkov & K0 Publishing and Trading Corporation [in Russian].

6. Popov, T. V. (1990). Iskusstvennyi yntellekt. Kn. 1. *Systemy obshcheniia i ekspertnye sistemy [Artificial intelligence. Book. 1. Communication systems and expert systems]*. Moscow: Radio and Communication [in Russian].

7. Korneev, V. V., Garev, A. F., Vasiutin, S. V., Raikh V. V. (2000). *Bazy dannykh. Intellektualnaia obrabotka informatii [Databases. Intelligent processing of information]*. Nolidge [in Russian].

8. Makarchuk, T. A., Mynakov, V. F., Shchuhoreva, V. A. (2014). Oblachnыe reshenyia postroenyia ynformatsyonnыkh system upravlenyia resursamy orhanyzatsyy [Cloud solutions for building information systems for managing an organization's resources]. *Research Journal of International Studies*, 1 (20), 68–69 [in Ukrainian].

9. Kharlamov, Yu. O., Romanchenko, O. V., Mitsyk, A. V. (2019). Mitsnist zcheplennia detonatsiino-hazovykh pokryttiv na osnovi karbidiv volframu ta khromu [The adhesive strength of detonation-gas coatings based on tungsten carbides and chromium]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Bulletin of the East Ukrainian National University named after Vladimir Dahl*, 1 (249), 99–107 [in Ukrainian].

10. Vorona, T. V. (2016). *Pidvyshchennia znosostiikosti stalevykh hazotermichnykh pokryttiv elektrokontaktnoiu obrobkoiu z vykorystanniam vuhletsevovmisnykh napovniuvachiv [Increase of wear resistance of steel gas-thermal coatings by electro-contact processing with use of carbon-containing fillers]*. (Candidate`s thesis). National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Superhard Materials. V. M. Granny, Kyiv [in Ukrainian].

*UDC 004.78:004.056*

*Tetiana Smirnova*

## FORMALIZATION AND IMPLEMENTATION OF THE STRUCTURE OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ELECTRIC ARC SPRAYING FOR THE OPTIMIZATION EXPERTS SYSTEM

***Relevance of the research topic.*** *Currently, any industry requires the use of information technology. Reinforcement and restoration of parts is no exception. In this paper, we consider formalization and propose the implementation of the structure of the technological process of electric arc spraying for an optimization expert system.*

***Formulation of the problem.*** *The combinatorial complexity of the process has four possible options. For such a number of options, it is advisable to carry out optimization for four chains of technological operations, with the choice of the result that will have the best result in terms of weight function. Analysis of the movement of information during the optimization of the technological process on the basis of the chain of technological operations revealed the need for support in the information system is an urgent task. Also relevant is the need for support in the information system for determining the dependencies between values by analytical methods, tabularly, algorithmically and using simulation models.*

***Analysis of recent research and publications****. Currently, information systems for decision support are being actively developed to ensure the optimization of individual technological processes. There are not enough systems to solve the problem of constructing an optimized technological process chain and systems for choosing a more optimal technological process. An analysis of recent studies and publications has shown that the issues of using information technologies in the form of relevant expert systems in technological processes are very relevant. Therefore, the problem of optimizing the process chain in the information support of expert systems is relevant.*

***Highlighting previously unresolved parts of a common problem****. Information units are functionally different, some quantities have the ability to change the functional ability by moving from the desired values to the restrictions on the technological operation, imposes additional functionality and versatility on the variable management system to the transformation of the process simulation.*

*The aim of the article is to formalize and implement the structure of the technological process of electric arc spraying for an optimization expert system.*

***Statement of the main material.*** *The formalization of the technological process of electric arc spraying is made and the implementation of the structure of the technological process of electric arc spraying for the optimization expert system is proposed.*

***Conclusions.*** *As a result of the analysis of the movement of information during the optimization of the technological process on the basis of the chain of technological operations, the need for providing an information system is identified.*

***Keywords.*** *Technological process; electric arc spraying; expert system.*

*Fig.: 2. Table: 4, References: 10.*

**Смірнова Тетяна Віталіївна** – кандидат технічних наук, докторант Центральноукраїнського національного технічного університету (просп. Університетський, 8, м. Кропивницький, 25006, Україна).
**Smirnova Tetiana** – PhD in Technical Sciences, Doctoral Central Ukrainian National Technical University (8 University Av., 25006 Kropyvnytskyi, Ukraine).
**E-mail:** sm.tetyana@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6896-0612

Смірнова Т. Формалізація та реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 104-113.

*УДК 519.9:004.681*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-114-123*

*Володимир Хорошко, Михайло Шелест, Юлія Ткач*

# БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЄКТІВ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ

***Актуальність теми дослідження.*** *Багатокритеріальна оцінка ефективності проєктів є актуальним завданням у сфері кібербезпеки.*

***Постановка проблеми.*** *Виникла нагальна потреба в різносторонньому та багатоаспектному оцінюванні ефективності проєктів із забезпечення кібербезпеки на різних етапах (при відборі проєктів, коли робота над ними ще не починалась, у процесі проведення робіт із виконання проєктів з метою оптимізації менеджменту та після виконання проєктів та коли дослідження завершені й можливо прослідкувати результати впровадження цих досліджень). Проте комплексна методика оцінки відсутня.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Зазвичай задачі оцінки та оптимізації об'єднують, вважаючи, що кінцева ціль полягає у зіставленні оцінок декількох альтернатив і вибір кращих із них. При такій постановці не розглядається випадок оцінки єдиного проєкту.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Методику, яка дала б можливість отримання нормованої оцінки одного проєкту безвідносно до наявності (або відсутності) інших проєктів, нині не запропоновано.*

***Постановка завдання.*** *Розроблена методика призначена для вирішення актуального завдання проведення системного аналізу й отримання багатосторонньої характеристики проєктів, підвищення достовірності висновків про наукову значущість результатів, про соціальну й економічну ефективність запланованих і виконаних робіт у кібербезпеці.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Задача оцінювання складних об'єктів і процесів передбачають зіставлення безлічі різних, зазвичай суперечливих властивостей, що дає підстави віднести ці задачі до класу багатокритеріальних. Вирішення багатокритеріальних задач є утрудненим унаслідок складності їх формулювання. Розроблена методика багатокритеріальної оцінки ефективності проєктів із забезпечення кібербезпеки дає можливість проведення системного аналізу й отримання багатокритеріальної характеристики проєкту, підвищення достовірності висновків отриманих результатів про соціальну та економічну ефективність запланованих і виконуваних робіт у галузі інформаційної безпеки. За допомогою запропонованої методики вирішуються завдання формування системи критеріїв та показників ефективності забезпечення кібербезпеки; побудови формалізованої аналітичної і якісної оцінки забезпечення кібербезпеки за сукупністю критеріїв якості; візуалізованого представлення оцінки проєкту. У перспективі припускається використовувати отримані результати для оцінки ефективності проєктів в інших предметних галузях. Методика неприйнятна в тих випадках, коли якісні показники принципово не зводяться до кількісних (числових) величин і не можуть бути виміряні за існуючими шкалами. Методику не можна використовувати без додаткової модифікації, якщо є такі критерії, які можуть приймати тільки дискретні (цілочисельні) значення.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Розроблену методику при деякій модифікації можна застосовувати у різних галузях, зокрема у сфері кібербезпеки, як на етапі відбору проєктів, так і в процесі проведення робіт з виконання проєктів, а також після виконання проєктів.*

***Ключові слова:*** *кібербезпека; багатокритеріальна оцінка; ефективність проєктів.*
*Рис.: 1. Табл.: 5. Бібл.: 11.*

**Актуальність теми дослідження.** Завдання оцінювання ефективності забезпечення кібербезпеки – важлива проблема, від успішного вирішення якої залежить достовірність висновків про захищеність об'єкта, про економічність і фізичну ефективність робіт, що заплановані та виконані.

**Постановка проблеми.** Комплексна оцінка ефективності проєктів із забезпечення кібербезпеки сприятиме вирішенню актуального завдання проведення системного аналізу й отримання багатосторонньої характеристики проєктів, підвищення достовірності висновків про наукову значущість результатів, про соціальну й економічну ефективність запланованих і виконаних робіт у кібербезпеці.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Задача оцінювання складних об'єктів і процесів передбачають зіставлення безлічі різних, зазвичай суперечливих властивостей, що дає підстави віднести ці задачі до класу багатокритеріальних [1; 2]. Відомо, що вирішення багатокритеріальних задач є утрудненим унаслідок складності їх формулювання.

Для створення високоякісної збалансованості програми із забезпечення кібербезпеки зазвичай використовується метод експертних оцінок. До процесу оцінювання долучаються найбільш кваліфіковані вітчизняні й закордонні експерти. Участь закордонних експертів не завжди використовується, оскільки питання, пов'язані із забезпеченням кібербезпеки, мають певний рівень секретності.

Формування програми починається з підготовки та оголошення конкурсу про можливість участі в дослідженнях. За цими заявкам визначається кількість учасників, а також наукові й технічні галузі знань, за якими необхідно створювати експертні комісії.

© Хорошко В. О., Шелест М. Є., Ткач Ю. М., 2020

Комісія обговорює сильні і слабкі сторони проєктів, обсяг розглянутих задач і ранжує проєкти згідно із запропонованими критеріями на підставі консенсусу. Комісія може також рекомендувати проєкти, які найкраще задовольняють цілям програми.

У монографії [3] розглянуто загальний випадок розробки технології підтримки прийняття рішень, коли потрібно вибрати альтернативу з множини неоднорідних альтернатив, для яких не можна сформувати єдину множину кількісних критеріїв оцінки. У цьому випадку задачі вирішуються методами, заснованими на ієрархічному цільовому оцінюванні альтернатив, без залучення критеріального аналізу. Водночас є великий клас задач прийняття рішень, коли для оцінки альтернатив можна залучити кількісні (або ті, що зводяться до них) критерії, які допускають операції в нормалізованому критеріальному просторі. Для таких задач застосовна теорія багатокритеріальної оцінки й оптимізації.

При формалізації рішення багатокритеріальних задач можна керуватися різними принципами. Концепція Чарнза-Купера [4] заснована на принципі «ближче до ідеальної (утопічною) точки». Різновид цієї концепції – метод TOPSIS (Technique for Preference by Similarity to the Ideal Solution) – метод наближення до ідеального розв'язання [5]. Загальний недолік методів, заснованих на цьому принципі, – громіздкість і можливість порушення обмежень. Цих недоліків позбавлений принцип «подалі від обмежень» [1].

У процесі дослідження багатокритеріальних задач особа, що приймає рішення (ОПР), керується своїм набором індивідуальних переваг, який формально відбивається деякою функцією корисності (цінності) в критеріальному просторі [6] або, іншими словами, схемою компромісів, скалярною згорткою векторного критерію [1]. Можливі різні апроксимації функції корисності. Найбільш поширений метод простого адитивного зважування (SAW (Simple Additive Weightiny) [7]. Однак слід мати на увазі, що це лише лінійне наближення критеріальної функції і в ситуаціях, що відрізняються від базової, яке може призводити до істотних спотворень. А найголовніше - лінеаризація критеріальної функції не дозволяє вирішувати багатокритеріальну задачу формально, без безпосередньої участі ОПР.

Для зменшення впливу суб'єктивності передбачається використовувати формалізований апарат скалярної згортки критеріїв на основі концепції нелінійної схеми компромісів [1].

Адекватні методи дослідження багатокритеріальних задач використовують залучення в тому чи іншому вигляді фахівця (експерта), що є компетентним в цій предметній галузі [3; 8]. У роботі експертні методи використовуються тільки для визначення розмірності і якісного складу вектора критерію, а також для кількісної оцінки значень частинних критеріїв (кардинальні оцінки).

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Незважаючи на численні дослідження в напрямі методик прийняття рішень та оцінювання ефективності, досі не запропоновано комплексну методику багатокритеріальної оцінки ефективності проєктів, зокрема в галузі кібербезпеки.

**Мета статті.** Головною метою роботи є розробка комплексної методики багатокритеріальної оцінки ефективності проєктів із забезпечення кібербезпеки.

**Виклад основного матеріалу.** Зазвичай задачі оцінки та оптимізації об'єднують, вважаючи, що кінцева мета полягає в зіставленні оцінок декількох альтернатив і вибір кращих із них. При такій постановці не розглядається випадок оцінки єдиного проєкту. Відмінна риса запропонованої методики – можливість отримання нормованої оцінки одного проєкту, безвідносно до наявності (або відсутності) інших проєктів.

Ефективність проєктів оцінюється в трьох випадках:

1. При відборі проєктів, коли робота над ними ще не починалась.
2. У процесі проведення робіт із виконання проєктів з метою оптимізації менеджменту.
3. Після виконання проєктів, коли дослідження завершені й можливо прослідкувати результати впровадження цих досліджень.

Розроблену методику при деякій модифікації можна застосовувати в усіх згаданих випадках, але в деякій роботі ми зосередимо увагу на оцінці ефективності виконаних проєктів із забезпечення кібербезпеки.

За допомогою запропонованої методики розв'язуються такі задачі:

- формування системи критеріїв та показників ефективності забезпечення кібербезпеки;
- розробка формалізованої аналітичної і якісної оцінки забезпечення кібербезпеки за сукупністю критеріїв якості (при цьому базовою є така постановка задачі: дано – об'єкт оцінки, ефективність захисту якого характеризуються x-мірним вектором критеріїв $y = \{y_k\}^s{}_{k=1}$, потрібно знайти узагальнену аналітичну оцінку ефективності (якості) захищеності об'єкту $Y(y)$ і його якісну оцінку;
- візуалізоване представлення оцінки проєкту.

Для аналізу ефективності проєктів із забезпечення кібербезпеки нами розроблені форми подання комплексної інформації організаціями-виконавцями. Крім того, за бажанням експерта в їх розпорядження надаються технічні завдання, звіти, календарні плани та інші необхідні матеріали й документи по проєкту, що оцінюється. Для процедури експертизи проєктів у галузі кібербезпеки й отримання відповідей експертів розроблена типова форма – анкета. Форми та анкети – це рамочні документи, у кожному конкретному випадку показники можуть модифікуватись, виключатись або додаватися. Усе залежить від об'єкта, експертиза захищеності якого проводиться.

Можливості розробленої методики дозволяють здійснювати комплексну оцінку ефективності проєктів при кількості показників якостей від одиниць до декількох десятків.

Методика неприйнятна в тих випадках, коли якісні показники принципово не зводяться до кількісних (числових) величин і не можуть бути виміряні за наявними шкалами. Методику не можна використовувати без додаткової модифікації, якщо є такі критерії, які можуть приймати тільки дискретні (цілочисельні) значення.

Поставлені задачі розв'язуються багатокритеріальним методом з отриманням вихідних даних шляхом експертних оцінок. Експертна інформація для формування системи критеріїв та для оцінки частинних критеріїв ефективності проєктів із забезпечення кібербезпеки формується шляхом анкетного опитування за оціночними шкалами. Масив даних використовується як вихідний матеріал для розрахунку аналітичних оцінок якості, а також для побудови графічного образу ефективності проєкту й отримання якісних характеристик. Багатокритеріальна оцінка здійснюється як за традиційною нелінійною схемою компромісів [2; 4; 5], так і методом вкладених скалярних згорток векторного критерію [9]. В останньому випадку проєкти аналізуються і оцінюється за агрегованими критеріями, що робить аналіз випуклим та контрастним.

Оцінка ефективності проєкту починається з формування групи організаторів експертизи, в чиї обов'язки входить:

– вибір фахівців-експертів;
– розробка (і за необхідності узгодження з експертами) переліку критеріїв та показників ефективності;
– складання опитувальних листків (форм-анкет);
– проведення опитування експертів;
– аналіз і обробка інформації, отриманої від експертів;
– отримання і візуалізація оцінок за окремими (частинними) критеріями, групами критеріїв (агрегованих оцінок) і повною сукупністю критеріїв (узагальнена аналітична оцінка);
– отримання якісних характеристик проєкту.

Як експерти залучаються висококваліфіковані фахівці в галузі, що розглядається. Кількість експертів обумовлюється складністю задачі, яка розв'язується.

Організатори експертизи роблять попередній список критеріїв, який дозволяє оцінити якість проєкту забезпечення кібербезпеки.

Критерії структуруються за групами:

1. Загальні критерії.
2. Критерії науково-технічного розвитку.

3. Фінансово-економічні критерії.
4. Соціальні критерії.
5. Критерії забезпечення завдань оборони й безпеки.
6. Екологічні критерії.

Після консультації з експертами організатори експертизи включають у кожну групу конкретні критерії. Якщо всі експерти з отриманим списком згодні, і не вносять доповнень, то на цьому цей етап закінчується.

Якщо ж експерти вносять у початковий список додаткові критерії або мають сумнів щодо вже внесених, то відбувається етап ранжування критеріїв.

Щоб виявити дійсно значущі частинні критерії, експертам пред'являють (кожному окремо) складений ними первинний список. Їм пропонується вивчити список і вибрати з нього найбільш важливі, на думку експерта, частинні критерії, проранжувавши їх за важливістю. Критерії, які отримали найменшу суму рангів, виділяються в остаточний список. Кількість виділених критеріїв залежить від багатоаспектності проєкту (зазвичай їх буває від двох до семи в кожній групі). Необхідно, щоб різниця між кількістю голосів, відданих найменш важливому з виділених критеріїв і найбільш важливому з перерахованих, була щонайбільшою. Для агрегування може бути використаний також метод Кондорсе [3].

Виділені показники в усіх групах являють собою вихідну систему частинних критеріїв, з яких формується узагальнений критерій якості оцінюваного проєкту.

Експертам (кожному окремо) надається розроблена форма-анкета. У ній у складі рубрик за групами критеріїв перераховуються частинні критерії, виділені на попередньому етапі. Критеріям зіставляється неперервна шкала, розділена на 10 інтервалів. Цифра 0 на шкалі відповідає поняттю «ніякої цінності», цифра 10 – «максимальна цінність». Експерта просять оцінити вплив кожного з частинних критеріїв на ефективність проєкту й визначити для кожного критерію відповідну точку на шкалі.

Аналіз процесів прийняття рішень показав, що при оцінці об'єктів за шкалою балів експерти керуються так званою фундаментальною шкалою [3; 7] (табл. 1). У термінах теорії нечітких множин фундаментальна шкала являє собою функцію належності, за допомогою якої здійснюється перехід від лінгвістичної змінної (задовільна якість, висока якість і т. ін.) до кількісних оцінок (відповідно 5,5; 7,0) за шкалою балів, тобто перехід від нечітких якісних градації до чисел і навпаки.

Таблиця 1

*Таблиця переходу від нечітких якісних градації до чисел і навпаки*

| **Категорія якості** | **Фундаментальна шкала $f$** | **Перетворена нормована фундаментальна шкала $y_0, Y_0, \Phi_0$** |
|---|---|---|
| Неприйнятне | 0-3 | 1,0-0,7 |
| Низьке | 3-5 | 0,7-0,5 |
| Задовільне | 5-6 | 0,5-0,4 |
| Добре | 6-8 | 0,4-0,2 |
| Високе | 8-10 | 0,2-0,0 |

Після заповнення експертами анкети повертаються до організаторів експертизи й обробляється. Масив отриманих від експертів даних – це сукупність чисел $f_{ik}$, що являють собою оцінку, дану $f$-м експертом k-му критерієм за шкалою анкети, j∈ $[1, m]$, $m$ – кількість експертів. Розраховується усереднена оцінка, дана колективом експертів за кожним критерієм:

$$f_k = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} f_{jk},\ k\in[1,s], \quad (1)$$

де $s$ – кількість критеріїв. Оцінки $f_k$ – досить об'єктивна, якщо кількість експертів велика та склад їх досить однорідний (у складніших випадках застосовують методику обробки експертних оцінок з урахуванням коефіцієнтів компетентності експертів) [1; 2; 6].

При розгляданні експертами деяких критеріїв можливий випадок, коли вони вагаються з оцінкою і у відповідній графі ставлять прочерк. Тоді при розрахунку оцінки за формулою (1) замість величини $m$ використовується число $m_k$, $m_k \le m$ що дорівнює

реальній кількості експертів, які брали участь в оцінці критеріїв. Нормовані оцінки за мінімізованими частинними критеріями отримуються з (1) за формулою:

$$y_{ok} = 1 - 0{,}1f_k,\ 0 \leq y_{ok} < 1,\ k \in [1,s]. \quad (2)$$

Символ «0» тут і далі відмічається нормована оцінка. Нормованим мінімізованим критеріям зіставляються перетворена нормована фундаментальна шкала (табл. 1). Сукупність нормованих критеріїв $y_{ok}$ є вихідною для аналітичної багатокритеріальної оцінки проєкту відповідно до концепції нелінійної схеми компромісів [1; 6].

Для різнобічної характеристики оцінюваних проєктів використовується два види методів багатокритеріальної оцінки – це традиційний і агрегований.

Узагальнена аналітична оцінка проєкту щодо забезпечення кібербезпеки традиційним методом із використанням скалярної згортки по нелінійній схемі компромісів [1] здійснюється за формулою:

$$Y(y_0) = \sum_{k=1}^{s} (1 - y_{ok})^{-1}. \quad (3)$$

У задачі аналізу абсолютна величина $Y(y_0)$ ще нічого не говорить про те, наскільки відповідає завданню або не відповідає цей проєкт.

Для відповіді на це питання розв'язуємо задачу переходу від чисельної оцінки $Y(y_0)$ до лінгвістичної категорії «добре – неприйнятне».

Насамперед нормуємо аналітичну оцінку так, щоб при неприйнятних проєктах, нормована оцінка $Y(y_0)$ наближалася до оцінки одиниці, а при хороших до нуля:

$$Y_0(y_0) = \frac{Y(y_0)}{Y_{max}}, \quad (4)$$

де $Y_{max}$ – гранично погана аналітична оцінка для проєкту, що розглядається.

Для визначення величини $Y_{max}$ скористаємося принципом солідарної відповідальності. У застосуванні до нашої задачі він полягає в наступному.

В інтервалі неприйнятних оцінок (0,7-1,0) перетвореної нормованої фундаментальної шкали вибираємо деяку величину $y_{0max}$, яку реально може досягти будь-який із нормованих частинних критеріїв при неприйнятно поганій якості за даним критерієм. Відзначимо, що цю величину потрібно підібрати так, щоб правильно оцінювалися тестові приклади (налаштування вирішального правила).

Відповідно до принципу солідарності відповідальності, якщо який-небудь нормований критерій досяг величини $y_{0max}$, то і решті нормованим критеріям приписується можливість досягнення такого ж значення. Якщо це так, то величина $Y_{max}$ можна визначити за формулою:

$$Y_{max} = S(1 - y_{omax})^{-1}$$

Нормована аналітична оцінка проєкту $Y_0$ також вимірюється за перетвореною нормованою фундаментальною шкалою (табл. 1), яка в термінах теорії нечітких множин являє собою функцію належності. З її допомогою виконується перехід від числа $Y_0$ до відповідної якісної градації .

Інформативність оцінок проєкту за допомогою агрегованого методу може бути підвищена за рахунок об'єднання частинних критеріїв у групи й формування агрегованих критеріїв за методом вкладених скалярних згорток [9].

Оцінки за агрегованими критеріями обчислюються відповідно до формули:

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^{J} \left(1 - y_{oij}\right)^{-1},\ i \in [1, I], \quad (5)$$

де $\varphi_i$ – це оцінки за агрегованими критеріями; $y_{oij}$ – нормовані оцінки за окремими критеріями; I – кількість груп; $J_i$ – кількість вихідних частинних критеріїв у цій групі.

Узагальнена нормована оцінка за агрегованими критеріями визначається за формулою:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{I} \frac{1}{1 - \varphi_{0i}}, \quad (6)$$

якщо агреговані оцінки нормовані за формулою:

$$\varphi_{oi}=\frac{\varphi_i}{B_i},\ i\in[1,I].$$

У цій формулі $B_i = J_i\,(1-y_{omax})^{-1}$ є неприйнятно погана оцінка $\varphi_{omax}$ агрегованого критерію $\varphi_{oi}$ в кожній групі. Причому $\varphi_{omax} = y_{omax}$.

Отримана аналітична оцінка нормується за формулою:

$$\Phi_o = \frac{\Phi}{\Phi_{max}}, \quad (7)$$

це $\Phi_{max}$=I $(1-y_{omax})^{-1}$ – неприйнятно погана величина оцінки $\Phi_o$.

Нормована аналітична оцінка проєкту за агрегованими критеріями $\Phi_o$ також вимірюється за перетвореною нормованою фундаментальною шкалою (табл. 1), і на підставі цього виміру виходить якісна характеристика проєкту. Зазвичай оцінки $\Phi_o$ та $Y_o$ наближені один до одного, але за наявності значних «викидів» нормованих частинних критеріїв оцінка $\Phi_o$ більша.

Оцінки за вектором критеріїв якості графічно представляються у вигляді «профілю проєкту». Вихідною інформацією для його побудови слугує сукупність нормованих критеріїв $y_{ok}$. Профіль дозволяє створювати цілісний образ проєкту, що оцінюється, щодо забезпечення кібербезпеки, що може виявитися вельми корисним, наприклад, при експрес-оцінках.

Програмне забезпечення для оцінки кібербезпеки об’єкта складається з 4 блоків:

1. Інформаційні дані про проєкт забезпечення кібербезпеки.
2. Організація процедури експертизи проєкту.
3. Обробка результатів експертизи проєкту.
4. Висновок і візуалізація результатів оцінки проєкту.

Управління програмою виконується ПЕОМ і складається із введення даних і команд на виконання розрахункових процедур у відповідні інформаційні поля.

Блок «Інформаційні дані про проєкт забезпечення кібербезпеки» містить:

- поля для введення назви проєкту, найменування організації-виконавця, дані про терміни виконання проєкту та обсяги фінансування;
- типову форму (анкету) представлення інформації, заповнену виконавцями проєкту.
- технічне завдання, звіт та інші відомості про проєкт.

Блок «Організації процедури експертизи проєкту» включає:

- список фахівців-експертів і відомості про них;
- анкету для проведення експертизи.

Блок «Обробки результатів експертизи проєкту» накопичує відповіді експертів, формує масив даних для подальшої обробки, визначає розмірність вектора частинних критеріїв, кількість груп критеріїв, кількість критеріїв у групах, а також виконує на основі формул розрахунок різних категорій оцінок ефективності проєкту.

Блок «Висновок і візуалізація результатів оцінки проєкту» здійснює видачу результатів розрахунку різних категорій оцінок ефективності проєкту, а також будують «профіль проєкту».

За допомогою запропонованої методики був проведений системний аналіз та отримано багатокритерійну оцінку кібербезпеки ситуаційного центру одного з міністерств України [10; 11].

У процесі консультацій з експертами визначено чотири групи з раніше перелічених критеріїв (I = 4), що включають 20 критеріїв (S = 20) оцінки цього проєкту оцінки кібербезпеки – загальні, наукового розвитку, економічні та соціальні. Чотири провідні фахівці в галузі інформаційної безпеки (m = 4) заповнили анкету (табл. 2).

Таблиця 2

*Анкета експертів*

| № критерію | Критерії оцінки якості проєкту | К-ть балів за 10-бальною шкалою |
|---|---|---|
| 1. Загальні критерії | | |
| | Ясність і чіткість формування цілей проєкту | Оцінка експерта |
| 1 | Міра відповідності проєкту поставленим цілям | |
| 2 | Ступінь повноти реалізації проєкту | |
| 3 | Ступінь інтеграції проєкту в Національну програму кібербезпеки | |
| 4 | Ступінь сприяння підвищенню престижу організації | |
| 2. Критерії наукового розвитку | | |
| 5 | Ступінь новизни у виконаній роботі | Оцінка експерта |
| 6 | Міра оригінальності та новизни поставлених цілей і отриманих результатів | |
| 7 | Міра сприяння розвитку методів та засобів забезпечення кібербезпеки | |
| 8 | Міра сприяння результатів проєкту появи нових методів забезпечення кібербезпеки | |
| 9 | Частина досліджень у проєкті, які виконані на світовому рівні | |
| 10 | Заходи сприяння розвитку знань про механізми забезпечення кібербезпеки | |
| 11 | Вплив проєкту на перспективу розвиток методів забезпечення кібербезпеки | |
| 12 | Міра висвітлення робіт із кібербезпеки в науковій літературі | |
| 13 | Міра популяризації та поширення знань про кібербезпеки | |
| 14 | Можливість використання результатів роботи при підготовці й перепідготовці фахівців із кібербезпеки | |
| 3. Економічні критерії | | |
| 15 | Рівень впровадженості результатів розробки в практику | Оцінка експерта |
| 16 | Рівень повноти передачі розроблених методів для застосування на критично важливих об’єктах | |
| 17 | Сприяння в залученні матеріальних ресурсів | |
| 4. Соціальні критерії | | |
| 18 | Вплив результатів розробки на Національну програму кібербезпеки | Оцінка експерта |
| 19 | Рівень можливості використання отриманих результатів при підготовці та перепідготовці фахівців із кібербезпеки | |

Відповіді експертів зведені в табл. 3. Лівий стовпчик таблиці відповідає порядковому номеру критерію, відповідно тому номеру, який цей критерій має в анкеті. Нормовані значення частинних критеріїв отримані за формулою (1) і (2). Узагальнена аналітична оцінка проєкту класичним методом, обчислена за формулами (3) та (4). Розрахунок ефективності проєкту за агрегованими критеріями виконано за формулами (5) та (7).

Таблиця 3

*Оцінки експертів*

| № критерію | Оцінки експертів | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1-й експерт | 2-й експерт | 3-й експерт | 4-й експерт |
| 1. | 9 | 10 | 10 | 10 |
| 2. | 9 | 10 | 10 | 10 |
| 3. | 6 | 8 | 9 | 10 |
| 4. | - | 8 | 6 | 9 |
| 5. | 8 | 10 | 9 | 9 |
| 6. | 7 | 10 | 10 | 9 |
| 7. | 7 | 10 | 9 | 9 |
| 8. | 9 | 8 | 9 | 10 |
| 9. | 7 | 9 | 10 | 9 |
| 10. | - | 9 | 8 | 9 |
| 11. | 10 | 8 | 8 | 10 |
| 12. | 8 | 10 | 9 | 9 |
| 13. | 7 | 8 | 7 | 8 |
| 14. | 8 | 7 | 8 | 8 |
| 15. | 9 | 6 | 8 | 8 |
| 16. | 8 | 8 | 9 | 7 |
| 17. | 8 | 7 | 6 | 5 |
| 18. | 9 | 9 | 10 | 4 |
| 19. | 8 | 7 | 8 | - |
| 20. | 9 | 8 | 7 | 4 |

Отримано чотири види результатів:

1) аналітична нормована оцінка проєкту із забезпечення кібербезпеки ситуаційного центру традиційним методом;

2) якісна оцінка проєкту із забезпечення кібербезпеки ситуативного центру традиційним методом за перетвореною нормованою фундаментальною шкалою;

3) аналітична нормована оцінка проєкту із забезпечення кібербезпеки ситуаційного центру агрегованих методом;

4) якісна оцінка проєкту із забезпечення кібербезпеки ситуаційного центру агрегованих методом за перетвореною нормованою фундаментальною шкалою.

Результати розрахунку ефективності проєкту із забезпечення кібербезпеки ситуаційного центру традиційним методом наведені в табл. 4, агрегованим – у табл. 5.

Таблиця 4

*Результати розрахунку ефективності проєкту із забезпечення кібербезпеки ситуаційного центру традиційним методом*

| № критерію | Значення $y_o$ нормованих оцінок за частинним критерієм |
|---|---|
| 1. | 0,025 |
| 2. | 0,025 |
| 3. | 0,175 |
| 4. | 0,267 |
| 5. | 0,100 |
| 6. | 0,100 |
| 7. | 0,125 |
| 8. | 0,100 |
| 9. | 0,125 |
| 10. | 0,133 |
| 11. | 0,100 |
| 12. | 0,100 |
| 13. | 0,250 |
| 14. | 0,225 |
| 15. | 0,225 |
| 16. | 0,200 |
| 17. | 0,350 |
| 18. | 0,200 |
| 19. | 0,233 |
| 20. | 0,300 |

Таблиця 5

*Результати розрахунку ефективності проєкту із забезпечення кібербезпеки ситуаційного центру агрегованим методом*

| № експерта | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| Значення $\varphi_o$ нормованих агрегованих оцінок | 0,287 | 0,295 | 0,337 | 0,342 |

Графічні результати представлені «профілем проєкту» (рис. 1). На рис. 1 по осі абсцис відкладені номери частинних критеріїв відповідно до лівого стовпчика анкети.

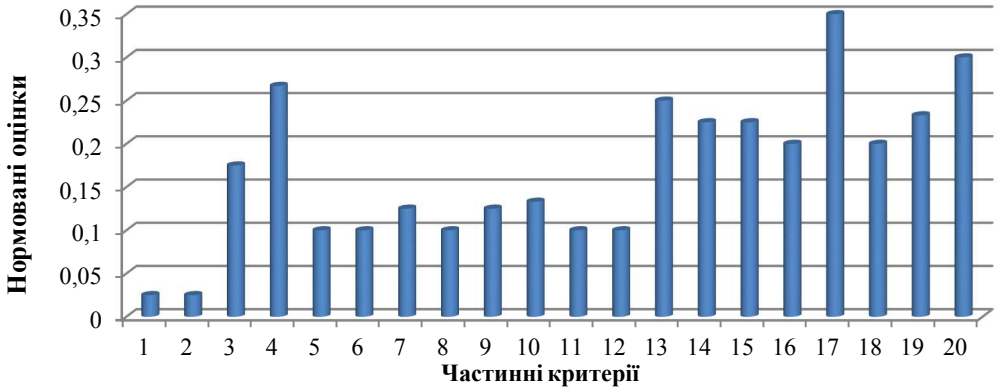



*Рис. 1. Графічні результати за «профілем проєкту»*

**Висновки відповідно до статті.** Комплексна методика багатокритеріальної оцінки ефективності проєктів із забезпечення кібербезпеки дає можливість проведення системного аналізу й отримання багатокритеріальної характеристики проєкту, підвищення достовірності висновків отриманих результатів про соціальну та економічну ефективність запланованих і виконуваних робіт у галузі інформаційної безпеки. У перспективі припускається використовувати отримані результати для оцінки ефективності проєктів в інших предметних галузях.

## Список використаних джерел

1. Воронин А. Н. Многокритериальный синтез динамических систем. Київ: Наукова думка, 1992. 160 с.
2. Жуковский В. И., Молоствов В. С. Многокритериальное принятие решений в условиях неопределенности. Москва: МНИИПУ, 2008. 192 с.
3. Тоценко В. Г. Методы и системы поддержки принятия решений: Алгоритмический аспект. Київ: Наукова думка, 2002. 382 с.
4. Кузьменко Г. Е., Плиш В. Е. Функциональная архитектура интегрированой системи поддержки принятия решений в условиях ситуационных центров. Математические машины и системы. 1997. № 1. С. 56–63.
5. Тарасов В. А., Герасимов Б. М., Левин И. А., Корнейчук В. А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений: теория, синтез, эффективность. Киев: МАКНС, 2007. 336 с.
6. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. Москва: Наука, 1978. 352 с.
7. Saaty T. L. Decision Making for Leaders. Pittsburgh: RWS Publications, 2000. 240 p.
8. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. Москва: Наука, 1981. 208 с.
9. Руа Б. Проблемы и методы принятия решений в задачах с многими целевыми функциями. *Вопросы анализа принятия решения.* Москва: Мир, 1976. 380 с.
10. Морозов А. А., Ященко В. А. Ситуационные центры. Информационные технологии будущего (Новая информационная технология). Киев: Интертехнодрук, 2008. 332 с.
11. Морозов А. А., Кузьменко Г. Е. Построение сценариев развития событий –основа функционирования информационно-аналитических систем типа «ситуационные центры». *Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика*. 2005. № 3. С. 42–44.

## References

1. Voronyn, A. N. (1992). *Mnogokriterialnyi sintez dynamicheskikh sistem [Multicriteria synthesis of dynamical systems]*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
2. Zhukovskyi, V. I. (2008). *Mnogokriterialnoe priniatie reshenii v usloviiakh neopredelennosti [Multi-criteria decision making under uncertainty*]. Moscow: MNIIPU [in Russian].
3. Totsenko, V. H. (2002). *Metody i sistemy podderzhki priniatiia reshenii: Algoritmicheskii aspekt [Decision-making methods and systems: Algorithmic aspect*]. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
4. Kuzmenko, G. E. (1997). Funktsionalnaia arkhitektura integrirovanoi sistemy podderzhki priniatiia reshenii v usloviiakh situatsionnykh tsentrov [Functional architecture of an integrated decision support system in situational centers]. *Matematicheskie mashiny i sistemy – Mathematical Machines and Systems*, 1, 56–63 [in Russian].
5. Tarasov, V. A., Herasymov, B. M., Levyn, I. A., & Korneichuk, V. A. (2005). *Intellektualnye sistemy podderzhki priniatiia reshenii: teoriia, sintez, effektivnost [Intelligent decision support systems: theory, synthesis, efficiency]*. Kyiv: MAKNS [in Russian].
6. Fyshbern, P. (1978). *Teoriia poleznosti dlia priniatiia reshenii [Theory of utility for decision making]*. Moscow: Nauka [in Russian].
7. *Saaty,* T. L. (2000). *Decision Making for Leaders*. Pittsburgh: RWS Publications [in English].
8. Orlovskyi, S. A. (1981). *Problemy pryniatyia reshenyi pry nechetkoi yskhodnoi ynformatsyy [Decision-making problems with fuzzy initial information*]. Moscow: Nauka [in Russian].
9. Rua, B. (1976). Problemy y metody pryniatyia reshenyi v zadachakh s mnohymy tselevymi funktsyiamy [Problems and decision-making methods in tasks with many objective functions]. *Voprosy analyza pryniatyia reshenyia. – Decision Analysis Issues.* Moscow: Mir [in Russian].
10. Morozov, A. A. & Yashchenko, V. A. (2008). *Situatsionnye tsentry. Informatsionnye tekhnologii budushcheho (Novaia informatsionnaia tekhnologia) [Situational centers. Information Technologies of the Future (New Information Technology*)]. Kyev: Intertekhnodruk [in Russian].

11. Morozov, A. A., Kuzmenko, H. E. (2005). Postroenye stsenariev razvitiia sobytii – osnova funktsionirovaniia informatsionno-analiticheskykh sistem tipa «situatsionnye tsentry» [Building scenarios for the development of events - the basis for the functioning of information-analytical systems such as «situational centers»]. *Sistemy pidtrymky priniattia rishen. Teoriia i praktyka – Decision support systems. Theory and Practice,* 3, 42–44 [in Russian].

*UDC 519.9:004.681*

*Volodymyr Khoroshko, Mykhailo Shelest, Yuliia Tkach*

# MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF THE PROJECT EFFICIENCY OF CYBER SECURITY PROVISIONS

***Urgency of the research***. *Multicriteria assessment of project effectiveness is an urgent challenge in cybersecurity.*

***Target setting***. *There is an urgent need for a multifaceted and multidimensional assessment of the effectiveness of cybersecurity projects at various stages (when selecting projects where work has not begun on them, in the course of project implementation work to optimize management and after project implementation, and when studies are completed and possible to track the results of these studies). However, there is no comprehensive assessment methodology.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Typically, evaluation and optimization tasks combine, believing that the ultimate goal is to map the estimates of several alternatives and choose the best ones. Such a statement does not consider the case of evaluation of a single project.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *A methodology that would allow a standardized estimate of one project to be obtained regardless of the presence (or absence) of other projects has not yet been proposed.*

***The research objective.*** *The developed methodology is intended for solving the urgent task of carrying out systematic analysis and obtaining the multilateral characterization of projects, increasing the reliability of conclusions about the scientific significance of the results, about the social and economic efficiency of planned and executed works in cybersecurity.*

***The statement of basic materials.*** *Tasks for evaluating complex objects and processes involve a juxtaposition of many different, usually contradictory properties, which gives reason to attribute these tasks to the class of multicriteria. Solving multicriteria problems is difficult due to the complexity of their formulation. The developed methodology of multicriteria assessment of the effectiveness of cybersecurity projects enables the systematic analysis and obtaining of multicriteria characteristics of the project, enhancing the reliability of the results obtained on the social and economic efficiency of the planned and performed work in the field of information security. The proposed methodology addresses the challenges of developing a system of criteria and performance indicators for cybersecurity; building a formalized analytical and qualitative assessment of cybersecurity on the set of quality criteria; visualized presentation of project evaluation. In the long term, it is expected to use the results obtained to evaluate the effectiveness of projects in other subject areas. The technique is unacceptable in cases where qualitative indicators are not essentially reduced to quantitative (numerical) values and cannot be measured on existing scales. The technique cannot be used without further modification if there are criteria that can accept only discrete (integer) values.*

***Conclusions.*** *The developed methodology with some modification can be applied in various fields, in particular in the field of cybersecurity, both at the stage of project selection and in the process of carrying out project implementation works, as well as after the implementation of projects.*

***Keywords:*** *cybersecurity; multicriteria assessment; project effectiveness; information security.*

*Fig.: 1. Table: 5. References: 11.*

**Хорошко Володимир Олексійович** – доктор технічних наук, професор кафедри безпеки інформаційних технологій, Національний авіаційний університет (просп. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03058, Україна).
**Khoroshko Volodymyr** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Information Technology Security, National Aviation University (1 Cosmonaut Komarov Av., 03058 Kyiv, Ukraine).
**E-mail:** professor_va@ukr.net
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-6213-7086

**Шелест Михайло Євгенович –** доктор технічних наук, професор кафедри кібербезпеки та математичного моделювання, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Shelest Mykhailo** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Cybersecurity and Mathematical Modeling, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** mishel3141@gmail.com

**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-7110-4876

**Ткач Юлія Миколаївна** – доктор педагогічних наук, доцент, завідувач, професор кафедри кібербезпеки та математичного моделювання, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Tkach Yuliia** – Doctor of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head, Professor of Department of Cybersecurity and Mathematical Modeling, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** tkachym79@gmail.com
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-8565-0525

Хорошко В., Шелест М., Ткач Ю. Багатокритеріальна оцінка ефективності проєктів із забезпечення кібербезпеки. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 114-123.

*UDC 004.056*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-124-132*

*Vitalii Lytvynov, Mariia Dorosh, Iryna Bilous, Mariia Voitsekhovska, Valentyn Nekhai*

# DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED INFORMATION SYSTEM FOR ORGANIZATION'S INFORMATION SECURITY CULTURE LEVEL ASSESSMENT

***Relevance of the research.*** *Ensuring the effectiveness of the information security systems requires creation of an appropriate information security culture for the employees of the organization in order to reduce human-related risks.*

***Target setting.*** *The techniques currently available for assessing information security risk are excluded as a source of the potential vulnerability. Considering the role of the personnel in the organization's information security systems, there is a need to create automated systems of human-machine interaction assessment through the level of the personnel information security culture, and to determine the integral indicator of the organization's information security culture.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Open access publications on the problems of integrating the information security culture into the corporate culture of the organization as a tool for ensuring the proper information security level of business processes are considered.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *The absence of formalized models for assessing the organization's information security culture level, as well as an automated process for its assessing were revealed by source analysis.*

***The research objective.*** *The purpose of the article to build a model that describes the process of obtaining an organization's information security culture level assessment in IDEF0 notation. Then, to create an architecture and database for system of information security culture assessment to support the general organization's information security system.*

***The statement of basic materials.*** *According to functional requirements, a conceptual model of «The organization`s ISC level determination» development process was created. Input information, governing elements, execution elements and mechanism, and output information were defined. To accomplish these tasks, an architecture and database of information system for assessing the information security culture level of the organization were proposed.*

***Conclusions.*** *The functional model of top-level development process was proposed. Formed functional requirements became the basis for development of information system architecture with description of its modules and database structure.*

***Keywords:*** *culture; information security; organization; personal culture; information system; architecture; database.*
*Fig.: 3. References: 19.*

**Relevance of the research.** One of the key problems in development and implementation of information security systems (ISS) is to ensure its effectiveness by reinforcing the knowledge and skills of employees in field of information security. However, integrated information security tools can`t still guarantee the security of the organization's information resources. This situation is commonplace because most of information gathering, processing and storage processes are provided by the employees who are active participants in the internal information environment.

In order to counteract external and internal threats effectively, there is a need to develop new approaches to implement an information security culture (ISC) as a basis for creating a secure information environment for the organization.

This paper is devoted to development of the organization's ISC level assessment system based on determination of the employees' ISC level, information security risk analysis, and industry requirements.

**Target setting.** Now, the organization's ISC level definition exists in the form of recommendations or organization's IS policies. Existing techniques for information security risk assessment are almost exclude a person as a source of potential vulnerability (the exception is the OCTAVE technique [1], which takes into account employee awareness). Therefore, an ISC assessment software should be created to support existing ISS.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Ensuring the safety of activities through the development of a high-level security culture is currently at the heart of organizing activities in one of the most dangerous industries as nuclear energy is [2].

Adele Da Veiga & Jan H. P. Eloff [3] underline the importance of employees ISC in the overall organization's ISS through policy BYOD action. Thomas Schlienger and Stephanie Teufel [4], Johan van Niekerk & Rossouw von Solms [5], Steven Furnell & Kerry-Lynn Thomson [6], point to the need to manage development of the organization's ISC, and Waldo Rocha Flores, Egil Antonsen & Mathias Ekstedt [7] paid attention to the national mentality and culture influence

© Литвинов В. В., Дорош М. С., Білоус І. В., Войцеховська М. М., Нехай В. В., 2020

in the context of globalization. To overcome the obstacles might be encountered in the organization's ISC development through the psychological features of employees, Areej Alhogail and Abdulrahman Mirza have proposed the change management models described in [8].

The weakness of researches mentioned above is differentiation in respondents' selection. The main respondents were representatives of the information security departments, single IT department employees and maintenance specialists. This approach excludes another company`s employees despite their interaction with internal information resources.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The gap in formalized models for assessing the organization's information security culture level was revealed by source analysis. The absence of an automated process for the organization's information security culture level requires the creation of system for the information security culture level assessment to support the organization's information security system.

**The research objective.** The paper purpose is building a model to describe the process of obtaining an organization's information security culture level assessment in IDEF0 notation. Then, to create an architecture and database (DB) of ISC assessment system to support the general organization's information security system.

**The statement of basic materials.** The main functional requirements for the information system are:

• collecting, processing, storing information, such as set of questions for questionnaire formation, results of interviewing respondents, expert assessment of the ISC level (on personal, department, and organization tiers);

• formation and output of results: comparative analysis of the current state of the ISC level with the requirements of regulatory documentations, and IS-risk analysis results;

• creating, storing and refining a set of standard recommendations to increase the existing ISC level of organization.

The following development process models are created using AllFusion Process Modeler (formerly known as BPwin) [9]. AllFusion Process Modeler is a CASE tool for modeling, analysis, documentation and optimization of business processes. Through visualization of resources flows, executors, regulations and results, this software product provides a complete model of the process with the necessary detailing.

**1 The top-level functional model**

The conceptual model of the development process «The organization`s ISC level determination» is presented in the fig. 1.

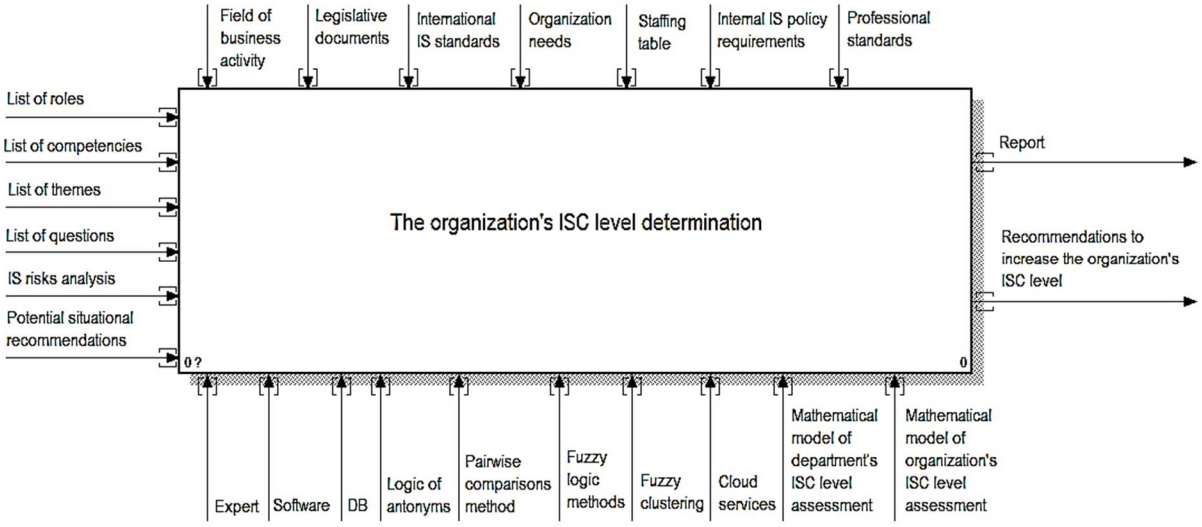



*Fig. 1. Functional model of top-level development process «The organization`s ISC level determination»*

System inputs are: list of roles, competencies, themes, questions, potential situational recommendations, and organization's IS risks analysis. This information is required to get started. Governing elements of the system are legislative documents and international IS standards (ISO/IEC 27000 group of standards), the organization's scope and needs, internal IS policies, staffing table, job instructions, and professional standards with a set of IS competencies. Execution elements and mechanisms are: experts in the field of information security of organizations (their duties include filling the database with input information, determining weights, forming questionnaires, disseminating and collecting feedback, creating a fuzzy model rule base, checking reports and recommendations); cloud services for questionnaires distribution and of answers collection; software as a tool used for interaction with system by all participants of the process; database for storing information. The main methods are: logic of antonyms [10] (to form the competency array); the method of pairwise comparisons [11] (to determine the weights of questions within the questionnaire); fuzzy logic methods [12] (to assess the personal ISC level for employees) and fuzzy clustering (to generate clusters of questions by theme); general mathematical models of the ISC level assessment for departments and organization [13].

As output, the system should provide the report on the organization's ISC level assessment and recommendations how to improve this level.

**1.1. Input information**

*List of themes* identifies aspects related to employees' work activities as users of the internal information environment. The list of themes is formed by experts on the basis of knowledge in this subject area.

*List of roles.* In the performance of his/her duties, an employee may perform several roles at different levels. For example, responsibilities may be extended with some basic requirements as PC administering in addition with filling some information system with new data. As a source of list of roles may be the organization's staffing table and a set of job instructions.

*List of questions.* While forming the questionnaires, the expert fills the DB with correctly formed questions and answers that will be offered to the respondents for choice.

*List of competencies.* The source of competencies list is the professional standard, requirements or organization needs, job instructions, internal organization's IS policies, etc. The list of competences serves to determine the completeness of relevant user`s competences in the internal information environment (employee) according to roles he/she performs within the position.

*Potential situational recommendations* are a list of recommended actions that are result from the coincidence of adverse assessments according to certain criteria for personal ISC assessing.

*IS risks analysis of the organization* is the basis for requirements formation to the ISC level of the organization, identifies aspects that need to be strengthened through deepening of knowledge for conducting successful business activities of the organization. The IS risk analysis allows to identify the vulnerable elements of the system (software, processes, participants) and to prepare requirements for personal ISC, departments and organization in general.

**1.2. Governing elements of the system**

The legislative documents is the legislative base of Ukraine, which consists of a set of legislative, regulatory and normative acts on information security in Ukraine.

*The laws of Ukraine* "On Information" from 02.10.1992 № 2657-XII [14], «On Protection of Personal Data» from 01.06.2010 № 2297-VI [15], «On basic principles of cyber security in Ukraine» [16], «On Protection of Information in Automated Systems» [17], «On Electronic Documents and Electronic Document Circulation» [18] etc., and regulatory documents, resolutions of Cabinet of Ministers of Ukraine, etc. are based on this.

According to *the industry standard of Ukraine* for the information security management system (ISMS) 2.0/ISO/IEC 27002:2010 «The information technology. Methods of protection. A set of rules for managing information security» [19], requirements for information security is based on three main sources:

• risk assessment for the organization based on the organization's business strategy. The result of IS risk analysis is the list of identified threats and the assessment of vulnerabilities and potential consequences.

• legal requirements under the law, contractual terms with partners and contractors; socio-cultural environment.

• the internal policy of the organization in the field of information security, which regulates the procedures of information processing and production in the internal information environment.

*International IS standards* of the ISO/IEC 2700X Group (such as ISO/IEC 27001, 27002, 27032, etc.) are used as best practices; they may be served as a source of guidance for improving the situation.

*Staffing table* is a source for filling a list of jobs and related roles. The staffing table is a must-have document for the organization. The domain of organization's activity determines both the requirements and the themes, which is subsequently used for forming the questionnaires.

*Professional standards* are the basis for forming a competency array. You should also pay attention to the production needs that accompany the organization. If the conditions of internal information security policy do not allow the execution of certain business processes by outsourcing, such business processes should be provided by qualified and highly specialized specialists in a specific domain, possessing unique competencies.

**1.3. Execution elements and mechanisms**

*An expert* is a carrier of deep specific knowledge and practical experience in the field of organization's information security. An expert (or group of experts) is involved in each stage of the organization's ISC level assessment.

The expert`s primary functions are filling the DB tables of the system with primary information (forming requirements for information security; filling the tables of typical situational recommendations (measures) aimed at increasing the level ISC of the employee and the organization; creating a list of questions for questionnaires and their distribution by theme; forming a list of roles (based on staffing table); filling the competency array).

In the second stage, the expert assigns weights that determine the measure of questions belonging to the set of themes, weight of each question (as its influence on the resultant assessment of the survey); establishing the impact of roles on the overall ISC level of the department; assigning competency scales within each role. The expert creates a rule base of the fuzzy model for the assessment of employee's personal level ISC, as well as a set of rules for defining recommendations.

Also, on the final stage, the expert checks the correctness of the received report and a set of recommendations to enhance the ISC level of organization through the introduction of measures to raise awareness and practical experience of employees (increasing personal ISC level).

*Software* consists of 6 modules, each of them is involved in different stages of an organization's information security audit. They can be briefly described as data collection module, questionnaire generation module, survey conducting module, ISC level assessment of the department and the organization modules, and integrated assessment module. The software architecture is detailed in Paragraph 2.

*Database.* To implement the ISC assessment system of the organization the single database is used, not a collection of modular databases. It contains information on such basic entities as user information, questionnaires, requirements, and more. The entity diagram is described in details in Paragraph 3.

*Logic of antonyms.* While filling the information system with the input information, the logic of antonyms is used while forming the competence array from the list of competences. Logic of antonyms allows to specify the type of relationship (strong or weak) between the competencies that qualified professional must have performing a set of roles within the responsibilities of a particular position.

*Fuzzy clustering* is used in the formation of question clusters by themes according to the membership array for further questionnaires generation.

*Fuzzy logic methods.* On the basis of linguistic assessments, the respondent's personal ISC level is determined by a fuzzy assessment model. Further defuzzificated survey result is transferred on the input of mathematical model of the department's ISC level assessment.

*Pairwise comparisons method* is the basis for assigning weights to the impact of each question on the resulting questionnaire assessment. These values are set by the expert on the basis of the created matrix of pairwise comparisons.

*Cloud services.* The survey is conducted online using questionnaires created and distributed with the support of cloud services (Google Forms, Microsoft Forms, Visual Paradigm Forms, etc.). This approach has the following advantages: free access, does not require specialized development knowledge, provides automated collection of answers in a spreadsheet (Google Sheet, Microsoft Excel, Visual Paradigm Form Results, etc.), and ability to upload to the DB of information system ISC level assessment.

*Mathematical model of department's ISC level assessment* described in paper [13] determines the ISC level of department based on personal assessments of its employees taking into account the array of role weights corresponding to the positions of respondents.

*Mathematical model of organization's ISC level assessment* [13] determines the mechanism for determining the overall level of organization's ISC based on results of the ISC level assessments of departments obtained on the previous stage.

**1.4. Output information**

The organization's ISC level assessment information system has two main functions:

1. An assessment of organization's existing ISC level based on the personal assessment of the organization's employees. The results should be reported;

2. Events of non-compliance detection with the information security requirements. The report should include a set of recommendations for action to increase ISC level employees and organization both.

Output information for the organization's ISC level information system is a report on the organization's ISC level assessment and recommendations for upgrading the organization's ISC level in case the indicators do not meet the requirements of the organization's ISC.

*Report* is a document generated by the system as a result of activities aimed at determining the ISC level of the organization, relying on ISC level assessments of employees, taking into account the organization's information security requirements, job responsibilities determined with information security competencies.

*Recommendations.* In case of insufficient level of available ISC, the system provides appropriate recommendations, which should include explanations and guidelines (tips) to eliminate gaps in theoretical and/or practical training and to gain additional experience in order to supplement the users` IS competence. Recommendations may also include links to thematic materials, seminars, webinars, courses, papers, and other educational materials.

**2. The information system architecture**

The architecture of the information system for determining the ISC level of the organization is shown on fig. 2 and can be used to implement the tasks to information system.

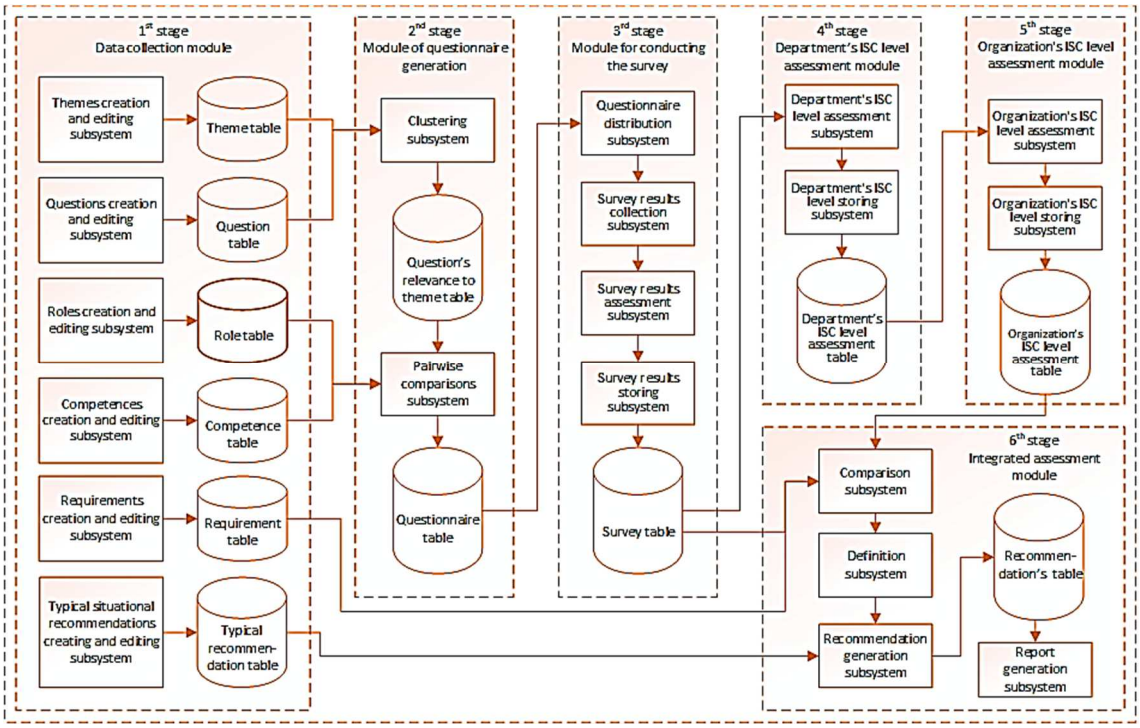



*Fig. 2. Information system architecture for determining the ISC level of the organization*

The system consists of 6 main modules.

• Data collection module. DB is filled with all the necessary information for further questionnaire generation and assessment by an IS expert (or group of experts).

• Module of questionnaire generation. It distributes questionnaires by theme. The pairwise comparison method is used for estimation of questions` weights in base on the set of competences and roles of the employees for testing.

• Module for conducting the survey. It provides access to employees of the organization to the questionnaire and stores the results of the tests.

• Department's ISC level assessment module. It forms an overall assessment of the ISC level for department on the results of completed questionnaires or passed tests.

• Organization's ISC level assessment module. It forms the overall ISC level of the entire organization based on the assessment of all departments.

• Integrated assessment module. It generates a report on the results of the employees testing and provides recommendations aimed to improve it based on a defined the ISC level of the organization.

**3. Database**

DB is an integral part of the automated system for the ISC level assessing of the organization. The DB logical model is presented on fig. 3.

Let us focus on the most essential entities and relationships used in the DB.

Within the questionnaire, the questions may relate to separate themes or related ones. The degree of question's affiliation to some theme is determined by expert and contained in the table «Question's relevance to the theme».

The question's impact on the overall questionnaire's assessment is also determined by expert and contained in the «Question's relevance to the questionnaire» table.

Each «Question» is linked to multiple entries in the «Answer» table. The choice of the user answer to the certain question is determined by ticking the box (type Boolean, true/false) in the «Answer result» table.

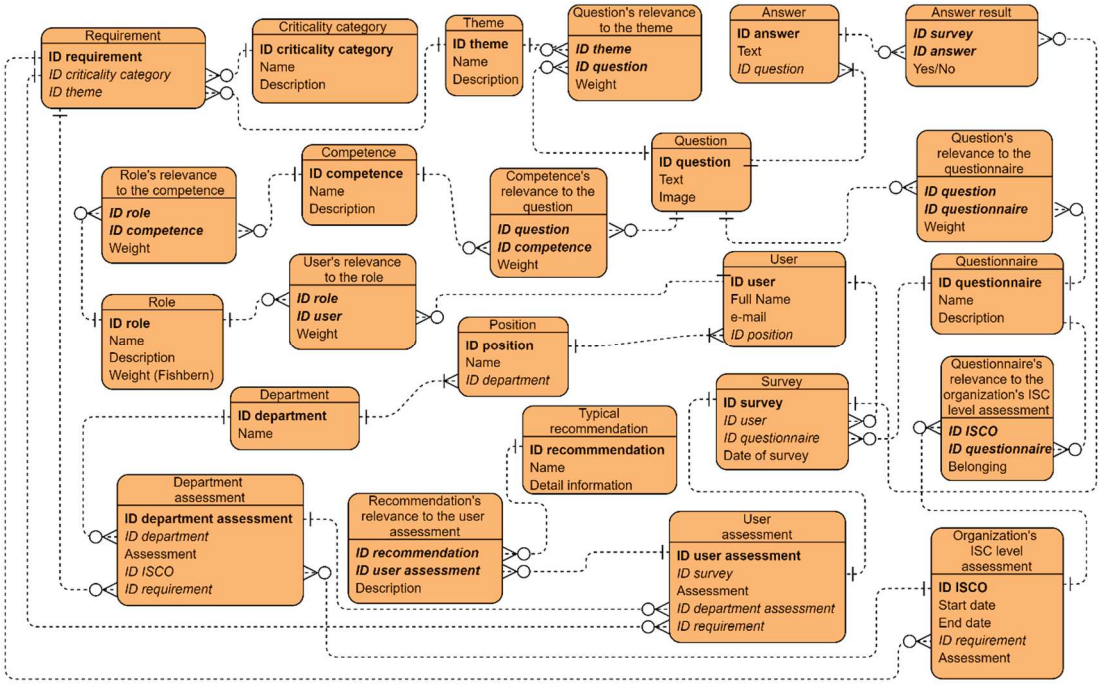



*Fig. 3. The DB logical model*

The «Survey» table contains information about the questionnaire that has been generated and the corresponding user which it was provided to be filled out. The «User» is associated with the relevant «Position» that he/she occupies within the «Department».

The «User Assessment» table links the appropriate questionnaire of the user, the assessment obtained as a result of the data processing by the module of personal ISC fuzzy assessment, and the requirement for the «User» of the «Competence».

The «Department assessment» receives the result after processing by the department's ISC level assessment module, that is stored by the corresponding «Assessment» attribute, and also contains link to the «Department» table, to the «Organization's ISC level assessment», and the «Requirement» that is associated with the department's activities.

The «Organization's ISC level assessment» table has fields of the beginning and end assessment. This allows to identify a set of survey results as those conducted within a single event.

«The questionnaire's relevance to the organization's ISC level assessment» is determined by the Boolean variable (true/false value), indicating whether the questionnaire was involved in the organization's ISC level assessment.

The table «Criticality category» serves as the basis for the information security requirements based on organizations membership to the criticality category of the infrastructure object. Also, the results of the organization's information security risk analysis are considered when filling the table «Recommendation's relevance to the user assessment».

**Conclusions according to article.** This work is a continuation of studies series that are dedicated to assessing the organization's information security culture level. The functional model of the top-level business process is offered. Formed functional requirements became the basis for development of information system architecture with description of its modules and database structure.

## References

1. Lomakov, Iu. A. (2013). Metodiki otsenivaniia riskov i ikh programmnye realizatsii v kompiuternykh setiakh [Methods of risk assessment and their software implementation in computer networks]. *Molodoi uchenyi – Young scientist*, 2, 43–46. URL: https://moluch.ru/archive/49/6279.

2. Begun, V. V., Shirokov, S. V., Begun, S. V., Pismenniy, E. M., Litvinov, V. V., Kazachkov, I. V. (2012). *Kultura bezpeky v yadernii energetitsi [Culture of safety in nuclear power]*. Kyiv [in Ukrainian].

3. Da Veiga, A., & Eloff, J. H. P. (2010). A framework and assessment instrument for information security culture. *Computers & Security*, 29(2), 196–207. DOI: 10.1016/j.cose.2009.09.002.

4. Schlienger, Thomas & Teufel, Stephanie. (2003). Information security culture: From analysis to change. *South African Computer Journal*, 31, 46-52.

5. Van Niekerk, J. F., & Von Solms, R. (2010). Information security culture: A management perspective. *Computers & Security*, 29(4), 476–486. DOI: 10.1016/j.cose.2009.10.005.

6. Furnell, S., & Thomson, K. L. (2009). From culture to disobedience: Recognising the varying user acceptance of IT security. *Computer Fraud and Security,* 2009 (2), 5–10. DOI: 10.1016/S1361-3723(09)70019-3.

7. Flores, W., Antonsen, E. & Ekstedt, M. (2014). Information security knowledge sharing in organizations: Investigating the effect of behavioural information security governance and national culture. *Computers & Security*, 2014 (43), 90–110. DOI: 10.1016/j.cose.2014.03.004.

8. Alhogail, Areej & Mirza, A. (2014). A framework of information security culture change. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 64, 540–549.

9. Dubeikovskii, V. I. (2007). *Effektivnoe modelirovanie s AllFusion Process Modeler [Effective modeling with AllFusion Process Modeler]*. Moscow [in Russian].

10. Holota, Ya. Ya. (1992). O formalizatsii logiki nepolnykh znanii (logiki antonimov) [On the formalization of the logic of incomplete knowledge (the logic of antonyms)]. *Logika i razvitie nauchnogo znaniia – Logic and development of scientific knowledge* (pp. 92-112). St Petersburg University [in Russian].

11. Saaty, Thomas L. (2008-06). Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors – The Analytic Hierarchy/Network Process (PDF). *RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)*, 102 (2), 251–318.

12. Bellman, R. E., Zadeh, L. A. (1970). Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*, 17 (4), 141-164. DOI: 10.1287/mnsc.17.4.B141.

13. Shkarlet, S., Lytvynov, V., Dorosh, M., Trunova, E., Voitsekhovska, M. (2020). The Model of Information Security Culture Level Estimation of Organization. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2019. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1019, 249-258. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-25741-5_25.

14. Pro informatsiiu [On information]. № 2657-XII (October 02, 1992). URL: https://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=2657-12.

15. Pro zakhyst personalnykh danykh [On Protection of Personal Data]. № 2297-VI (June 01, 2010). URL: https://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=2297-17.

16. Pro osnovni zasady zabezpechennia kiberbezpeky Ukrainy [On basic principles of cyber security in Ukraine]. № 2163-VIII (October 05, 2017). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2163-19.

17. Pro zakhyst informatsii v informatsiino-telekomunikatsiinykh systemakh [On Protection of Information in Automated Systems]. № 80/94-VR (July 05, 1994). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/80/94-%D0%B2%D1%80.

18. Pro elektronni dokumenty ta elektronnyi dokumentoobih [On Electronic Documents and Electronic Documents Circulation]. № 851-IV (May 22, 2003). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/851-15.

19. Informatsiyni tekhnologiyi. Metody zakhystu. Zvid pravyl dlya upravlinnya informatsiynoyu bezpekoyu (ISO/IEC 27002:2005, MOD): GSTU SUIB 2.0/ISO/IEC 27002:2010 [Information technology – Security techniques – Code of practice for information security management (ISO/IEC 27002:2005, MOD): Branch standard of Ukraine ISMS 2.0/ISO/IEC 27002:2010] (2010). Kyiv: National bank of Ukraine [in Ukrainian].

*УДК 004.056*

*Віталій Литвинов, Марія Дорош, Ірина Білоус, Марія Войцеховська, Валентин Нехай*

## РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ РІВНЯ КУЛЬТУРИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ОРГАНІЗАЦІЇ

***Актуальність теми дослідження.*** *Забезпечення ефективності впровадженої СЗІБ вимагає створення відповідної культури інформаційної безпеки співробітників організації з метою зниження ризиків, пов'язаних із людським чинником.*

***Постановка проблеми.*** *Наявні сьогодні методики оцінки ІБ-ризиків випускають з поля зору людину як джерело потенційної вразливості. Враховуючи роль персоналу в СЗІБ організації, випливає необхідність у створенні автоматизованих систем оцінки людино-машинної взаємодії через рівень КІБ персоналу, а також інтегральний показник КІБ організації.*

***Аналіз останніх джерел і публікацій.*** *Розглянуто публікації у вільному доступі, присвячені проблемам інтеграції культури інформаційної безпеки в корпоративну культуру організації як інструмента забезпечення належного рівня інформаційної безпеки бізнес-процесів.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Аналіз джерел виявив відсутність формалізованих моделей оцінки рівня КІБ організації, а також автоматизованого процесу її оцінки.*

***Постановка завдання.*** *Мета статті полягає в описі процесу отримання оцінки рівня КІБ організації за допомогою функціональної моделі в нотації IDEF0, архітектури та бази даних системи оцінки КІБ з метою підтримки СЗІБ організації.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Згідно з функціональними вимогами розроблено концептуальну модель бізнес-процесу «Визначити рівень КІБ організації». Визначені вхідна інформація, керуючі елементи системи, елементи та механізми виконання, а також вихідна інформація. Для реалізації поставлених завдань запропоновано архітектуру та базу даних інформаційної системи оцінки рівня КІБ організації.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Запропоновано функціональну модель бізнес-процесів верхнього рівня. Сформовані функціональні вимоги стали основою для розробки архітектури інформаційної системи з описом її модулів та структури бази даних.*

***Ключові слова:*** *культура; інформаційна безпека; організація; персонал; інформаційна система.*
*Рис.: 3. Бібл.: 19.*

**Lytvynov Vitalii** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**Литвинов Віталій Васильович** – доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**E-mail:** v.v.lytvynov.dept@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9622-3871
**Scopus Author ID:** 57211432068

**Dorosh Mariia** – Doctor in Technical Sciences, Professor of Information Technologies and Software Engineering Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**Дорош Марія Сергіївна** – доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**E-mail:** mariyaya5536@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6537-9857
**Scopus Author ID:** 56912183600
**ResearcherID:** AAF-2603-2019

**Bilous Iryna** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Information Technology and Software Engineering department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**Білоус Ірина Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**E-mail:** iryna.bilous.it@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-3092-678X
**Scopus Author ID:** 57208344519
**ResearcherID:** G-3887-2014

**Voitsekhovska Mariia** – PhD student of Information Technology and Software Engineering department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**Войцеховська Марія Михайлівна –** аспірантка кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**E-mail:** m.voitsekhovska@gmail.com
**ORCID:** http://www.orcid.org/0000-0002-1711-101X
**Scopus Author ID:** 57192818403

**Nekhai Valentyn** – assistant of Information Technology and Software Engineering department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**Нехай Валентин Валентинович** – асистент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**E-mail:** kilavv@live.com
**ORCID:** http://www.orcid.org/0000-0002-6209-5661
**Scopus Author ID:** 57211428428
**ResearcherID:** F-4825-2016

Lytvynov, V., Dorosh, M., Bilous, I., Voitsekhovska, M., Nekhai, V. (2020). Development of the automated information system for organization's information security culture level assessment. *Technical sciences and technologies*, *1* (19), 124-132.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 311+512*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-133-139*

*Олександр Дубягін, Володимир Гур'єв, Ірина Фірсова*

# ЕФЕКТИВНІСТЬ КЕРУЮЧОГО ВПЛИВУ НА СТРУКТУРОВАНИЙ ОБ'ЄКТ ЯК ЧИСЛОВА ХАРАКТЕРИСТИКА МІЖРІВНЕВОГО БАЛАНСУ

***Актуальність теми дослідження.*** *Кількісна оцінка ефективності керуючого впливу на структурований об'єкт, який зазнає неочікувані втрати або поповнення щодо ознаки, вимірюваної в його одиниць у шкалі відношень, є актуальною для розв'язання управлінських задач будь-якого галузевого спрямування.*

***Постановка проблеми.*** *Існуючі методики оцінки не враховують фактор пересування одиниць об'єкта з одного рівня ознаки на інший, внаслідок чого структурний аналіз результатів впливу є неповним. Подолати цю проблему вдається завдяки застосуванню агрегованих балансових показників міжрівневого пересування одиниць об'єкта.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Запропонована раніше система показників міжрівневого балансу, до яких належать і балансові показники пересування одиниць об'єкта, представляє ці показники як у значеннях рівневої чисельності останніх, так і в значеннях вимірюваної у них ознаки.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Оцінка ефективності впливу через складові балансу, пояснювані міжрівневим пересуванням одиниць об'єкта.*

***Постановка завдання.*** *Сформулювати коефіцієнти ефективності керуючого впливу на структурований об'єкт на основі показників міжрівневого балансу, представлених в агрегатній формі.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Структурні зрушення керованого об'єкта пропонується оцінювати абсолютними та середніми балансовими показниками міжрівневого пересування його одиниць, представленого альтернативними його категоріями: прогресивним та регресивним пересуванням. Порівняння між собою цих показників, як складових балансу, що представляють очікувані та не очікувані пересування, дає уявлення про ефективність керуючого впливу на об'єкт у виді однойменного коефіцієнта. Оскільки показники балансу представлені на різних рівнях їх систематизації за критеріями «ступінь агрегування» та «межі руху», то і коефіцієнти ефективності можуть визначатися у відповідних видових категоріях, як рівневі або групові.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Запропоновані коефіцієнти дозволяють пояснити ефективність керуючого впливу на структурований об'єкт фактором міжрівневого руху його одиниць.*

***Ключові слова:*** *втрати; ефективність; керуючий вплив; коефіцієнт; міжрівневий баланс; об'єкт; поповнення; сальдо.*
*Табл.: 1. Рис.: 1. Бібл.: 10.*

**Актуальність теми дослідження.** Кількісна оцінка ефективності керуючого впливу на об'єкт, структурований у шкалі відношень за однорідною ознакою і який зазнає структурні зрушення, що призводять до неочікуваних його втрат або поповнення, є актуальною для розв'язання управлінських задач будь-якого галузевого спрямування. Якщо об'єкт являє собою однорідне структуроване середовище, використовуване для зберігання, обробки або для передачі даних як складова інформаційної системи, то подібна оцінка ефективності управління є корисною для аналізу таких її характеристик, як швидкодія, ресурсні витрати (енергії, труда, фінансів тощо), продуктивність і ін.

**Постановка проблеми.** Існуючі методики оцінки не враховують фактор пересування одиниць об'єкта з одного рівня ознаки на інший, внаслідок чого структурний аналіз результатів впливу є неповним. Подолати цю проблему вдається завдяки авторській моделі міжрівневого балансу. Наслідки керуючого впливу на об'єкт, які виглядають як втрати або поповнення останнього щодо ознаки, вимірюваної у його одиниць, й обумовлені їх міжрівневим пересуванням, мають визначатися як зважені (агреговані) абсолютні балансові показники пересування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Формулювання балансових показників пересування стало можливим завдяки моделі міжрівневого балансу, синтезованій та запровадженій в агрегатній формі для характеристики структури та структурних зрушень керованого об'єкта через відповідні складові балансу, сформовані за критеріями класифікації міжрівневого руху «ступінь агрегування», «межі руху», «ознаки руху» [10]. Агреговані показники балансу визначаються через значення рівневої чисельності одиниць об'єкта та через значення вимірюваної у них ознаки. Аналогом моделі міжрівневого балансу є модель міжгалузевого балансу, запропонована В. В. Леонтьєвим [1; 6; 8]. Для оцінки ефективності керуючого впливу на об'єкт застосовуються методи та прийоми теорії управління [3; 4; 7; 9],

© Дубягін О. Б., Гур'єв В. І., Фірсова І. В., 2020

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Це – оцінка ефективності впливу, пояснювана міжрівневим пересуванням одиниць об'єкта.

**Постановка завдання (мета статті).** Оцінити ефективність керуючого впливу на структурований об'єкт на основі показників міжрівневого балансу, представлених в агрегатній формі.

**Виклад основного матеріалу.** Нагадаємо, що відповідно до положень міжрівневого балансу результатом керуючого впливу на структурований об'єкт є зміна рівневої структури останнього (рис.) внаслідок міжрівневого руху його одиниць [10]. Деякі з них зазнають пересування з одного рівня ознаки на інший її рівень, вибуття («В») з рівня *i* та прибуття («П») на рівень *j* ($i \neq j$), а деякі залишаються нерухомими на тому чи іншому рівні, що означає їх не перехід («Н») з рівня *i* або їх залишення («З») на рівні *j* ($i = j$). Якщо відбувається прогресивне пересування, з нижчого («н.») рівня на вищий («в.») рівень ($i < j$), це свідчить про поповнення об'єкта – $\Delta L_{\underset{в.}{н.}} > 0$ – щодо ознаки, вимірюваної у його одиниць у стані «після» впливу («1»), як у прогресивно прибулих на рівень, й у стані «до» впливу («0»), як у прогресивно вибулих з рівня. У випадку регресивного пересування, з вищого рівня на нижчий рівень ($i > j$), маємо втрати об'єкта – $\Delta L_{\underset{н.}{в.}} < 0$, пояснювані його регресивно прибулими (вибулими) одиницями. Наявність водночас і того, і іншого дає в балансі сальдо $\Delta L = \Delta L_{\underset{в.}{н.}} + \Delta L_{\underset{н.}{в.}}$ пересування, яке через домінування прогресивного пересування ($\left|\Delta L_{\underset{в.}{н.}}\right| > \left|\Delta L_{\underset{н.}{в.}}\right|$) є додатним, а через домінування регресивного пересування ($\left|\Delta L_{\underset{в.}{н.}}\right| < \left|\Delta L_{\underset{н.}{в.}}\right|$) – від'ємним. Вихідними даними для складання балансу є міжрівнева чисельність одиниць об'єкта $n_{ij}$ і рівневі значення ознаки $l_j$ і $l_i$, вимірюваної в шкалі відношень у цих одиниць після і до впливу відповідно. Необхідна умова балансу – незмінна загальна кількість *N* одиниць об'єкта. При цьому загальне сальдо $\Delta L$ об'єкта (воно ж – частинне групове сальдо пересування) може бути визначено як різниця $\Delta L = L_1 - L_0$ сукупних значень ознаки, вимірюваної в цих одиниць, або як різниця $\Delta L = L_{\text{П}} - L_{\text{В}}$ сукупних значень ознаки, вимірюваної у одиниць, прибулих на будь-який рівень, й у одиниць, вибулих з будь-якого рівня.

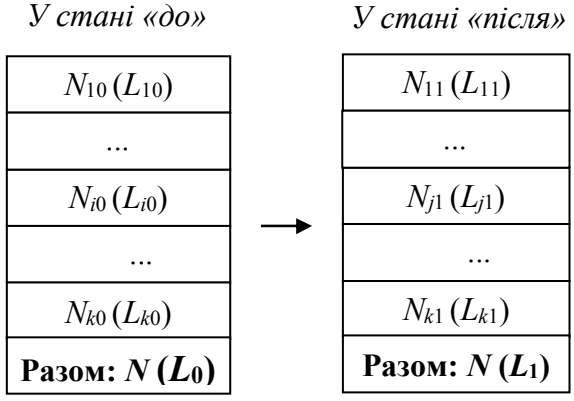



*Рис. Структурований об'єкт до і після зовнішнього впливу на нього: $N_{i0}(L_{i0})$ і $N_{j1}(L_{j1})$ – рівнева чисельність одиниць об'єкта (сукупне значення вимірюваної у них ознаки)*

Якщо для оцінки ефективності керуючого впливу традиційно застосовувати лише рівневу структуру об'єкта, характеристики якої зображені на рис., а це – сукупні рівневі та загальні (середні арифметичні) значення ознаки: $L_{p1}$ і $L_{p0}$ ($i = j = p$), $L_1$ і $L_0$ ($\bar{L}_1$ і $\bar{L}_0$), - порівнювані між собою відповідно в рівневому й у загальному коефіцієнтах ефективності впливу:

$$K_{\text{еф}.p} = L_{p1} : L_{p0}, \quad (1)$$

$$K_{\text{еф}.} = \begin{cases} L_1 : L_0, (1) \\ \bar{L}_1 : \bar{L}_0, (2) \end{cases} - \quad (2)$$

то така оцінка є неповною, тому що вона не враховує фактор-характеристики, обумовлені міжрівневим пересуванням одиниць об'єкта: той же самий результат можна отримати за рахунок різних складових руху. Визначити такі характеристики дозволяє модель міжрівневого балансу, синтезована в агрегатній формі [10]. Саме завдяки балансовим показникам міжрівневого пересування рухомих одиниць об'єкта, які пояснюють структуру втрат (поповнення) об'єкта на основі міжрівневого заміщення, сформульованого як канонічна форма балансу, вдається всебічно пояснити результати впливу й, як наслідок, його ефективність. У статистиці аналогом показників (1) і (2) є коефіцієнти динаміки, які характеризуються як темп зростання [2; 5].

Отже, сформулюємо аналогічні коефіцієнти, тільки через балансові показники пересування одиниць об'єкта і спочатку зробимо це через абсолютне сальдо:

$$\begin{cases} K_{\text{еф}.p\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \left|\Delta L_{p\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} : \Delta L_{p\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}\right|, (1) \\ K_{\text{еф}.\langle p\rangle\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \left|\Delta L_{\langle p\rangle\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} : \Delta L_{\langle p\rangle\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}\right|; \ (2) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} K`_{\text{еф}.i\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} = \left|\Delta L`_{i\text{в.}} : \Delta L`_{i\text{н.}}\right|, (1) \\ K`_{\text{еф}.\frac{\text{н.}}{\text{в.}}j} = \left|\Delta L`_{\text{н}.j} : \Delta L`_{\text{в}.j}\right|; \ (2) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} K_{\text{еф}.p\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} = \left|\Delta L_{p\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} : \Delta L_{p\frac{\text{н.}}{\text{в.}}}\right|, (1) \\ K_{\text{еф}.\langle p\rangle\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} = \left|\Delta L_{\langle p\rangle\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} : \Delta L_{\langle p\rangle\frac{\text{н.}}{\text{в.}}}\right|; \ (2) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} K`_{\text{еф}.i\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \left|\Delta L`_{i\text{н.}} : \Delta L`_{i\text{в.}}\right|, (1) \\ K`_{\text{еф}.\frac{\text{в.}}{\text{н.}}j} = \left|\Delta L`_{\text{в}.j} : \Delta L`_{\text{н}.j}\right|; \ (2) \end{cases} \quad (6)$$

$$K_{\text{еф}.\underline{\frac{\text{н.}}{\text{в.}}}} = \left|\Delta L_{\underline{\text{н.}}} : \Delta L_{\underline{\text{в.}}}\right|, \quad (7)$$

$$K_{\text{еф}.\underline{\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}} = \left|\Delta L_{\underline{\text{в.}}} : \Delta L_{\underline{\text{н.}}}\right|. \quad (8)$$

Коефіцієнти (3), (4) і (7) представляють ефективність керуючого впливу на об'єкт, одиниці якого зазнають не очікуване регресивне пересування, а коефіцієнти (5), (6) і (8) – неочікуване прогресивне пересування, тобто коли метою впливу є поповнення і втрати об'єкта відповідно.

Проаналізуємо вирази (3)-(8). Коефіцієнти складаються з абсолютних часткових балансових показників сальдо пересування за напрямом, прогресивного та регресивного: в системах рівнянь (3) і (5) – з *p*-рівневого (рівняння (1)) і з поза *p*-рівневого (рівняння (2)) сальдо; в системах рівнянь (4) і (6) – з рівневого сальдо через вибуття з рівня *i* (рівняння (1)) і через прибуття на рівень *j* (рівняння (2)); в рівняннях (7) і (8) – з групового сальдо. Якщо рівневе сальдо $\Delta L`_{i\text{в.}}$, $\Delta L`_{\text{н}.j}$ прогресивного і $\Delta L`_{i\text{н.}}$, $\Delta L`_{\text{в}.j}$ регресивного пересування, як і групове сальдо $\Delta L_{\underline{\text{н.}}}$ прогресивного і $\Delta L_{\underline{\text{в.}}}$ регресивного пересування, є завжди додатним і від'ємним відповідно, то *p*-рівневе (поза *p*-рівневе) сальдо прогресивного $\Delta L_{p\frac{\text{н.}}{\text{в.}}}$ ($\Delta L_{\langle p\rangle\frac{\text{н.}}{\text{в.}}}$) і регресивного $\Delta L_{p\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}$ ($\Delta L_{\langle p\rangle\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}$) пересування може бути і додатним, і від'ємним. Оскільки основним призначенням шуканого коефіцієнта є порівняння абсолютних значень показників, представлених альтернативними категоріями пересування, то доречним є визначення коефіцієнта ефективності по модулю. Якщо так, то область визначення цих

коефіцієнтів – від 0 до ∞. Якщо $0 \le K_{\text{еф.}} \le 1$, вплив є неефективним, тому що або відсутні очікувані пересування ($K_{\text{еф.}} = 0$), або не очікувані пересування домінують над очікуваними ($0 < K_{\text{еф.}} < 1$), або вони є рівноцінними ($K_{\text{еф.}} = 1$). Якщо $K_{\text{еф.}} > 1$, то вплив тим ефективніший, чим більше очікувані пересування домінують над не очікуваними.

Раніше показники міжрівневого балансу були систематизовані за такими критеріями як «ступінь агрегування» (парні, частинні, часткові) і «межі руху» (рівневі, групові, загальні), і вони закономірно пов'язані між собою. Серед цих взаємозв'язків, доречних для оцінки ефективності впливу, в доповнення до вже наведених вище виділимо вирази, представлені в таблиці.

Таблиця

*Абсолютні балансові показники пересування одиниць об'єкта і їх взаємозв'язки*

| Вид показника | | Пересування за напрямом | |
|---|---|---|---|
| | | прогресивне | регресивне |
| на опорному рівні *p* | | | |
| Частковий | Рівневий | $\Delta L_{p\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \begin{cases} \sum_{j=p+1}^{k} \Delta L_p^{\langle ij \rangle}\Big\vert_{i<p,1\le p<k} & (1) \\ \sum_{i=1}^{p-1} \Delta L_p^{\langle ij \rangle}\Big\vert_{j>p,1<p\le k} & (2) \end{cases}$<br>$\Delta L_{\langle p \rangle\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \begin{cases} \sum_{j=p+1}^{k} \Delta L_{ij}^{\langle p \rangle}\Big\vert_{i<p,1\le p<k} & (1) \\ \sum_{i=1}^{p-1} \Delta L_{ij}^{\langle p \rangle}\Big\vert_{j>p,1<p\le k} & (2) \end{cases}$ | $\Delta L_{p\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} = \begin{cases} \sum_{i=p+1}^{k} \Delta L_p^{\langle ij \rangle}\Big\vert_{j<p,1\le p<k} & (1) \\ \sum_{j=1}^{p-1} \Delta L_p^{\langle ij \rangle}\Big\vert_{i>p,1<p\le k} & (2) \end{cases}$<br>$\Delta L_{\langle p \rangle\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} = \begin{cases} \sum_{i=p+1}^{k} \Delta L_{ij}^{\langle p \rangle}\Big\vert_{j<p,1\le p<k} & (1) \\ \sum_{j=1}^{p-1} \Delta L_{ij}^{\langle p \rangle}\Big\vert_{i>p,1<p\le k} & (2) \end{cases}$ |
| | Груповий | $\Delta L_{\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \begin{cases} \sum_{p=1}^{k} \Delta L_{p\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} & (1) \\ \sum_{p=1}^{k} \Delta L_{\langle p \rangle\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} & (2) \end{cases}$ | $\Delta L_{\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} = \begin{cases} \sum_{p=1}^{k} \Delta L_{p\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} & (1) \\ \sum_{p=1}^{k} \Delta L_{\langle p \rangle\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} & (2) \end{cases}$ |
| Частинний | Рівневий | $\Delta L_p = \Delta L_{p\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} + \Delta L_{p\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}$ | |
| | Груповий | $\Delta L = \sum_{p=1}^{k} \Delta L_p$ | |
| через вибуття з рівня *i* (1) та прибуття на рівень *j* (2) | | | |
| Частковий | Рівневий | $\begin{cases} \Delta L\grave{}_{i\text{в.}}\big\vert_{i=\overline{1,k-1}} = \sum_{j=i+1}^{k} \Delta L_{ij} & (1) \\ \Delta L\grave{}_{\text{н.}j}\big\vert_{j=\overline{2,k}} = \sum_{i=1}^{j-1} \Delta L_{ij} & (2) \end{cases}$ | $\begin{cases} \Delta L\grave{}_{i\text{н.}}\big\vert_{i=\overline{2,k}} = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta L_{ij} & (1) \\ \Delta L\grave{}_{\text{в.}j}\big\vert_{j=\overline{1,k-1}} = \sum_{i=j+1}^{k} \Delta L_{ij} & (2) \end{cases}$ |
| | Груповий | $\Delta L_{\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{k-1} \Delta L\grave{}_{i\text{в.}}, & (1) \\ \sum_{j=2}^{k} \Delta L\grave{}_{\text{н.}j} & (2) \end{cases}$ | $\Delta L_{\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} = \begin{cases} \sum_{i=2}^{k} \Delta L\grave{}_{i\text{н.}}, & (1) \\ \sum_{j=1}^{k-1} \Delta L\grave{}_{\text{в.}j} & (2) \end{cases}$ |
| Частинний | Рівневий | $\begin{cases} \Delta L_{\text{В}i} = \Delta L\grave{}_{i\text{в.}} + \Delta L\grave{}_{i\text{н.}} & (1) \\ \Delta L_{\text{П}j} = \Delta L\grave{}_{\text{н.}j} + \Delta L\grave{}_{\text{в.}j} & (2) \end{cases}$ | |
| | Груповий | $\Delta L = \begin{cases} \sum_{i=1}^{k} \Delta L_{\text{В}i}, & (1) \\ \sum_{j=1}^{k} \Delta L_{\text{П}j} & (2) \end{cases}$ | |

Скориставшись ними, коефіцієнти ефективності можна виразити через складові балансу, представлені на різних рівнях їх систематизації за даними критеріями.

Враховуючи, що для обох напрямів пересування принцип формування шуканих показників той же самий, для його демонстрації обмежимося вираженням коефіцієнта ефективності впливу щодо прогресивного пересування. Так, через парні показники абсолютного сальдо він визначається таким чином:

- як рівневий:

$$K_{\text{еф.}p\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \begin{cases} \left| \sum_{j=p+1}^{k} \Delta L_p^{\langle ij \rangle}\Big\vert_{i<p} : \sum_{i=p+1}^{k} \Delta L_p^{\langle ij \rangle}\Big\vert_{j<p} \right|, 1 \le p < k \ (1) \\ \left| \sum_{i=1}^{p-1} \Delta L_p^{\langle ij \rangle}\Big\vert_{j>p} : \sum_{j=1}^{p-1} \Delta L_p^{\langle ij \rangle}\Big\vert_{i>p} \right|; \ 1 < p \le k \ (2) \end{cases} \quad (9)$$

$$K_{\text{еф.}\langle p\rangle\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \begin{cases} \left|\sum_{j=p+1}^{k}\Delta L_{ij}^{\langle p\rangle}\Big|_{i<p} : \sum_{i=p+1}^{k}\Delta L_{ij}^{\langle p\rangle}\Big|_{j<p}\right|, 1 \le p < k\ (1) \\ \left|\sum_{i=1}^{p-1}\Delta L_{ij}^{\langle p\rangle}\Big|_{j>p} : \sum_{j=1}^{p-1}\Delta L_{ij}^{\langle p\rangle}\Big|_{i>p}\right|;\ 1 < p \le k\ (2) \end{cases} \quad (10)$$

і

$$\begin{cases} K_{\text{еф.}i\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}^{`} = \left|\sum_{j=i+1}^{k}\Delta L_{ij} : \sum_{j=1}^{i-1}\Delta L_{ij}\right|, i = \overline{2, k-1}\ (1) \\ K_{\text{еф.}\frac{\text{н.}}{\text{в.}}j}^{`} = \left|\sum_{i=1}^{j-1}\Delta L_{ij} : \sum_{i=j+1}^{k}\Delta L_{ij}\right|; j = \overline{2, k-1}\ (2) \end{cases} \quad (11)$$

- як груповий:

$$K_{\text{еф.}\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \begin{cases} \left|\sum_{p=1}^{k}\sum_{j=p+1}^{k}\Delta L_{p}^{\langle ij\rangle}\Big|_{i<p}^{1\le p<k} : \sum_{p=1}^{k}\sum_{i=p+1}^{k}\Delta L_{p}^{\langle ij\rangle}\Big|_{j<p}^{1\le p<k}\right|, (1) \\ \left|\sum_{p=1}^{k}\sum_{i=1}^{p-1}\Delta L_{p}^{\langle ij\rangle}\Big|_{j>p}^{1<p\le k} : \sum_{p=1}^{k}\sum_{j=1}^{p-1}\Delta L_{p}^{\langle ij\rangle}\Big|_{i>p}^{1<p\le k}\right|; (2) \end{cases} \quad (12)$$

$$K_{\text{еф.}\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \begin{cases} \left|\sum_{p=1}^{k}\sum_{j=p+1}^{k}\Delta L_{ij}^{\langle p\rangle}\Big|_{i<p}^{1\le p<k} : \sum_{p=1}^{k}\sum_{i=p+1}^{k}\Delta L_{ij}^{\langle p\rangle}\Big|_{j<p}^{1\le p<k}\right|, (1) \\ \left|\sum_{p=1}^{k}\sum_{i=1}^{p-1}\Delta L_{ij}^{\langle p\rangle}\Big|_{j>p}^{1<p\le k} : \sum_{p=1}^{k}\sum_{j=1}^{p-1}\Delta L_{ij}^{\langle p\rangle}\Big|_{i>p}^{1<p\le k}\right|; (2) \end{cases} \quad (13)$$

або

$$K_{\text{еф.}\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \begin{cases} \left|\sum_{i=1}^{k-1}\sum_{j=i+1}^{k}\Delta L_{ij} : \sum_{i=2}^{k}\sum_{j=1}^{i-1}\Delta L_{ij}\right|, (1) \\ \left|\sum_{j=2}^{k}\sum_{i=1}^{j-1}\Delta L_{ij} : \sum_{j=1}^{k-1}\sum_{i=j+1}^{k}\Delta L_{ij}\right|. (2) \end{cases} \quad (14)$$

У такій інтерпретації ефективність впливу можна пояснити, з одного боку, міжрівневим заміщенням (формалізованим як міжрівневе $p$-рівневе $\Delta L_p^{\langle ij\rangle}$ і поза $p$-рівневе $\Delta L_{ij}^{\langle p\rangle}$ сальдо) одиниць об'єкта на опорному рівні $p$, яке зумовлене одночасно прогресивним і регресивним прибуттям $n_{ip}$ одиниць на рівень $p$ з того чи іншого рівня $i$ та прогресивним і регресивним вибуттям $n_{pj}$ одиниць з рівня $p$ на той чи інший рівень $j$ (системи рівнянь (9), (10) і (12), (13)), а з іншого боку, одночасно міжрівневим поповненням і міжрівневими втратами об'єкта (міжрівневе сальдо $\Delta L_{ij}$), обумовленими відповідно прогресивно і регресивно вибулими з рівня $i$ на той чи інший рівень $j$ (рівняння (1)) або прогресивно і регресивно прибулими на рівень $j$ з того чи іншого рівня $i$ (рівняння (2)) $n_{ij}$ одиницями об'єкта (системи рівнянь (11) і (14)).

Оскільки прогресивне і регресивне пересування – це дві альтернативні складові руху, пов'язані між собою результатом балансу, то ефективність впливу можна виразити через їх співвідношення – відносний балансовий показник пересування. Оцінимо її на прикладі формування загального коефіцієнта ефективності:

$$K_{\text{еф.}\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} = \left|\left(\Delta L - \Delta L_{\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}\right) : \Delta L_{\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}\right| = \left|1 : (\Delta L_{\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} : \Delta L) - 1\right| = \left|1 : \widehat{K}_{\text{РП}\frac{\text{в.}}{\text{н.}}} - 1\right| = \left|\widehat{K}_{\text{РП}\frac{\text{н.}}{\text{в.}}} : \widehat{K}_{\text{РП}\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}\right|, \quad (15)$$

де $\widehat{K}_{\text{РП}\frac{\text{н.}}{\text{в.}}}$ і $\widehat{K}_{\text{РП}\frac{\text{в.}}{\text{н.}}}$ – часткові групові коефіцієнти структури рівневого приросту за напрямом пересування: прогресивного і регресивного відповідно. Перетворення (15) доречні за відсутності рівноваги втрат і поповнення об'єкта ($\Delta L = 0$).

І вираз (7), і вираз (15) свідчать про те, які складові наслідків керуючого впливу на об'єкт, поповнення чи втрати останнього щодо сукупного значення ознаки, вимірюваної в усіх його одиниць, що зазнають прогресивні чи регресивні пересування відповідно, мають перевагу у структурі наслідків, які визначаються як сальдо пересування.

**Висновки відповідно до статті.** Завдяки моделі міжрівневого балансу, синтезованій раніше в агрегатній формі, вдалося сформувати категорію агрегованих балансових показників міжрівневого пересування одиниць об'єкта. Ними, разом з іншими показни-

ками балансу, забезпечується всебічна оцінка наслідків і ефективність керуючого впливу на структурований об'єкт, що пояснюється зміною структури останнього щодо ознаки, вимірюваної у його одиниць в шкалі відношень. Подібні показники є універсальними для оцінювання ефективності організації процесів з даними в інформаційних системах, в тому числі в частині управління їх швидкодією, енергомісткістю щодо зберігання, обробки та передачі інформації, й передбачає вимірювання величин ресурсних витрат з подальшим визначенням відповідних коефіцієнтів ефективності.

## Список використаних джерел

1. Терехов Л. Л. Экономико-математические методы. Москва: Статистика, 1968. 360 с.

2. Вашків П. Г., Пастер П. І., Сторожук В. П., Ткач Є. І. Теорія статистики: навчальний посібник. Київ: Либідь, 2001. 320 с.

3. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б. И. Копылова. Москва: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.

4. Мыльник В. В., Титаренко Б. П., Волочиенко В. А. Исследование систем управления: Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Академический Проект, 2003. 352 с.

5. Орлов А. И. Прикладная статистика: учебник. Москва: Экзамен, 2006. 671 с.

6. Економіко-математичне моделювання: навч. посіб. / за заг. ред. В. В. Вітлінського. Київ: КНЕУ, 2008. 536 с.

7. Ильин А. В., Емельянов С. В., Фомичёв В. В., Фурсов А. С. Математические методы теории управления. Проблемы устойчивости, управляемости и наблюдаемости. Москва: Физматлит, 2014. 200 с.

8. Попов А. М., Сотников В. Н. Экономико-математические методы и модели: учебник для прикладного бакалавриата / под общ. ред. А. М. Попова. 3-е изд. испр. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2015. 345 с.

9. Кожевина О. В. Управление изменениями: учебник. Москва: ИНФРА-М, 2016. 304 с.

10. Дубягін О. Б. Модель міжрівневого балансу: агрегатна форма. *Технічні науки та технології*: науковий журнал. 2018. № 3 (13). С. 96–104.

## References

1. Terekhov, L. L. (1968). *Ekonomiko-matematicheskie metody [Economic and mathematical methods]*. Moscow: Statistika [in Russian].

2. Vashkiv, P. H., Paster, P. I., Storozhuk, V. P., Tkach, Ye. I. (2001). *Teoriia statystyky [Statistics Theory]*. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].

3. Dorf, R., Bishop, R. (2002). *Sovremennye sistemy upravleniia [Modern control systems]*. Moscow: Laboratoriia bazovykh znanii [in Russian].

4. Mylnik, V. V., Titarenko, B. P., Volochienko, V. A. (2003). *Issledovanie sistem upravleniia [Modern control systems]*. Moscow: Akademicheskii Proekt [in Russian].

5. Orlov, A. I. (2006). *Prykladnaia statystyka [Applied statistics]*. Moscow: Ekzamen [in Russian].

6. Vitlinskoho, V. V. (Ed.). (2008). *Ekonomiko-matematychne modeliuvannia [Economic and mathematical modeling]*. Kyiv: KNEU [in Ukrainian].

7. Ilin, A. V., Emelianov, S. V., Fomichev, V. V., Fursov, A. S. (2014). Matematicheskie metody teorii upravleniia. Problemy ustoichivosti, upravliaemosti i nabliudaemosti *[Problems of stability, controllability and observability]*. Moscow: Fizmatlit [in Russian].

8. Popov, A. M. (Ed.). (2015). *Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli [Economic and mathematical methods and models]*. Moscow: Izdatelstvo Yurait [in Russian].

9. Kozhevina, O. V. (2016). *Upravlenie izmeneniiami [Change management]*. Moscow: INFRA-M [in Russian].

10. Dubiahin, O. B. (2018). *Model mizhrivnevoho balansu: ahrehatna forma [Inter-level balance model: aggregate form]*. Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*UDC 311+512*

*Alexander Dubyagin, Volodymyr Guryev, Irina Firsova*

# EFFICIENCY OF MANAGING IMPACT ON A STRUCTURED OBJECT AS A NUMERICAL CHARACTERISTIC OF INTER-LEVEL BALANCE

***Urgency of the research.*** *A quantitative assessment of the effectiveness of the control action on a structured object that is experiencing unpredictable losses or replenishment on the basis of its units in the relationship scale is relevant for solving managerial tasks of any industry focus.*

***Target setting.*** *The existing assessment methodologies do not take into account the factor of movement of the object units from one level of the attribute to another, which is why the structural analysis of the results of exposure is incomplete. It is possible to overcome this problem through the use of aggregated balance indicators of the inter-level movement of units of an object.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *The previously proposed system of inter-level balance indicators, which include balance indicators of the movement of object units, represents these indicators both in the values of the level numbers of the latter and in the values of the attribute measured in them.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *Evaluation of the impact effectiveness through the components of the balance, explained by the inter-level movement of the object units.*

***The research objective.*** *To formulate the coefficients of managing effectiveness the structured object on the basis of inter-level balance indicators, presented in aggregate form.*

***The statement of basic materials.*** *Structural shifts of the managed object are proposed to evaluate the absolute and average balance indicators of the inter-level movement of its units, represented by its alternative categories: progressive and regressive movement. Comparison between these indicators, as components of the balance, which represent the expected and not expected movements, gives an idea of the effectiveness of the control action on an object in the form of the coefficient of the same name. Since the balance indicators are presented at different levels of their systematization according to the criteria "degree of aggregation" and "movement limits", then the efficiency coefficients can be defined in the corresponding species categories as level or group.*

***Conclusions.*** *The proposed coefficients make it possible to explain the effectiveness of the control effect on a structured object by the factor of the inter-level movement of its units.*

***Keywords:*** *losses; efficiency; control action; coefficient; inter-level balance; an object; replenishment; balance.*
*Tabl.: 1. Fig.: 1. Bibl.: 10.*

**Дубягін Олександр Борисович** – кандидат технічних наук, доцент, м. Чернігів, Україна.
**Dubyagin Alexander** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv, Ukraine.
**E-mail:** aleksandrdubagin@gmail.com
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-9512-242X
**ResearcherID:** G-9774-2014

**Гур'єв Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри кібербезпеки та математичного моделювання, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Guryev Volodymyr** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Cybersecurity and Mathematical Modeling Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** guryev54@ukr.net
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-9507-5408
**ResearcherID:** G-9807-2016

**Фірсова Ірина Валеріївна** – старший викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Firsova Irina** – Senior Lecturer of Information and Computer Systems Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** I.firsova@ukr.net
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1126-1516
**ResearcherID:** R-4243-2016

Дубягін О., Гур'єв В., Фірсова І. Ефективність керуючого впливу на структурований об'єкт як числова характеристика міжрівневого балансу. *Технічні науки та технології.* 2020. № 1 (19). С. 133-139.

*УДК 519.252*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-140-155*

*Світлана Корнієнко, Ігор Корнієнко,*
*Володимир Дмитрієв, Анатолій Павленко, Дмитро Камак*

# ФОРМУВАННЯ КІЛЬКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИПРОБУВАНЬ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ТОЧКОВИХ ОЦІНОК ЗАДАНОЇ ЯКОСТІ

***Актуальність теми дослідження.*** *Одне з найважливіших і трудомістких завдань при підготовці методик випробувань полягає в розрахунках кількісних характеристик випробувань, автоматизація яких при масовому проведенні випробувань стає актуальним завданням.*

***Постановка проблеми.*** *Ефективність функціонування випробувальної організації визначається часовими та якісними характеристиками проведення випробувань, де під якістю випробування розуміється відповідність одержаних оцінок параметрам випробувальних зразків. Вірогідність оцінок досягається неухильним та правильним проведенням випробування відповідно до розробленої методики, у якій вказуються, зокрема кількісні характеристики випробування конкретного зразка.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *На сьогодні є багато фундаментальних праць з питань планування експериментів, обробки їх результатів та одержання оцінок заданої якості. Останнім часом чимало наукових робіт присвячено автоматизації процесів підготовки, проведення та обробки результатів випробувань.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Алгоритмізація та автоматизація процесів планування у випробувальній організації має на меті суттєве спрощення, прискорення та позбавлення помилок при розробці методик випробування озброєння та військової техніки.*

***Постановка завдання.*** *Для моделювання процесів функціонування випробувальної організації і знаходження оптимальних режимів структури та параметрів виробничого процесу пропонується використання аналітичної моделі теорії систем масового обслуговування. Одним зі структурних елементів моделі має бути модуль планування випробувань, для якого необхідно розробити та підготувати до алгоритмування математичний апарат визначення кількісних характеристик плану проведення випробувань для одержання точкових оцінок параметрів зразку заданої точності й надійності, а також втрати надійності точкової оцінки внаслідок змушеного зменшення кількості випробувань.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Сформовано структурно-функціональну схему модуля розрахунків кількісних характеристик випробувань. Розглянуто теоретичне питання одержання точкових оцінок параметрів випробувального зразку заданої точності та надійності. Обчислені кількісні характеристики випробувань для стандартизованих значень точності та надійності. Розглянуто питання зниження надійності оцінок при вимушеному зменшенні кількості дослідів. Визначені кількісні характеристики серійності випробувань для забезпечення надійності оцінок.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Застосування розглянутого математичного апарату визначення кількісних показників плану проведення випробувань для одержання точкових оцінок параметрів зразку заданої точності й надійності в системі планування та управління випробуваннями дозволить суттєво скоротити часові витрати на підготовку до випробування, а алгоритмізація та подальша автоматизація дасть змогу уникнути впливу людського чинника при підготовці методик випробування.*

***Ключові слова:*** *випробування; автоматизація; оцінка; точність; надійність.*
*Табл.: 7. Рис.: 7. Бібл.: 20.*

**Актуальність теми дослідження.** Одне з найважливіших і трудомістких завдань при підготовці методик випробувань полягає в розрахунках кількісних характеристик випробувань, автоматизація яких при масовому проведенні випробувань стає актуальним завданням.

**Постановка проблеми.** Проведення випробувань озброєння та військової техніки (ОВТ) являє собою складний процес підтвердження придатності виробів до практичного застосування. Одним із відповідальних та трудомістких етапів випробування є безпосередньо планування випробування та розробка програми (плану) і методики проведення експериментальних досліджень. Характерною ознакою планування є те, що незважаючи на унікальність випробувальних зразків, сама процедура планування має певну типовість, що дозволяє алгоритмізувати її, а відповідно, й автоматизувати. Правильно поставлена задача з автоматизації будь-яких процесів або систем призвана не тільки спростити ручну працю, і за рахунок цього сягнути нових часових характеристик виконання завдань, але й застосувати оптимізаційні механізми та процедури, що виведе виробничий процес (у нашому випадку випробувальний) на новий рівень якості.

Важливим чинником успішного розв'язання задачі оптимального планування випробувань є визначення мінімально необхідних, але достатніх кількісних характеристик плану випробування того чи іншого конкретного зразка ОВТ. Планування проведення випробувань у частині одержання достовірних оцінок придатності зразку до виконання завдань за призначенням ґрунтується на методах теорії ймовірностей, математичної

© Корнієнко С. П., Корнієнко І. В., Дмитрієв В. А., Павленко А. Г., Камак Д. О., 2020

статистики та теорії планування експериментів з урахуванням впливу певних обмежувальних факторів, які найбільше притаманні саме ОВТ і які можуть обмежувати кількість проведених дослідів, зокрема вартість зразку, наслідки проведення експерименту, часові терміни підготовки та виготовлення зразку тощо.

Такі обмеження встановлюються експертами (фактично в ручному режимі з урахуванням можливих наслідків для надійності та точності оцінок випробувальних зразків) з огляду на конкретні умови й можливості проведення експерименту. Тут для створення підсистеми адекватного планування кількості випробувань (що фактично є аналогом існуючих систем підтримки виробничого процесу) доцільно мати інструмент (програмний модуль), який дозволить у режимі реального часу розраховувати потрібні кількісні характеристики випробувального процесу, наочно їх представляти та давати оцінки наслідків фактичного зменшення кількості випробувань. Така система буде аналогом системи підтримки експертних рішень.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Нині теорія планування експериментів та випробувань має достатньо розвинений математичний апарат. Фундаментальні праці, наприклад [1-7], розглядають теоретичні викладки та практичну реалізацію методів математичної статистики при одержанні ймовірнісних результатів експериментів та їх оцінювання. Чималий розвиток одержала математична теорія експерименту, яка досліджувалася багатьма вченими в різних наукових сферах, наприклад [8-12], і в якій нині активно продовжуються відшукання нових теорій і методів одержання принципово нових якісних результатів, наприклад [13–16], у тому числі в задачах автоматизації випробувань та експериментів [17].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Випробування певного зразка ОВТ має на меті підтвердження або спростування його якості через фактичне визначення та підтвердження значень параметрів тактико-технічних характеристик, що були задані замовником. Попри те, що характеристики можуть мати якісний або кількісний характер, їх підтвердження переважно здійснюється за двома можливими випадками:

1. У процесі випробувань зразка одержана оцінка $w_i$ його певної $i$-ої характеристики $h_i$, при цьому значення оцінки максимально наближене до значення заявленої характеристики

$$\left|w_i - h_i\right| = \varepsilon_i;\ \varepsilon_i \to 0, \tag{1}$$

де ε – точність (відхилення) одержаної оцінки.

2. У ході випробувань зразка одержана оцінка $w_i$ його певної $i$-ої характеристики $h_i$, при цьому значення оцінки є не гірше значення заявленої характеристики

$$w_i \geq h_i;\ Q(h_i) \to \max;\ w_i \leq h_i;\ Q(h_i) \to \min. \tag{2}$$

Сутність таких двох нерівностей полягає в тому, що в першій нерівності якість характеристики вважається максимальною при зростанні її значення; у другій нерівності, навпаки, значення характеристики повинно бути мінімальним. Тут виконання нерівності (2) фактично є підтвердженням, що задана замовником тактико-технічна характеристика зразка підтверджена.

Відповідно, підсистема планування кількості випробувань має враховувати всі перелічені випадки та дозволяти здійснювати розрахунки не лише кількісних характеристик плану випробувань для отримання оцінки $w_i$ заданої якості, але й оцінювати зниження показників якості $w_i$ при навмисному обмеженні кількості або тривалості випробувань. Подібні автоматизовані розрахунки потребуватимуть алгоритмування чітко представленого математичного апарату розрахунку кількісних характеристик плану випробувань.

На цьому етапі розглянемо математичний апарат одержання точкової оцінки характеристики досліджуваного зразка заданої точності та надійності для випадку (1).

**Постановка завдання.** Є випробувальна організація, основне функціональне призначення якої – проведення повного циклу випробувань зразків ОВТ, що включає зокрема й підготовку методик проведення випробування. Одним з основних завдань методики є опис порядку проведення випробувань з метою одержання точних та достовірних оцінок показників тактико-технічних характеристик ОВТ. Для одержання оцінок заданої якості використовують математичний апарат теорії ймовірностей та математичної статистики, а також методи планування експерименту, автоматизація застосування яких дозволить суттєво скоротити час на підготовку методик та прибрати людський фактор як джерело можливих помилок плану випробувань.

Необхідно розробити та підготувати до алгоритмування математичний апарат визначення кількісних показників плану проведення випробувань для одержання точкових оцінок параметрів зразка заданої точності й надійності, а також оцінці наслідків навмисного зниження кількісних параметрів плану випробувань.

**Виклад основного матеріалу.** Управління процесами планування, підготовки та проведення випробувань у випробувальній організації потребує відшукання оптимальних рішень. Зважаючи на динамічність усіх процесів у випробувальній організації, певну унікальність (неповторність у певних межах) виконання технологічних операцій над тим чи іншим зразком ОВТ, у [18; 19] запропоновано використання аналітичного апарату систем масового обслуговування (СМО) для одержання оцінок ефективності випробувальних процесів (загальна схема представлення процесів у випробувальній організації наведена на рис. 1).

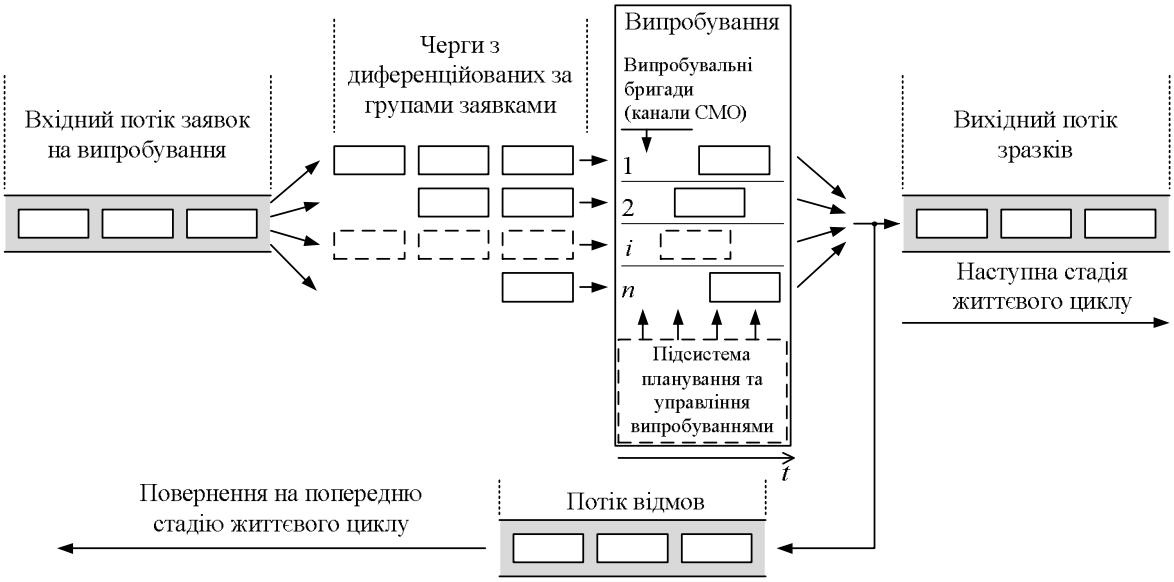



*Рис. 1. Загальне представлення моделі СМО випробувань*

У межах мети цієї статті становить інтерес «Підсистема планування та управління випробуваннями», а саме функціонування модуля «Планування кількості випробувань», структурно-функціональну схему якого (у частині розрахунків кількісних параметрів випробувань) представимо у вигляді блок-схеми (рис. 2).

На схемі рис. 2 позначено $H_z \in \{h_1, h_{2,...,} h_m\}$ – заданий набір параметрів випробувального зразка, $n$ – кількість випробувань, $\varepsilon,\gamma$ – відповідно точність та надійність оцінок випробування, $n', \varepsilon', \gamma'$ – кориговані показники кількості випробувань, точності та надійності оцінок.

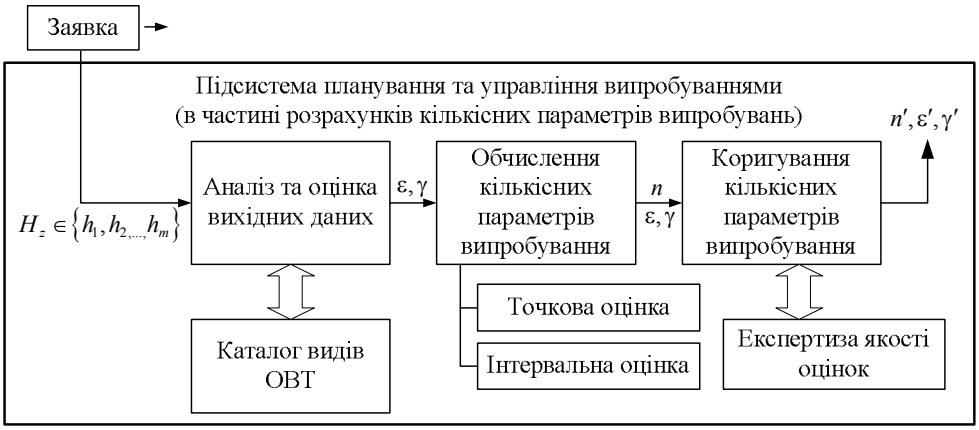



*Рис. 2. Фрагмент підсистеми планування та управління випробуваннями*

Розглянемо процес планування кількісних характеристик випробувань. Існує два можливих випадки планування кількості випробувань, які визначаються конкретним видом випробування:

1. Є зразок, якій потрібно оцінити по деякій кількості дослідів $n$ та визначити імовірність його успішного функціонування, або потрібно підтвердити характеристику, при цьому початкова ймовірність реалізації такої характеристики невідома або вона недостовірна.

2. Задана початкова імовірність для реалізації певної характеристики досліджуваного зразка, де в результаті випробувань необхідно її підтвердити.

Оскільки результат випробування, а саме одержана оцінка характеристики, завжди носить ймовірнісний характер, то для автоматизації процесів планування і закладання математичного апарату в алгоритм, необхідно визначити мінімальну кількість повторень дослідів випробування, для одержання оцінок, які володіють потрібною точністю та надійністю.

Розглянемо перший випадок, коли невідома початкова реалізація характеристики, і визначимо для неї кількість необхідних послідовних повторень того ж самого випробування у відносно однакових умовах проведення, при цьому кількість повторень випробування має забезпечити одержаний результат (оцінку) наперед заданій точності й надійності. Початкова реалізація характеристики здебільшого задається ймовірністю появи події – «успіху» в цій характеристиці будь-то при випробуваннях або при штатному функціонуванні зразка. Для спрощення розглядів можливих варіацій випробувань введемо деякі припущення:

– «успіх» випробування визначається одержаним позитивним результатом виконання вимог (1);

– «успіх» у кожному випробуванні не залежить від настання чи ненастання в кожному попередньому і не впливає на «успіх» у кожному наступному випробуванні.

Очевидно, що при проведенні випробувань частота появи «успіхів» повинна прямувати до числа дослідів (повторень випробування), або принаймні не бути меншою, ніж заявлена ймовірнісна характеристика певного досліджуваного зразка й повинна бути однаковою для всіх послідовних випробувань. Позначимо заявлену ймовірнісну характеристику деякого параметра зразка через $p$, яка з логічних міркувань має знаходитись у межах $0 < p \le 1$, а відносну частоту «успіхів» при проведенні натурних випробувань через $W$, $W = \frac{k}{n}$, де $k$ – число «успіхів» у проведеній випробувань з $n$ повторень; тоді для забезпечення необхідної точності оцінки повинна виконуватись умова $|W - p| < \varepsilon$, де $\varepsilon$ – наперед задана як завгодно мала величина (мале число), яку назвемо заданою точністю. Виконання цієї умови дозволить стверджувати про те, що зразок відповідає заявленій характеристиці.

Із закону великих чисел (теорема Бернулі) відомим фактом є те, що при великій кількості повторень випробувань $(n \to \infty)$ відхилення відносної частоти $W$ від заявленої характеристики $p$ є практично вірогідною подією: $\lim\limits_{n\to\infty} P\left(|W - p| < \varepsilon\right) = 1$, при чому у [1] зазначено, що така ймовірність фактично настає при $n \to 500$. На практиці, у більшості випадків випробувань зразків ОВТ, така кількість повторень фактично неможлива, оскільки той самий зразок неможливо використати безліч разів і при цьому стверджувати, що випробування проведені в однакових умовах, оскільки кожного разу дослідний зразок піддається впливу певних факторів «пошкодження» (що впливає на надійність зразка), або потрібно мати велику кількість однакових однотипних зразків, що також у більшості випадків нездійсненно на практиці (фактично це визначає масове виробництво зразка, що неможливо через велику вартість такого несерійного виробництва, складність технологічних процедур виготовлення, великих часових затрат на виготовлення і втрата актуальності або потреби зразка, складна економічна ситуація, шкідливі екологічні або соціальні наслідки виконання випробувань тощо).

Для практичної оцінки здійснення нерівності $|W - p| < \varepsilon$ використовують функцію Лапласа $\Phi(x)$ [1-3],

$$P(|W - p| < \varepsilon) \simeq 2\Phi(x) \tag{3}$$

де $x = \varepsilon\sqrt{\dfrac{n}{pq}}$, $q$ – імовірність ненастання «успіху» у результаті випробування, $q = 1 - p$.

При проведенні випробувань на початкових стадіях дослідження певного зразка теоретична імовірнісна характеристика $p$ є однаковою для всіх випробувань, але часто невідомою, а отже, невідомою є і величина $q$. Проте на початку випробування задана точність відхилення $\varepsilon$ і надійність оцінки зразку $\gamma$, $0 < \gamma < 1$, тобто $\lim\limits_{n\to\infty} P(|W - p| < \varepsilon) \simeq \gamma$, тоді з формули (3)

$$2\Phi(x) = \gamma\ ;\ \Phi(x) = \frac{\gamma}{2}. \tag{4}$$

За таблицею значень функції Лапласа нескладно знайти значення $x_\gamma$, яке відповідає надійності $\gamma$ і з рівності:

$$x_\gamma = \varepsilon\sqrt{\frac{n}{pq}} \tag{5}$$

для заданої точності $\varepsilon$ знайти кількість дослідів (повторень випробувань) $n$.

Для технічних виробів рівень надійності оцінок $\gamma$ часто прийнято обирати рівним 0,99, 0,95, 0,90 або 0,80 [19]. Для забезпечення надійності оцінки $\gamma \geq 0,95$ при використанні (4) значення функція Лапласа становить $\Phi(x) \geq 0,475$, де аргумент набуває значення $x_\gamma \geq 1,96$, а відповідно і

$$\varepsilon\sqrt{\frac{n}{pq}} \geq 1,96. \tag{6}$$

Оскільки значення $pq$ у (6) невідомо, але знаємо, що $pq = p(1-p) = p - p^2$, то можна оцінити значення $pq$ за графіком функції $\varphi(p) = p - p^2$.

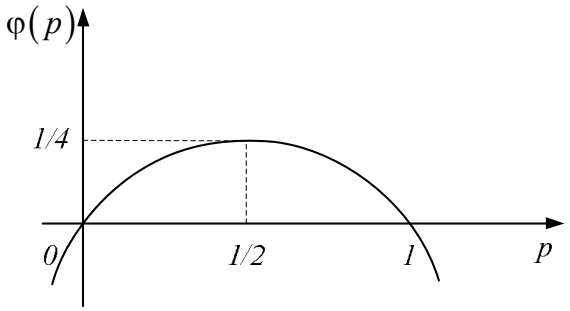



*Рис. 3. Графік функції* $\varphi(p)$

З графіка рис. 3 видно, що значення, яке може приймати добуток ймовірностей $pq$, буде в інтервалі

$$0 < pq \le \frac{1}{4}, \tag{7}$$

або в інтервалі $0<\sqrt{pq}\le 0{,}5$.

Оскільки $0<\sqrt{pq}\le 0{,}5$, то $2\varepsilon\sqrt{n}$ (з нерівності (6)) є найменшим значенням, що може приймати $\varepsilon\sqrt{\frac{n}{pq}}$, звідси очевидно однозначне виконання нерівності

$$\varepsilon\sqrt{\frac{n}{pq}} \ge 2\varepsilon\sqrt{n}\,. \tag{8}$$

З нерівностей (6) і (8) випливає, що $2\varepsilon\sqrt{n} \ge 1{,}96$. Звідси

$$n \ge \left(\frac{1{,}96}{2\varepsilon}\right)^2. \tag{9}$$

Одержане у (9) число *n* на початку досліджень зразка показує, скільки потрібно провести повторень випробування з надійністю $\gamma \ge 0{,}95$, щоб частота появи успіху W відхилялася від *p* не більше ніж *ε*. Графік залежності кількості початкових випробувань для різних значень точності *ε* і надійності *γ* наведений на рисунку 4.

Зрозуміло, що при достатньо малому *ε* частоту W можна прийняти за початкову ймовірнісну характеристику *p* деякого параметра зразку.

Зауважимо, що одержані значення кількості повторень випробування апріорі гарантують визначення початкових ймовірнісних характеристик параметрів зразка на найгірший випадок повної невизначеності щодо якості зразка, коли $p = q = 0{,}5$.

Чисельні показники кількості початкових випробувань для дискретних значень точності та надійності (відповідно до прийнятих значень [20]) наведені в табл. 1.

Оцінимо межі надійного інтервалу для одержаної початкової імовірнісної характеристики *p*. Оскільки величина точності *ε* може бути різною для низки випробувань, то з формули (3) при надійності *γ*

$$P\left(|W - p| < \varepsilon\right) \approx \gamma$$

можна одержати, що шукана *p* повинна знаходитись у межах $\left(W-\varepsilon \le p \le W+\varepsilon\right)$, тобто

$$P\left(W-\varepsilon \le p \le W+\varepsilon\right) \approx \gamma\,, \tag{10}$$

що визначається як надійний (довірчій) інтервал. Однак цей інтервал містить величину $\varepsilon$, яка також може змінюватись залежно від вимог до точності одержання оцінки.

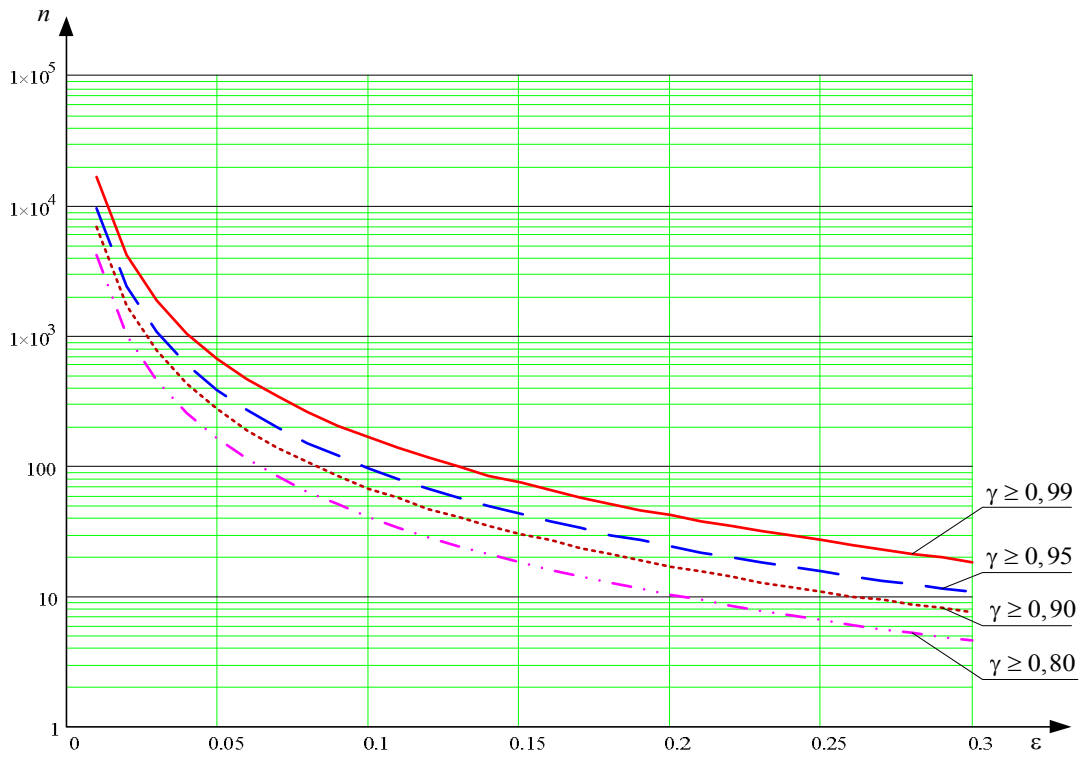



*Рис. 4. Графік залежності кількості повторень випробування для різних значень точності й надійності оцінки*

Таблиця 1

*Мінімальна кількість початкових випробувань*

| $\gamma$ | $x_\gamma$ | ε | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,01 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
| 0,99 | 2,58 | 16641 | 666 | 165 | 74 | 42 |
| 0,95 | 1,96 | 9604 | 385 | 97 | 43 | 25 |
| 0,90 | 1,65 | 6806 | 273 | 69 | 31 | 18 |
| 0,80 | 1,29 | 4161 | 167 | 42 | 19 | 11 |

За умови відсутності такої вимоги можна оцінити одержаний результат випробувань, незважаючи на відсутність величини $\varepsilon$. Використавши (5), одержимо $\varepsilon = x_\gamma\sqrt{\frac{pq}{n}}$ з урахуванням інтервалу (7) маємо $\varepsilon \le \frac{x_\gamma}{2\sqrt{n}}$. За прийнятими умовами надійності $\gamma$ і $P\left(|W-p| < \varepsilon\right) \ge \gamma$ співвідношення (10) матиме такий вигляд

$$P\left(W - \frac{x_\gamma}{2\sqrt{n}} \le p \le W + \frac{x_\gamma}{2\sqrt{n}}\right) \ge \gamma .$$

Це означає, що при надійності $\gamma$ шукана початкова ймовірнісна характеристика $p$ певного параметра зразка при проведенні $n$ повторень випробування потрапляє в надійний інтервал $\left(W - \frac{x_\gamma}{2\sqrt{n}}; W + \frac{x_\gamma}{2\sqrt{n}}\right)$, на підставі чого можна прийняти

$p \approx W \pm \frac{x_\gamma}{2\sqrt{n}}$. Надійні інтервали $p$ для прийнятих значень надійності [19] залежно від кількості повторень дослідів наведено на рис. 5.

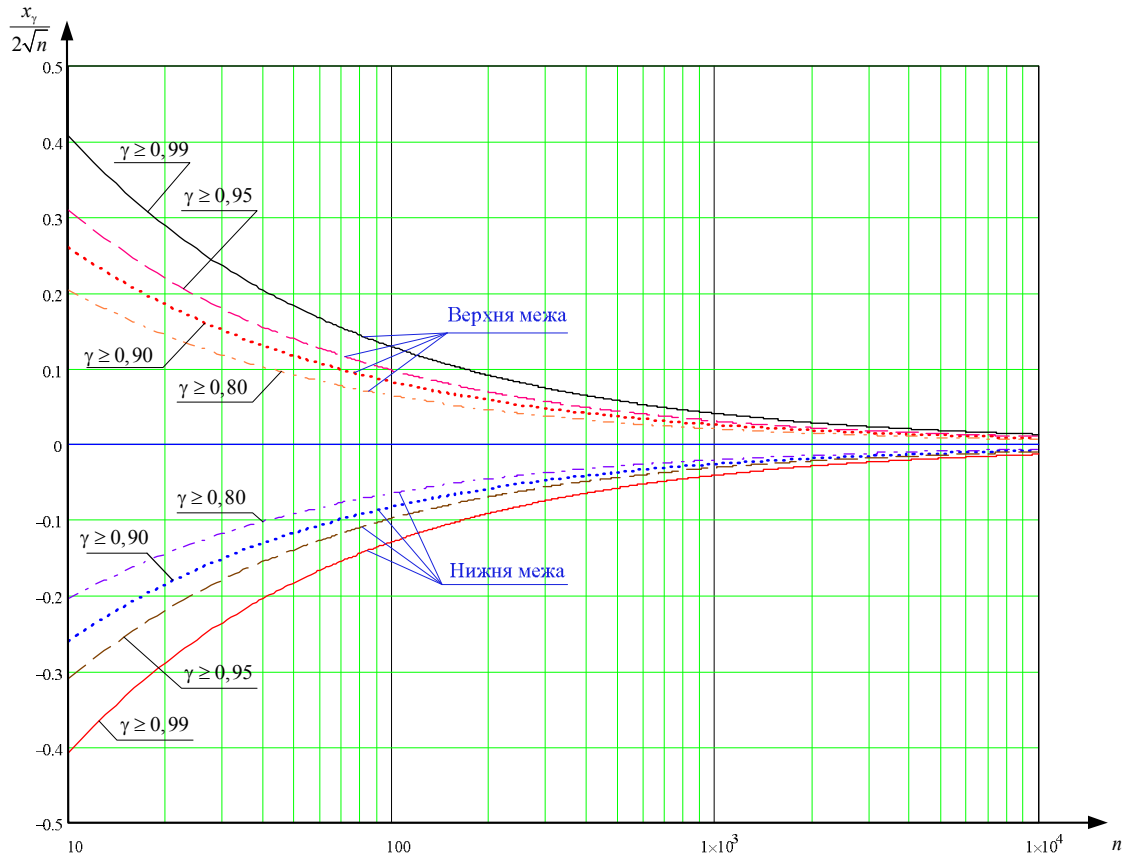



*Рис. 5. Надійний інтервал для початкової імовірнісної характеристики p для різних значень n та надійності γ*

Фактично, графік на рис. 5 показує потенційно можливий розкид початкової ймовірнісної характеристики навколо експериментально знайденої частоти $W$ (яка для наочності умовно прийнята за нульовий відлік). Відповідно замінюючи $p$ частотою $W$ ми робимо помилку не більше ніж $\frac{x_\gamma}{2\sqrt{n}}$, але забезпечення необхідної надійності оцінки потребуватиме збільшення кількості повторень експерименту. Тут потрібно зазначити, що коли $\gamma$ обрано достатньо близько до 1 можна стверджувати, що в одиничній серії випробувань надійний інтервал завжди покриває значення $p$. Отже, маємо значення початкової імовірнісної характеристики $p$ параметра досліджуваного зразку та відповідний надійний (довірчий) інтервал.

При проведенні випробувань другого типу, наприклад визначальних відомчих випробувань, початкова ймовірнісна характеристика $p$ вже задана замовником і є відомою величиною. Тут постає питання, яку мінімальну кількість повторень дослідів потрібно провести для того, щоб з імовірністю, не меншою за $\gamma$, частота настання подій $W$ відхилялася від заданої ймовірнісної характеристики деякого параметра не більше ніж на $\varepsilon$. Якщо є початкова ймовірнісна характеристика $p$, то з формули (5)

$$n \geq \left( \frac{x_\gamma}{\varepsilon} \right)^2 pq, \qquad (11)$$

а для заданого значення надійності $\gamma \geq 0,95$ кількість повторень випробувань $n \geq \left( \frac{1,96}{\varepsilon} \right)^2 pq$. З (11) неважко бачити, що на кількість дослідів суттєво впливає величина $p$, і при наближенні її до одиниці, мінімально необхідна кількість повторень випробувань суттєво знижується (рис. 6).

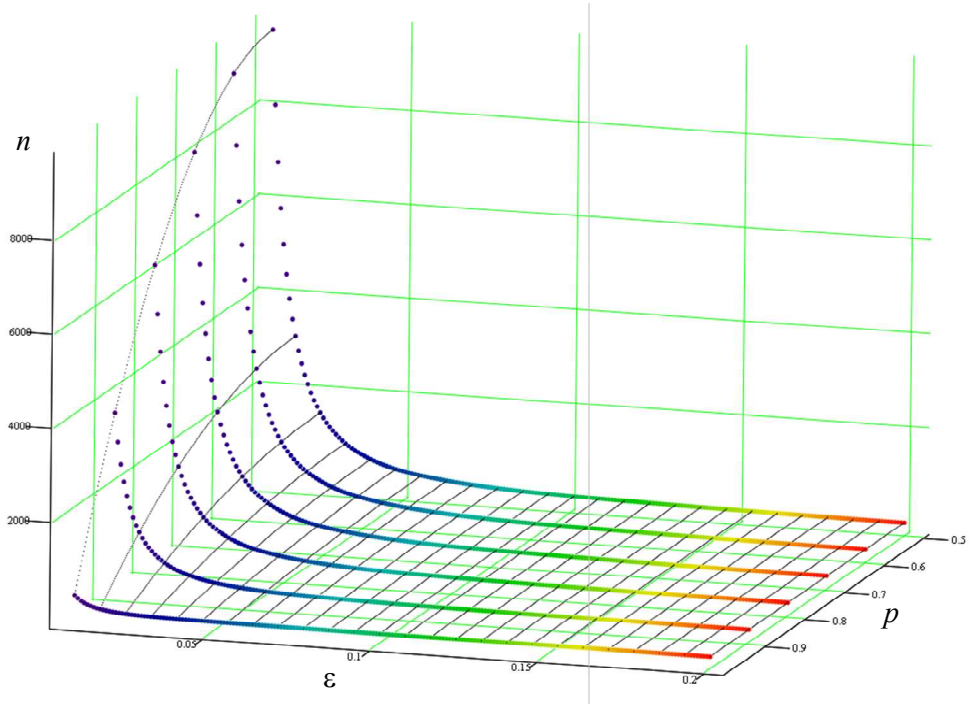



*Рис. 6. Залежність кількості дослідів $n$ від ймовірнісної характеристики параметра $p$ та точності $\varepsilon$ при $\gamma \geq 0,95$*

Для кращої наочності в табл. 2 наведені розрахунки мінімальної кількості повторень випробування для початкових імовірнісних характеристик, що приймають значення $p = \{0,6;\ 0,7;\ 0,8;\ 0,9;\ 0,95;\ 0,99\}$, які проведені за формулою (11).

Таблиця 2

*Мінімально необхідна кількість повторень випробування $n$ для різних значень початкової ймовірнісної характеристики*

| $p$ | $\gamma \geq 0,8$ | | | | $\gamma \geq 0,9$ | | | | $\gamma \geq 0,95$ | | | | $\gamma \geq 0,99$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ε | | | | ε | | | | ε | | | | ε | | | |
| | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
| 0,6 | 160 | 40 | 18 | 10 | 262 | 66 | 30 | 17 | 369 | 93 | 41 | 24 | 640 | 160 | 72 | 40 |
| 0,7 | 140 | 35 | 16 | 9 | 229 | 58 | 26 | 15 | 323 | 81 | 36 | 21 | 560 | 140 | 63 | 35 |
| 0,8 | 107 | 27 | 12 | 7 | 175 | 44 | 20 | 11 | 246 | 62 | 28 | 16 | 427 | 107 | 48 | 27 |
| 0,9 | 60 | 15 | 7 | 4 | 99 | 25 | 11 | 7 | 139 | 35 | 16 | 9 | 240 | 60 | 27 | 15 |
| 0,95 | 32 | 8 | 4 | 2 | 52 | 13 | 6 | 4 | 73 | 19 | 9 | 5 | 127 | 32 | 15 | 8 |
| 0,99 | 7 | 2 | 1 | 1 | 11 | 3 | 2 | 1 | 16 | 4 | 2 | 1 | 27 | 7 | 3 | 2 |

Одержані кількісні характеристики випробувань підтверджують із заданою точністю та надійністю заявлені розробником (виробником) початкові імовірнісні характеристики. З табл. 2 видно, що для випробувань зразків з умовно достовірними параметрами

(коли задана початкова ймовірнісна характеристика $p = 0,99$) за невисокою точністю та надійністю одержання оцінки достатньо одного випробування, при якому має спостерігатися позитивний результат. Підвищення якості оцінки вимагатиме більшої кількості дослідів зразку.

Тут потрібно зауважити, що на практиці можлива певна об'єктивна обмеженість у кількості випробувань, про що зазначалося на початку статті. Тому авторами зроблена спроба оцінки характеристики надійності результатів випробування $\gamma'$ за збереженою заданою точністю $\varepsilon$ при вимушеному зменшенні кількості випробувань.

Для розрахунків кількість дослідів, які наведені в табл. 2 зменшували навпіл, на третину та на чверть. Результати розрахунків наведені в табл. 3–5.

Таблиця 3

*Надійність оцінки $\gamma'$ при зменшенні кількості повторень випробування на $n/2$*

| $p$ | $\gamma \geq 0,8$ | | | | $\gamma \geq 0,9$ | | | | $\gamma \geq 0,95$ | | | | $\gamma \geq 0,99$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | |
| | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
| 0,6 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,78 | 0,83 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 |
| 0,7 | 0,64 | 0,65 | 0,65 | 0,67 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,78 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,85 | 0,93 | 0,93 | 0,94 | 0,94 |
| 0,8 | 0,64 | 0,65 | 0,64 | 0,68 | 0,76 | 0,76 | 0,76 | 0,78 | 0,83 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,94 |
| 0,9 | 0,64 | 0,65 | 0,68 | 0,65 | 0,76 | 0,77 | 0,78 | 0,82 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,86 | 0,93 | 0,93 | 0,94 | 0,94 |
| 0,95 | 0,64 | 0,64 | 0,67 | 0,64 | 0,76 | 0,78 | 0,77 | 0,81 | 0,84 | 0,85 | 0,88 | 0,89 | 0,93 | 0,93 | 0,95 | 0,93 |
| 0,99 | 0,69 | 0,69 | * | * | 0,78 | 0,84 | 0,87 | * | 0,84 | 0,84 | 0,87 | * | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,96 |

Таблиця 4

*Надійність оцінки $\gamma'$ при зменшенні кількості повторень випробування на $n/3$*

| $p$ | $\gamma \geq 0,8$ | | | | $\gamma \geq 0,9$ | | | | $\gamma \geq 0,95$ | | | | $\gamma \geq 0,99$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | |
| | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
| 0,6 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,72 | 0,82 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,90 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| 0,7 | 0,71 | 0,71 | 0,72 | 0,71 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,83 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,90 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| 0,8 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,74 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,84 | 0,89 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| 0,9 | 0,71 | 0,71 | 0,74 | 0,75 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,86 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,96 |
| 0,95 | 0,72 | 0,74 | 0,77 | * | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 0,89 | 0,89 | 0,90 | 0,91 | 0,93 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,98 |
| 0,99 | 0,74 | * | * | * | 0,84 | 0,84 | * | * | 0,90 | 0,92 | * | * | 0,97 | 0,98 | * | * |

Таблиця 5

*Надійність оцінки $\gamma'$ при зменшенні кількості повторень випробування на $n/4$*

| $p$ | $\gamma \geq 0,8$ | | | | $\gamma \geq 0,9$ | | | | $\gamma \geq 0,95$ | | | | $\gamma \geq 0,99$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | |
| | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
| 0,6 | 0,74 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,85 | 0,85 | 0,86 | 0,86 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,97 |
| 0,7 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,75 | 0,85 | 0,85 | 0,86 | 0,87 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |
| 0,8 | 0,74 | 0,75 | 0,74 | 0,78 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,87 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,92 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| 0,9 | 0,74 | 0,75 | 0,78 | 0,75 | 0,85 | 0,85 | 0,87 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |
| 0,95 | 0,74 | 0,74 | 0,77 | * | 0,85 | 0,85 | 0,88 | 0,89 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,93 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| 0,99 | 0,78 | * | * | * | 0,87 | * | * | * | 0,92 | 0,92 | * | * | 0,98 | * | * | * |

Примітка: для випадків, позначених знаком (*), немає можливості зменшення кількості дослідів на відповідну величину $n/2$, $n/3$ та $n/4$.

За результатами обчислень, наведених у табл. 3-5, можна спостерігати, що у разі зменшення кількості дослідів відбувається зниження надійності оцінки параметрів зразка.

Маючи число необхідних випробувань $n$ для заданої початкової ймовірнісної характеристики $p$ можна знайти теоретичне число успіхів $k$ за відомою формулою [3]

$$np - q \le k \le np + q \,. \quad (12)$$

Значення очікуваного числа «успіхів» $k$ для заданих $p$ та прийнятих нами для розрахунків $\varepsilon$ і $\gamma$ наведені в табл. 6.

Таблиця 6

*Очікуване число успіхів k*

| $p$ | $\gamma \ge 0{,}8$ | | | | $\gamma \ge 0{,}9$ | | | | $\gamma \ge 0{,}95$ | | | | $\gamma \ge 0{,}99$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | | $\varepsilon$ | | | |
| | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
| 0,6 | 96 | 24 | 11 | 6 | 157 | 40 | 18 | 10 | 221 | 56 | 25 | 14 | 384 | 96 | 43 | 24 |
| 0,7 | 98 | 25 | 11 | 6 | 160 | 41 | 18 | 11 | 226 | 57 | 25 | 15 | 392 | 98 | 44 | 25 |
| 0,8 | 86 | 22 | 10 | 6 | 140 | 35 | 16 | 9 | 197 | 50 | 23 | 13 | 342 | 86 | 39 | 22 |
| 0,9 | 54 | 14 | 7 | 4 | 89 | 23 | 10 | 7 | 125 | 32 | 15 | 8 | 216 | 54 | 25 | 14 |
| 0,95 | 31 | 8 | 4 | 2 | 50 | 13 | 6 | 4 | 70 | 18 | 9 | 5 | 121 | 31 | 15 | 8 |
| 0,99 | 7 | 2 | 1 | 1 | 11 | 3 | 2 | 1 | 16 | 4 | 2 | 1 | 27 | 7 | 3 | 2 |

Одержані $k$ дають змогу для заданої точності $\varepsilon$ побудувати надійний інтервал для частоти $W$. Використавши $|W - p| \le \varepsilon$, маємо $p - \varepsilon \le W \le p + \varepsilon$. Так як $W = \frac{k}{n}$, то

$$pn - \varepsilon n \le k \le pn + \varepsilon n \,. \quad (13)$$

Одержаний інтервал завжди «накриває» теоретичне число $k$ і дає змогу оцінити число успіхів $k^*$ при проведенні випробування певного зразка ОВТ із заданою початковою ймовірнісною характеристикою $p$. Графіки з надійними інтервалами для комбінації значень надійності, точності та початкової імовірнісної характеристики наведені на рис. 7.

Тобто якщо при випробуванні ми одержимо число успіхів $k^*$, що лежить в інтервалі (13), то результат випробування можна оцінити як «позитивний», інакше вважатимемо, що задана замовником початкова ймовірнісна характеристика $p$ не підтверджена.

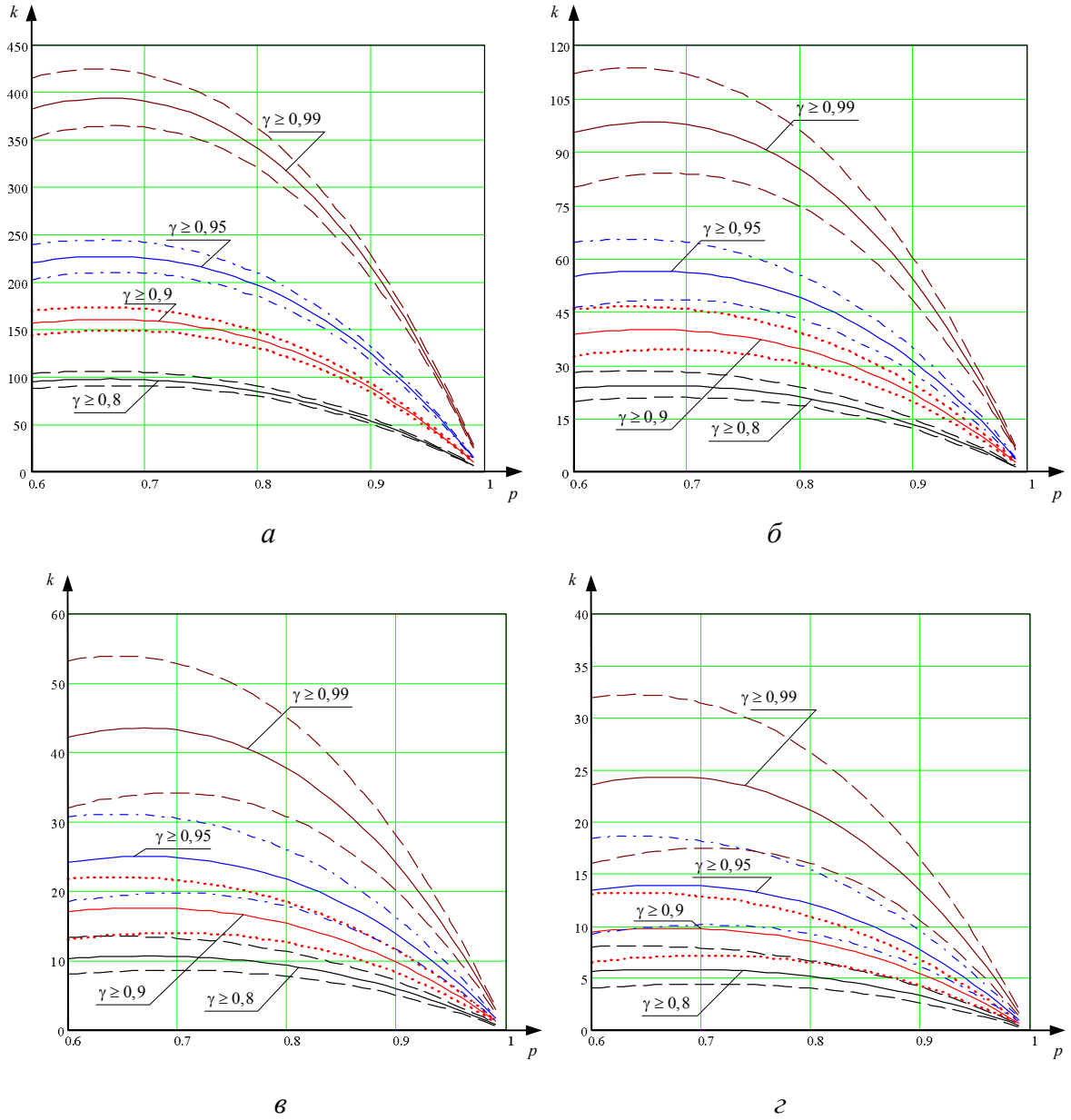
Зауваження: якщо під час випробувань виконано менше повторень, ніж заплановано, і за числом «успішних» випадків $k$ перевищено нижню межу надійного інтервалу (13), припиняти випробування однаково не можна, оскільки ми повинні одержати саме точкову оцінку наближеності частоти $W$ до початкової ймовірнісної характеристики $p$.

Для підтвердження результатів нами були побудовані ряди розподілу випадкової величини $x$ – кількості «успіхів» у серії з $n$ випробувань, де відбулося підтвердження надійності $\gamma$ початкової імовірнісної характеристики при попаданні числа $k^*$ у довірчій інтервал.

Якщо розглянути надійність, як найменшу ймовірність того, що «успіх» при випробуваннях потрапляє в інтервал (13), то для підтвердження заданої ймовірнісної характеристики достатньо, щоб «успіх» настав хоча б у одній серії $n$ випробувань. Отже, цілком логічно відповісти на питання – скільки таких серій $S$ потрібно, щоб бути впевненим у характеристиці $p$.

Нехай $p$ – імовірнісна характеристика, яку потрібно підтвердити при проведенні $n$ випробувань. Яку кількість потрібно провести серій $S$ з $n$ випробувань, щоб з надійністю не меншою ніж $\gamma$ «успіх» настав хоча б 1 раз. Якщо позначити, що $A$ – подія настання успіху, то $P(A)$ – ймовірність настання такого успіху. Відомо [1-6], що $P(A) = 1 - q^S$, і за умовою $P(A) \ge \gamma$ буде справедливою нерівність $1 - q^S \ge \gamma$, звідки маємо $1 - (1-p)^S \ge \gamma$; $1 - \gamma \ge (1-p)^S$. Для знаходження $S$ прологаріфмуємо обидві час-

тини нерівності: $\lg(1-\gamma) \geq S \lg(1-p)$. Оскільки $0 < 1-p < 1$, то $\lg(1-p) < 0$, тому $S \geq \dfrac{\lg(1-\gamma)}{\lg(1-p)}$.




*а* *б*

*в* *г*

*Рис. 7. Надійні інтервали для комбінації значень $\varepsilon$, $\gamma$ і $p$:*
*а* – $\varepsilon = 0,05$; *б* – $\varepsilon = 0,1$; *в* – $\varepsilon = 0,15$; *г* – $\varepsilon = 0,2$

Проведені чисельні розрахунки у табл. 7 показують нам мінімально необхідну кількість серій $S$, кожна з яких складається з $n$ дослідів, які необхідно провести для підтвердження початкової ймовірнісної характеристики.

Таблиця 7

*Число серій $S$ для підтвердження початкової ймовірнісної характеристики $p$*

| $p$ | $\gamma \geq 0,8$ | $\gamma \geq 0,9$ | $\gamma \geq 0,95$ | $\gamma \geq 0,99$ |
|---|---|---|---|---|
| 0,6 | 2 | 3 | 4 | 6 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0,7 | 2 | 2 | 3 | 4 |
| 0,8 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 0,9 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 0,95 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 0,99 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Тут потрібно зауважити, що чим вище надійність і менше ймовірнісна характеристика $p$ , тим більше серій потрібно проводити для підтвердження цієї характеристики. У випадку $\gamma = p$ «успіх» повинен наставати в кожній серії випробування.

**Висновки відповідно до статті.** Розглянуто математичний апарат одержання точкових оцінок параметрів випробувального зразку заданої точності та надійності. Визначені кількісні плани випробувань для одержання початкової ймовірнісної характеристики параметрів ОВТ та кількісні плани випробувань для точкового підтвердження заявленого параметру. Досліджено питання зниження надійності оцінок при вимушеному зменшенні кількості повторень дослідів. Одержані значення кількості серій дослідів для підтвердження заявлених параметрів зразку.

Застосування розглянутого математичного апарату визначення кількісних показників плану проведення випробувань для одержання точкових оцінок параметрів зразку заданої точності й надійності в системі планування та управління випробуваннями дозволить суттєво скоротити часові витрати на підготовку до випробування, а алгоритмізація та подальша автоматизація дозволить уникнути впливу людського чинника при підготовці програм та методик випробування.

**Список використаних джерел**

1. Гнєденко Б. В. Курс теорії ймовірностей. Київ: Рад. шк., 1949. 360 с.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Москва: Наука, 1969. 576 с.
3. Крамер Г. Математические методы статистики. Москва: Мир, 1975. 648 с.
4. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва: Высшая школа, 1977. 479 с.
5. Колмогоров А. Н. Основные понятия теории вероятностей. Москва: Наука, 1974. 120 с.
6. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Москва: Наука, 1988. 480 с.
7. Шефтель З. Г. Теорія ймовірностей: підручник. 2-ге вид., переробл. і допов. Київ: Вища шк., 1994. 192 с.
8. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Москва: Мир, 1977. 541 с.
9. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва: Наука, 1976. 279 с.
10. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности). Москва: Легкая индустрия, 1974. 262 с.
11. Казачинский В. З., Левитский Г. Е. Математические методы решения военно-специальных задач. Киев: Изд-во ВА ВПВО СВ, 1980. 291 с.
12. Дмитрієв В. А., Сергієнко А. І., Тішков Ю. М. Методичний підхід до обґрунтування можливості зменшення експериментів в процесі проведення випробувань. *Збірник наукових праць «Труди академії»*. 2008. Вип. 7 (87). С. 63–67.
13. Кошевая Л. А. Обеспечение единства испытаний. Концептуальные основы: монография. Киев: НАУ, 2009. 176 с.
14. Кошева Л. О. Концептуальні основи забезпечення єдності лабораторних випробувань: автореф. дис. … д-ра техн. наук: спец. 05.01.02 «Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення» / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2010. 39 с.
15. Акимов О. О., Бурсала О. Л., Бояров В. Т., Жданюк М. М. Планування випробувань на надійність військової техніки. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах*: збірник тез доповідей XVIII науково-технічної конференції, 06-07 вересня 2018 р. ДНДІ ВС ОВТ. Чернігів: Видавець Брагинець О. В., 2018. С. 33–34.

16. Василевський О. М., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т. Основи теорії невизначеності вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2015. 230 с.

17. Шитікова О. С. Інформаційна технологія підтримки процесу випробувань газотурбінних установок наземного використання з урахуванням невизначеності: дис. … канд. техн. наук: 05.13.06 / Запорізький національний технічний університет. Запоріжжя, 2017. 195 с.

18. Корнієнко І. В., Корнієнко С. П., Походенко О. М., Казначей С. М., Руденко О. В. Графічне представлення моделі функціонування випробувальної організації. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. Чернігів, 2019. Вип. 2. С. 91–98.

19. Корнієнко С. П., Корнієнко І. В., Павленко А. Г., Камак Д. О. Підхід до прогнозування часу проведення випробувань озброєння та військової техніки. *Новітні технології*: збірник наукових праць Приватного вищого навчального закладу «Університет новітніх технологій». Київ, 2019. № 3 (10). С. 94–100.

20. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. Київ, 1994. 32 с.

## References

1. Hniedenko, B. V. (1949). *Kurs teorii ymovirnostei [Course in probability theory]*. Kyiv: Rad. shk. [in Ukrainian].

2. Venttcel, E. S. (1969). *Teoriia veroiatnostei [Probability theory]*. Moscow: Nauka [in Russia].

3. Kramer, G. (1975). *Matematicheskie metody statistiki [Mathematical statistics methods]*. Moscow: Mir [in Russia].

4. Gmurman, V. E. (1977). *Teoriia veroiatnostei i matematicheskaia statistika [Theory of probability and mathematical statistics]*. Moscow: Vysshaia shkola [in Russia].

5. Kolmogorov, A. N. (1974). *Osnovnye poniatiia teorii veroiatnostei [Basic concepts of probability theory]*. Moscow: Nauka [in Russia].

6. Venttcel, E. S., Ovcharov, L. A. (1988). *Teoriia veroiatnostei i ee inzhenernye prilozheniia [Probability Theory and Its Engineering Applications]*. Moscow: Nauka [in Russia].

7. Sheftel, Z. H. (1994). Teoriia imovirnostei *[Probability theory]*. Kyiv: Vyshcha shk. [in Ukrainian].

8. Khartman, K., Letckii, E., & Shefer, V. (1977). *Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protcessov [Planning an experiment in the study of technological processes]*. Moscow: Mir [in Russia].

9. Adler, Iu. P., Markova, E. V., & Granovskii, Iu. V. (1976). *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh uslovii [Planning an experiment to find optimal conditions]*. Moscow: Nauka [in Russia].

10. Tikhomirov, V.B. (1974). *Planirovanie i analiz eksperimenta (pri provedenii issledovanii v legkoi i tekstilnoi promyshlennosti) [Planning and analysis of experiments (in research in the light and textile industries)]*. Moscow: Legkaia industriia [in Russia].

11. Kazachinskii, V. Z., Levitskii, G. E. (1980). *Matematicheskie metody resheniia voennospetcialnykh zadach [Mathematical methods for solving military special problems]*. Kiev: Izd-vo VA VPVO SV [in Russia].

12. Dmytriiev, V. A., Serhiienko, A. I., & Tishkov, Yu. M. (2008). Metodychnyi pidkhid do obhruntuvannia mozhlyvosti zmenshennia eksperymentiv v protsesi provedennia vyprobuvan [Methodical approach to substantiate the possibility of reducing experiments in the process of testing]. Kyiv: NAO Ukrainy [in Ukrainian].

13. Koshevaia, L. A. (2009). *Obespechenie edinstva ispytanii. Kontceptualnye osnovy [Ensuring the unity of testing. Conceptual bases]*. Kiev: NAU [in Russia].

14. Kosheva, L. O. (2010). *Kontseptualni osnovy zabezpechennia yednosti laboratornykh vyprobuvan [Conceptual basics of ensuring the unity of laboratory tests]*. (Doctor's thesis). Lviv Polytechnic National University, Lviv [in Ukrainian].

15. Akymov, O. O., Bursala, O. L., Boiarov, V. T., & Zhdaniuk, M. M. (2018). Planuvannia vyprobuvan na nadiinist viiskovoi tekhniky [Planning reliability tests of military equipment]. *Stvorennia ta modernizatsiia ozbroiennia i viiskovoi tekhniky v suchasnykh umovakh: zbirnyk tez dopovidei XVIII naukovo-tekhnichnoi konferentsii [Creation and modernization of weapons and military equipment in modern conditions: a collection of abstracts of the XVIII Scientific and Technical Conference]* (Chernihiv, September 06-07, 2018) (pp. 33-34). Chernihiv, DNDI VS OVT [in Ukrainian].

16. Vasilevskyi, O. M., Kucheruk, V. Yu., & Volodarskyi, Ye. T. (2015). *Osnovy teorii nevyznachenosti vymiriuvan [Basic theory of measurement uncertainty]*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].

17. Shytikova, O. S. (2017). *Informatsiina tekhnolohiia pidtrymky protsesu vyprobuvan hazoturbinnykh ustanovok nazemnoho vykorystannia z urakhuvanniam nevyznachenosti [Information technology for supporting the process of testing ground-based gas turbine installations with uncertainty]*. Zaporizhzhia: ZNTU [in Ukrainian].

18. Korniienko, I. V., Korniienko, S. P., Pokhodenko, O. M., Kaznachei, S. M., & Rudenko, O. V. (2019). *Hrafichne predstavlennia modeli funktsionuvannia vyprobuvalnoi orhanizatsii [Graphical representation of the model of the testing organization functioning]*. Chernihiv: DNDI VS OVT [in Ukrainian].

19. Korniienko, S. P., Korniienko, I. V., Pavlenko, A. H., & Kamak, D. O. (2019). *Pidkhid do prohnozuvannia chasu provedennia vyprobuvan ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky [Approach to predicting the timing of weapons testing and military equipment]*. Kyiv: PVNZ «Universytet novitnikh tekhnolohii» [in Ukrainian].

20. Nadiinist tekhniky. Metody otsinky pokaznykiv nadiinosti za eksperymentalnymy danymy [Reliability of technology. Methods for estimating the reliability of the experimental data]. DSTU 3004-95. Kyiv (1995).

*UDC 519.252*

*Svitlana Korniienko, Ihor Korniienko,*
*Volodymyr Dmytriiev, Anatolii Pavlenko, Dmytro Kamak*

## FORMATION OF TESTS QUANTITATIVE CHARACTERISTICS TO OBTAIN POINT QUALITY ASSESSMENTS

***Urgency of the research.*** *One of the most important and time-consuming tasks in the preparation of test methods is to calculate the quantitative characteristics of the tests, the automation of which during mass testing becomes an urgent task.*

***Target setting.*** *The effectiveness of the testing organization is determined by the time and quality characteristics of the tests, where the quality of the test means the conformity of the obtained estimates to the parameters of the test samples. The reliability of the assessments is achieved by a steady and correct test in accordance with the methodology developed, which shall include, inter alia, the quantitative characteristics of the test of a particular sample.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Today, there are many fundamental works involved in planning experiments, processing their results, and obtaining estimates of a given quality. Recently, many scientific works have been devoted to the automation of the processes of preparation, conduct and processing of test results.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *The algorithmization and automation of planning processes in a test organization aims to significantly simplify, accelerate and eliminate errors in the development of test methods for weapons and military equipment.*

***The research objective.*** *To simulate the processes of functioning of the test organization and to find the optimal modes of structure and parameters of the production process, it is proposed to use an analytical model of queuing systems theory. One of the structural elements of the model should be a test planning module, for which a mathematical apparatus for determining the quantitative characteristics of a test plan to obtain point estimates of the sample parameters of a given accuracy and reliability, as well as the loss of reliability of a point estimate due to the number of trials, must be developed and prepared for algorithmization.*

***The statement of basic materials.*** *The structural and functional scheme of the module of calculations of quantitative characteristics of tests is formed. The theoretical question of obtaining point estimates of the parameters of the test sample of the given accuracy and reliability is considered. Quantitative test characteristics for standardized accuracy and reliability values are calculated. The question of decrease of reliability of estimates at forced reduction of number of experiments is considered. The quantitative characteristics of the test series are determined to ensure the reliability of the estimates.*

***Conclusions.*** *Application of the considered mathematical apparatus to determine the quantitative indicators of the test plan to obtain point estimates of the parameters of the sample precision and reliability in the system of planning and test management will significantly reduce the time spent on preparation for the test, and algorithmization and further automation of testing will allow.*

***Keywords:*** *tests; automation; rating; accuracy; reliability.*
*Table: 7. Fig.: 7. References: 20.*

**Корнієнко Світлана Петрівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри промислового та цивільного будівництва, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Бєлова, 4, м. Чернігів, 14000, Україна).
**Korniienko Svitlana** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Chernihiv National University of Technology (4 Bielova Str., 14000 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** cornel@ukr.net
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-9162-1229

**Корнієнко Ігор Валентинович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Бєлова, 4, м. Чернігів, 14000, Україна).
**Korniienko Ihor** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Geodesy, Cartography

and Land Planning, Chernihiv National University of Technology (4 Bielova Str., 14000 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** cornel@ukr.net
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-9105-0780

**Дмитрієв Володимир Анатолійович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, заступник начальника інституту з наукової роботи, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14000, Україна).
**Dmytriiev Volodymyr** – PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, The Laureate of State Prize of Ukraine in sphere of science and technique, State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (1 Striletska Str., 14000 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** vadmitriev@ukr.net
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0792-6397

**Павленко Анатолій Григорович** – кандидат технічних наук, начальник науково-організаційного відділу, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14000, Україна).
**Pavlenko Anatolii** – PhD in Technical Sciences, Chief of the Scientific Organizational Section, State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (1 Striletska Str., 14000 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** agpav@ukr.net
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6341-8381

**Камак Дмитро Олександрович** – начальник науково-дослідного відділу, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14000, Україна).
**Kamak Dmytro** – Chief of the Scientific-Research Department, State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification (1 Striletska Str., 14000 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** dkam@meta.ua
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0348-5456

# РОЗДІЛ ІІІ. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

*УДК 621.391.812*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-156-167*

*Анатолій Сатюков, Анатолій Приступа, Микола Мошель*

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПРОХОДЖЕННЯ СИГНАЛІВ НВЧ ДІАПАЗОНУ

***Актуальність дослідження.*** *Постійний розвиток НВЧ систем зумовлює появу новітніх пристроїв та методів вимірювання параметрів різноманітних матеріалів. Сфера застосування техніки, що працює в діапазоні надвисоких частот, стрімко розширюється. Велика кількість сучасних систем працюють у діапазоні 2-8 ГГц в межах приміщення та між різними інженерними спорудами. Ефективність їхньої роботи пов'язана з проходженням високочастотних сигналів через різні навколишні перешкоди – стіни, двері, перекриття тощо. Тому актуальним завданням є детальне дослідження взаємодії НВЧ сигналів із різними матеріалами. Серед них особливе місце посідає деревина, що має високу здатність до поглинання вологи, а вміст води в матеріалі навіть у незначних кількостях суттєво впливає на його фізико-хімічні й електричні властивості.*

***Постановка проблеми.*** *Поширення радіохвиль у приміщенні має складний характер, оскільки сучасна будова являє собою неоднорідний простір, заповнений хаотично розташованими напівпровідними перешкодами. Здебільшого в точку прийому потрапляє не одна хвиля, а кілька – за рахунок віддзеркалень від різних поверхонь і дифракції на перешкодах. Розуміння впливу різних факторів на поширення радіохвиль має безліч практичних застосувань, від вибору частот для міжнародного короткохвильового телерадіомовлення до проєктування надійних мобільних телефонних систем, радіонавігації та експлуатації радіолокаційних систем та систем моніторингу.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Питання розповсюдження радіохвиль у повітрі вивчені дуже ретельно й повно. Визначено затухання сигналів залежно від частоти. Це дозволило створити надійні і оптимально структуровані канали бездротового зв'язку, що працюють на частотах, для яких затухання сигналу найменше.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Останніми роками дедалі більше розвиваються системи радіозв'язку, які працюють в умовах розповсюдження радіохвиль за наявності різноманітних перешкод. Наприклад, мобільний зв'язок чи бездротовий Інтернет, які працюють зокрема в приміщеннях і будівлях. Такі параметри каналів радіозв'язку, як потужність передавачів, конструкція та розміщення антен тісно пов'язані з взаємодією радіохвиль з різноманітними перешкодами. Такими перешкодами, зокрема, можуть бути різні будівельні конструкції – стіни, перекриття та ін. Вони послаблюють потужність радіохвиль, що проходять крізь них. Значення такого послаблення може суттєво залежати від рівня вологості матеріалу перешкоди. Наведені в різних літературних джерелах дані здебільшого не враховують цього аспекту.*

***Мета дослідження*** *полягає у вивченні впливу вологості дерев'яних матеріалів на рівень послаблення НВЧ сигналів та визначення частот, на яких спостерігається мінімальний рівень послаблення.*

***Виклад основного матеріалу.*** *У статті проведено експериментальні дослідження з визначення ступеня послаблення НВЧ сигналів дерев'яними матеріалами при різному рівню вологості речовини. Отримані результати порівнювались із проходженням радіохвиль через сухий зразок. Це дало змогу з'ясувати саме вплив зміни вологості на послаблення радіосигналу. Вимірювання проводились в діапазоні частот 2–8 ГГц та зміні вологості зразків від 0 до 8 %.*

*Проведено аналіз послаблення сигналу від ступеня вологості на окремих частотах. Здійснено порівняння послаблення радіохвиль різними матеріалами з однаковим рівнем вологості.*

***Висновки відповідно до статті.*** *За результатами експериментальних досліджень було побудовано графічні залежності затухання сигналу від рівня вологості зі збільшенням частоти для обраних порід дерева: дуба, сосни, верби та берези. Отримані дані дозволяють виділити частотні інтервали для оптимальної роботи апаратури.*

***Ключові слова:*** *НВЧ сигнал; послаблення радіохвиль; дерев'яні матеріали; вологість; експериментальні дослідження.*
*Рис.: 5. Бібл.: 23.*

**Актуальність дослідження.** Постійний розвиток сучасних технологій призводить до того, що сфера застосування техніки, яка працює в діапазоні надвисоких частот, стрімко розширюється. Велика кількість сучасних НВЧ систем працюють у діапазоні 2-8 ГГц у межах приміщення та між різними інженерними спорудами. Ефективність їхньої роботи пов'язана з проходженням високочастотних сигналів через різні навколишні перешкоди – стіни, двері, перекриття тощо. Тому актуальним завданням є детальне дослідження взаємодії НВЧ сигналів із різними матеріалами. Серед них особливе місце посідає деревина, що має високу здатність до поглинання вологи, а вміст води в матеріалі навіть у незначних кількостях суттєво впливає на його фізико-хімічні й електричні властивості.

© Сатюков А. І., Приступа А. Л., Мошель М. В., 2020

**Постановка проблеми.** Поширення радіохвиль у приміщенні має складний характер, оскільки сучасна будова являє собою неоднорідний простір, заповнений хаотично розташованими напівпровідними перешкодами. Здебільшого в точку прийому потрапляє не одна хвиля, а кілька – за рахунок віддзеркалень від різних поверхонь і дифракції на перешкодах. На сигнали чинить вплив багато різних явищ, пов'язаних із поширенням і розсіюванням радіохвиль на неоднорідностях середовища. Аналітично визначити значення фази й амплітуди цих хвиль для певного моменту часу в певній точці простору надзвичайно важко, тому особливий інтерес становлять експериментальні дані взаємодії НВЧ сигналу з навколишніми матеріалами.

Сучасні будівлі неможливо уявити без дерев'яних конструкцій. Широка сфера застосування деревини визначається її цінними будівельними властивостями. Мала щільність сухої деревини при порівняно великій міцності й жорсткості (вздовж волокон) робить доцільним застосування дерев'яних конструкцій у покриттях громадських, промислових і сільськогосподарських будівель. Екологічна чистота та теплофізичні властивості (мала теплопровідність сухої деревини поперек волокон) робить деревину особливо цінною для будівництва житла, зокрема котеджного типу.

Дерев'яні конструкції дозволяють підвищувати якість будівництва та широко застосовувати збірні деталі будь-якої форми і розмірів. Хімічна стійкість сухої деревини виправдовує переважне застосування безметалевих і клеєних дерев'яних конструкцій для покриттів хімічних цехів і складів. Клеєні конструкції є найбільш економічними щодо витрати лісоматеріалу [1].

Розуміння впливу різних факторів на поширення радіохвиль має безліч практичних застосувань, від вибору частот для міжнародного короткохвильового телерадіомовлення до проєктування надійних мобільних телефонних систем, радіонавігації та експлуатації радіолокаційних систем та систем моніторингу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Свого часу були проведені масштабні дослідження з вивчення проходження радіохвиль через атмосферу Землі. Для різних діапазонів були вивчені залежності проходження радіохвиль від географічних та кліматичних факторів, добових та сезонних змін, стану тропосфери та іоносфери при впливі на них космічних явищ. Були виявлені величини послаблення радіосигналів в атмосфері, визначені частоти резонансного поглинання електромагнітних хвиль. Результати висвітлені у багатьох публікаціях [2; 16; 17; 18].

НВЧ-електроніка сьогодні є одним з основних векторів розвитку всієї індустрії електроніки. Це глобальний тренд, що охоплює всі можливі галузі електроніки – від технологій виробництва матеріалів, приладових структур, електронних компонентів до радіоелектронної апаратури, кінцевих виробів, а також систем і комплексів на їх основі [3].

До переліку основних сфер, де спостерігається найбільший розвиток, можна віднести: радіозв'язок (у тому числі радіо і телебачення), радіолокація та радіонавігація, мобільний телефонний зв'язок, телекомунікаційні системи, бездротовий Інтернет, НВЧ розігрів речовини, системи моніторингу тощо.

Для технологічних НВЧ систем нагріву обрано опорну частоту 2,45 ГГц, оскільки при такій частоті молекули води ще «встигають» орієнтуватись за напрямом електричного поля. Бурхливе зростання популярності систем НВЧ нагріву (побутовий варіант – мікрохвильова пічка) привело до того, що в багатьох країнах виділено частотний діапазон, в якому експлуатація НВЧ апаратури не потребує процедури ліцензування. В Україні, як і в деяких інших країнах, межі такого інтервалу відповідають частотам (2,45–2,48) ГГц.

Ринок локальних і персональних систем бездротового широкосмугового зв'язку динамічно розвивається з 1998-1999 років. Передусім йдеться про системи Wi-Fi, пізніше були створені та набули популярності інші технології зв'язку: Bluetooth, ZigBee тощо. Пристрої цих стандартів працюють переважно в діапазонах від 2,4 до 5 ГГц [4].

Зростання кількості пристроїв у цьому діапазоні збільшує рівні завад, що змушує виробників звертатися до інших частот. Зокрема, сучасні системи Wi-Fi працюють на частоті 5,5 ГГц.

У 2013 році з'явилися системи зв'язку, що працюють на частотах 6 ГГц і в міліметровому діапазоні.

Важливим напрямом розвитку НВЧ є застосування їх у різноманітних технічних системах, наприклад, у системах позиціонування у виробничих приміщеннях [5], системах моніторингу [6; 7] тощо.

Також системи НВЧ широко використовуються для контролю вологості в непровідних або слабопровідних середовищах: газових середовищах, зерносховищах, текстилю, вугілля тощо [15; 19-23].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Автори свідомо не розглядають увесь велетенський перелік НВЧ пристроїв і систем. Виділено лише ті варіанти, в яких апаратура може працювати в закритих приміщеннях і на її надійність можуть впливати процеси взаємодії радіохвиль із перешкодами.

Отже, електронна техніка, яка є складовою частиною цієї апаратури, буде ефективно функціонувати, якщо при її створенні та в процесі експлуатації будуть враховані аспекти взаємодії електромагнітних хвиль з речовиною, або із середою їх розповсюдження. Водночас можна відзначити певні суперечності в деяких підходах до цього питання.

Як вже згадувалось, питання розповсюдження радіохвиль в атмосфері вивчені ретельно й системно. Це дозволило створити телекомунікаційні системи, надійний космічний зв'язок, різноманітну НВЧ апаратуру тощо [8]. Проте робота НВЧ систем у приміщеннях із великою кількістю перешкод може суттєво відрізнятися від роботи розглянутих вище НВЧ систем. Перешкоди, якими можуть бути різні будівельні конструкції (стіни, перекриття тощо), послаблюють потужність радіохвиль, що проходять крізь них. Ступінь такого послаблення може суттєво залежати від рівня вологості матеріалу перешкоди. Наведені в різних літературних джерелах дані здебільшого не враховують цього аспекту. Ті ж публікації, в яких висвітлено це питання, мають багато недосліджених моментів.

Зокрема, у [9; 10] розглянуто зменшення діелектричної проникності в чистій воді. Проте волога, що містяться в реальних речовинах, зазвичай не повною мірою відповідає такій моделі води. Тому корисно мати більш детальну інформацію про вплив вологості на проходженні НВЧ радіохвиль через різноманітні дерев'яні матеріали.

**Мета дослідження.** Визначення впливу вологості дерев'яних матеріалів на рівень послаблення НВЧ сигналів та визначення частот із мінімальним рівнем такого послаблення.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження впливу будівельних матеріалів є продовженням комплексних досліджень, спрямованих на встановлення взаємозв'язків між параметрами НВЧ сигналів на параметрами середовища розповсюдження електромагнітної хвилі. У роботах [11–13] наведено опис експериментальної установки та представлено результати досліджень для стінових будівельних матеріалів. Дослідження з дерев'яними матеріалами проводились на тому ж обладнанні. При визначенні впливу вологості дерев'яних матеріалів на проходженні НВЧ сигналів через них були визначені такі умови:

1. Як зразок були обрані породи дерев, які широко використовуються в будівництві і є типовими представниками кожної відокремленої групи деревини – дуб, сосна, береза та верба.

2. Вологість зразків змінювалась у межах від 1 до 8 %. Більший вміст вологи в звичайних умовах маловірогідний. Він може існувати в поверхневих шарах зовнішніх стін під час атмосферних опадів, а також у вологих підвальних та напівпідвальних виробничих приміщеннях, деяких підземних об'єктах. Для створення апаратури, що може працювати в таких умовах, треба проводити додаткові дослідження, які авторами цієї статті за мету не ставились.

3. Обрано частотний діапазон (2–8) ГГц, який перекриває робочі частоти наявних технічних та інформаційних систем.

4. Вимірювання ослаблення сигналу, що проходить через експериментальні зразки, проводились для двох положень: волокна розташовані паралельно площині поляризації НВЧ сигналу і перпендикулярно. Зміна розташування досліджуваних матеріалів дозволяє дослідити вплив внутрішньої будови дерева на проходження радіохвиль. Витягнуті волокна деяких порід можуть являти собою своєрідну дифракційну ґратку. Тому взаємна орієнтація волокон і площини поляризації, безумовно, повинна впливати на рівень проходження сигналу. За таких умов детальніше теоретично описати це явище дуже складно через неоднорідність структури. Тому вплив розташування зразків на параметри НВЧ сигналів варто оцінити експериментально.

Вимірювання проводились за стандартною методикою описаною в [11].Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи представлена на рис. 1.

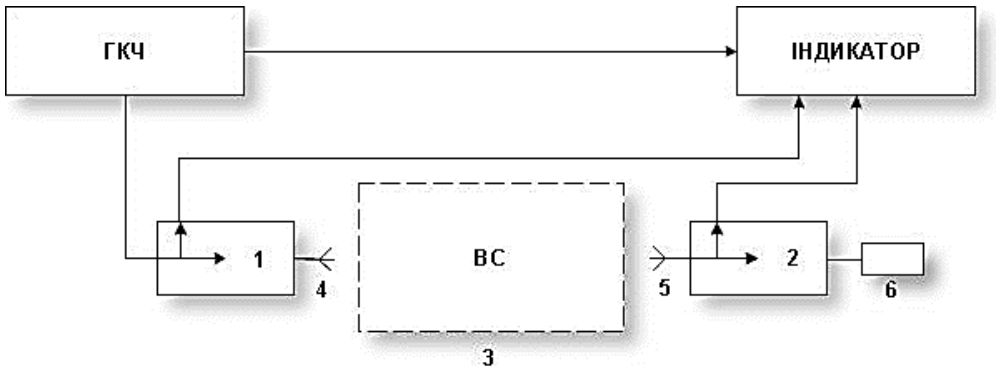



*Рис. 1. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи:*
*1, 2 – спрямований відгалужувач; 3 – вимірювальне середовище; 4 – передавальна антена; 5 – приймальна антена; 6 – навантаження узгоджене*

НВЧ сигнал з виходу генератора качаючої частоти (ГКЧ) (рис. 1) подається на вхід спрямованого відгалужувача *1*, з якого сигнал падаючої хвилі спрямовується на вхід індикатора. З виходу первинного каналу спрямованого відгалужувача *1* НВЧ хвиля подається на передавальну антену *4*. Випромінений антеною *4* НВЧ сигнал, проходячи через контрольоване середовище *3*, потрапляє на приймальну антену *5* та вхід другого спрямованого відгалужувача *2*. З виходу вторинного каналу спрямованого відгалужувача сигнал подається на другий вхід індикатора. На екрані індикатора відображається сигнал, пропорційний відношенню напруг на входах каналів відбитої (послабленої) та падаючої хвиль.

Як передавальні та приймальні елементи використовувались хвилеводно-коаксіальні переходи [12]. Елементи НВЧ тракту (спрямовані відгалужувачі, детекторні головки, випромінювачі, приймальні елементи, узгоджені навантаження) обирались відповідно до діапазону, в якому проводились вимірювання. Зовнішній вигляд експериментальної установки та опис її роботи представлено в [13].

Визначена вологість зразків досягалась таким чином: на добре висушений зразок додавалась певна кількість води відповідно до його маси; після цього зразок витримувався в герметичному стані декілька годин для рівномірного розподілення води в ньому. Таким чином, змінюючи кількість води, вологість зразків встановлювалась від 1 до 8 % з інтервалом через один відсоток.

Як калібрувальну було взято залежність потужності сигналу, що пройшов через сухий зразок. Отримані залежності послаблення НВЧ сигналів дерев'яними матеріалами від частоти сигналу при різній вологості зразків представлені на рис. 3-5. На рис. 3-5 зображена різниця між потужністю сигналу при визначеному рівні вологості й калібрувальною залежністю.

**Результати експериментальних досліджень.** Досить складний характер експериментальних залежностей можна пояснити наступним. У випадках, коли досліджувалась взаємодія електромагнітних хвиль з чистою водою, взаємодія хвиль із речовиною визначалась насамперед властивостями молекул саме води. На потужність радіохвиль при їх проходженні через реальне вологе середовище впливає ціла низка чинників.

Вода, що потрапляє в речовину, не є чистою водою. Це скоріше специфічний розчин з великою кількістю компонентів. Отже, до взаємодії молекул води з НВЧ хвилями додається ще взаємодія НВЧ хвиль з домішками. Внаслідок цих процесів у вологому матеріалі можуть утворюватись досить різноманітні коливальні системи.

Усі породи дерев поділяються на три групи: хвойні, розсіяносудинні листяні й листяні кільцесудинні. Хвойні породи є менш розвиненими в еволюційному відношенні, ніж представники листяних порід. Деревина хвойних порід відрізняється простою будовою і радіальним розташуванням основних елементів. Деревина листяних порід характеризується великим набором високоспеціалізованих елементів та їх перехідних форм. Розвиток окремих елементів, особливо судин, зміщують сусідні клітини, внаслідок чого деревина листяних порід не має такої правильної будови, яка характерна для деревини хвойних порід [14]. Тому для дослідження проходження НВЧ сигналу через деревину було обрано типових представників вказаних вище груп – сосну, березу, дуб, а також вербу. Поперечні зрізи зразків зображено на рис. 2.

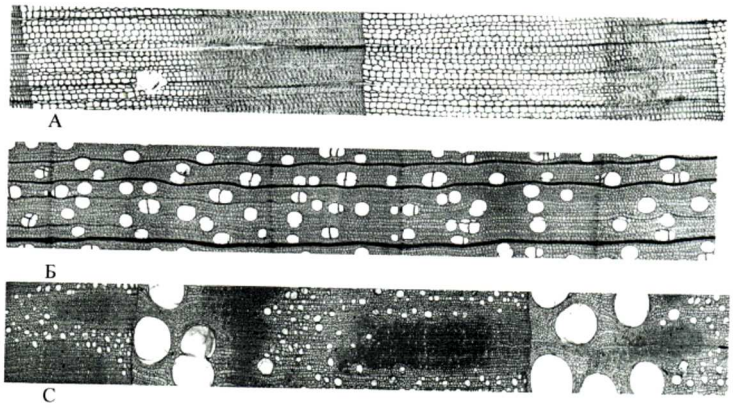



*Рис. 2. Зразки деревини (поперечний зріз):*
*а – сосна звичайна; б – береза повисла; с – дуб звичайний*

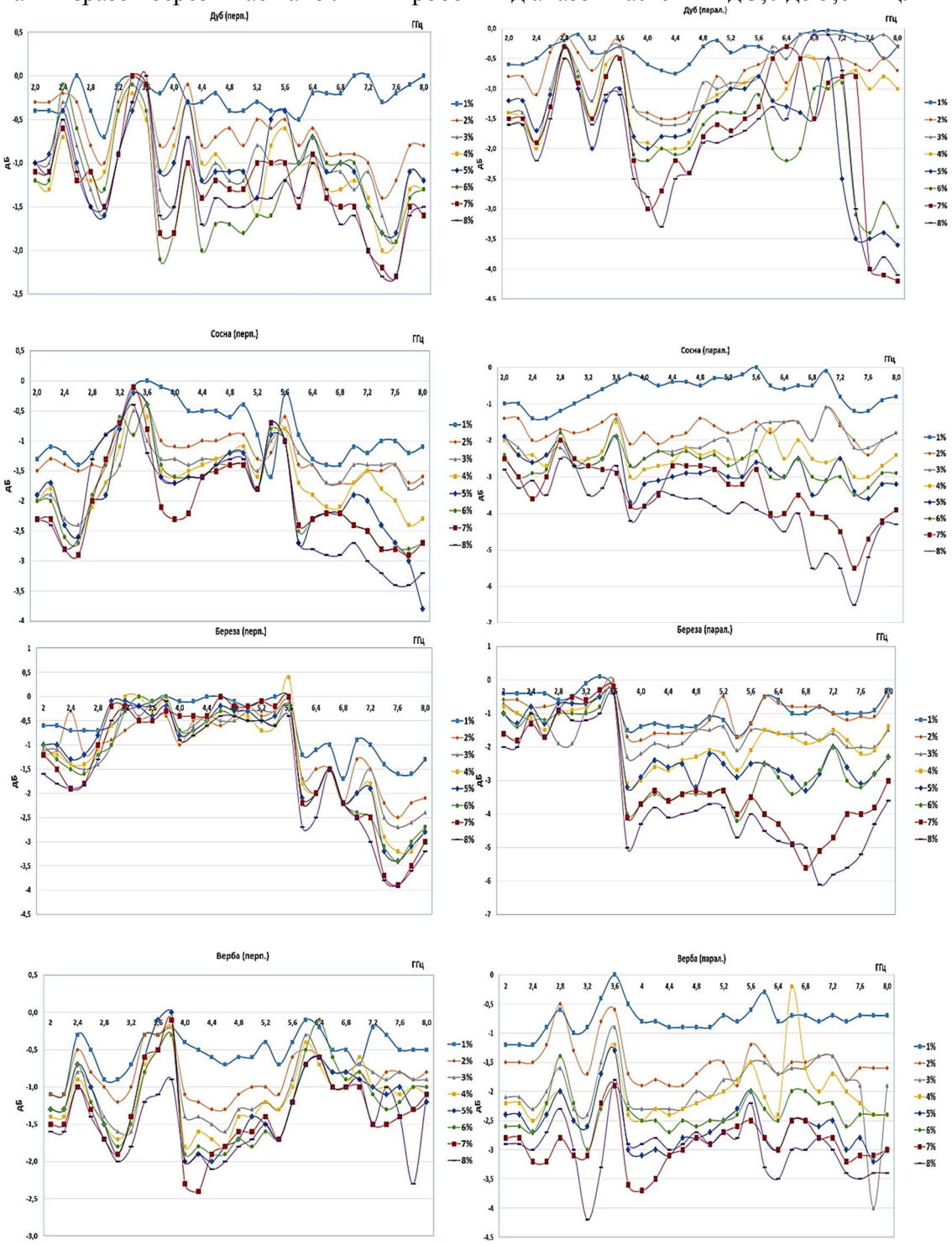
Як наслідок, залежності послаблення НВЧ потужності дерев'яними матеріалами від частоти сигналу при різній вологості зразків мають дуже складний вигляд (рис. 3). При тому ж самому рівні вологості на них спостерігаються як монотонні залежності, так і резонансні ділянки.

Для дуба на частотному інтервалі 6,4–8,0 ГГц (волокна паралельно) затухання сигналу до 5 % вологості є незначним, на відміну від перпендикулярного положення, для якого на цьому проміжку функціональна залежність спадає і на частоті 7,2 ГГц досягає свого максимуму затухання.

Для сосни, розташованої волокнами паралельно площині поляризації, характерним є відсутність різких послаблень або підсилень сигналу. Як і для дуба, незначне підсилення сигналу спостерігається на частоті 2,8 і 3,6 ГГц. На проміжку 3,6–6,0 ГГц 1 % вологості мало впливає на проходження сигналу.

Для берези з розташуванням волокон паралельно на частоті до 3,6 ГГц затухання сигналу для кожного рівня вологості буде найменше, що забезпечить надійну роботу апаратури. Зі збільшенням частоти спочатку спостерігається різке підвищення затухання, так само як у зразків дуба (волокна паралельно та перпендикулярно), верби (перпендикулярно), сосни (перпендикулярно). Від 4,0 ГГц графічні характеристики монотонно спадають, досяга-

ючи максимуму затухання для вологості 7-8 % на частоті 7,0 ГГц. Для 1-2 % вологості на проміжку 6,2-8,0 ГГц затухання сигналу становить лише 0,5 дБ. Перпендикулярно розташований зразок берези має найбільший робочий діапазон частот – від 3,0 до 5,6 ГГц.



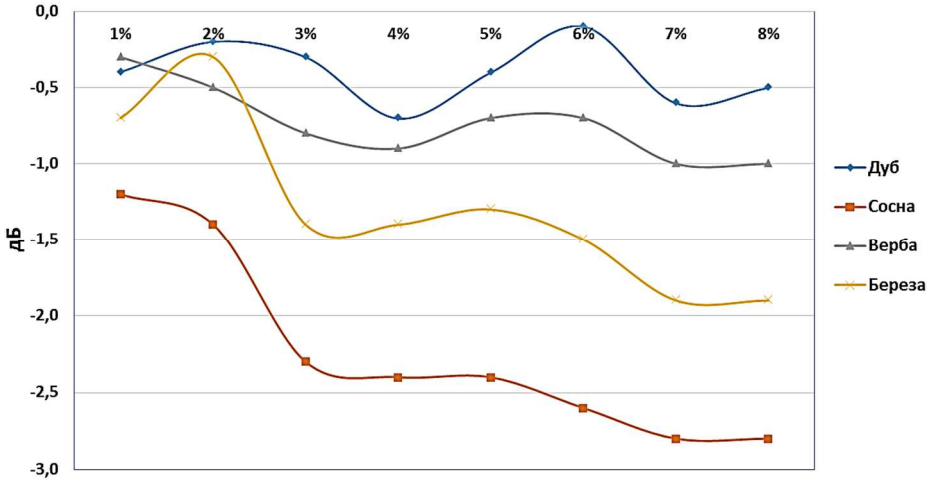

*а)* *б)*

*Рис. 3. Залежності послаблення НВЧ сигналу від частоти сигналу при різній вологості для двох положень обраних зразків:*
*а – волокнами перпендикулярно площині поляризації; б – волокнами паралельно площині поляризації*

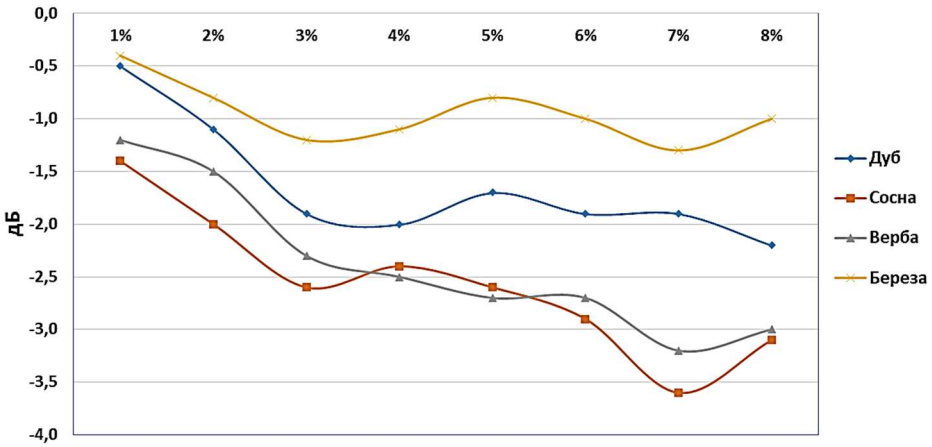
За отриманими графічними залежностями, затухання сигналу, що проходить через вербу, подібне до характеристик дуба. Обидва зразки, при паралельному розташуванні, мають чіткі піки посилення сигналу – на частоті 2,8; 3,6 ГГц. Зі збільшенням частоти

сигнал плавно затухає, але прослідковується певна стабільність рівнів затухання для всіх відсотків вологості – вони змінюються на ± 0,5 дБ. Відмінним від дуба є відсутність ділянок із різким підсиленням або затуханням, починаючи від частоти 4,0 ГГц. Побудовані залежності для верби, що була розташована перпендикулярно, також подібні до залежностей дуба (волокнами паралельно). Перший пік підсилення сигналу зміститься на частоту 2,4 ГГц, зі збільшенням частоти графіки цих матеріалів дуже подібні. Головна відмінність верби (волокнами перпендикулярно) – максимальне затухання сигналу на частоті від 6,4 до 8,0 ГГц становить 0,7 дБ для вологості 1-7 %. Цей результат один із найменших серед усіх досліджених зразків деревини.

За отриманими результатами, що наведені на рис. 3, були побудовані залежності послаблення сигналу дерев'яними матеріалами від рівня вологості для частоти 2,4 ГГц, на якій працює бездротовий Інтернет. Вони показані на рис. 4.




*а*




*б*

*Рис. 4. Залежності послаблення НВЧ-сигналу при частоті 2,4 ГГц від рівня вологості дерев'яними матеріалами: волокнами перпендикулярно площині поляризації (а); волокнами паралельно площині поляризації (б)*

Значний вплив вологості на проходження сигналу, при перпендикулярному розташуванні волокон, можна спостерігати для сосни. Збільшення вмісту вологи до 5 % призводить до значного затухання сигналу, що досягає 2,4 дБ.

Підвищення рівня вологості на частоті 2,4 ГГц для зразків дуба та верби не вносить значний вплив на затухання сигналу в порівнянні з іншими породами. При такому розташуванні спостерігається найкраще проходження сигналу для 6 % вологості.

Для обраних зразків, із розташуванням волокон паралельно, зміна вологості кожного від 1 до 3 % спричиняє стрімке затухання сигналу. Зі збільшенням вологості від 3 % для берези та дуба характерним є збільшення потужності сигналу, що потрапляє в приймальну антену.

Найбільша відмінність результатів залежно від положення зразка деревини спостерігається для берези, для якої затухання сигналу при перпендикулярному положенні досягає 2 дБ (при паралельному – 1,3 дБ).

Варто звернути увагу, що при паралельному розташуванні волокон найкращий матеріал для проходження сигналу – береза, а при перпендикулярному – дуб. Отримані результати слід враховувати для оптимізації роботи системи на обраній частоті 2,4 ГГц.

Також відповідно до результатів, представлених на рис. 2, були побудовані залежності послаблення сигналу дерев'яними матеріалами від частоти при сталих рівнях вологості – від 1 до 8 % (рис. 5).

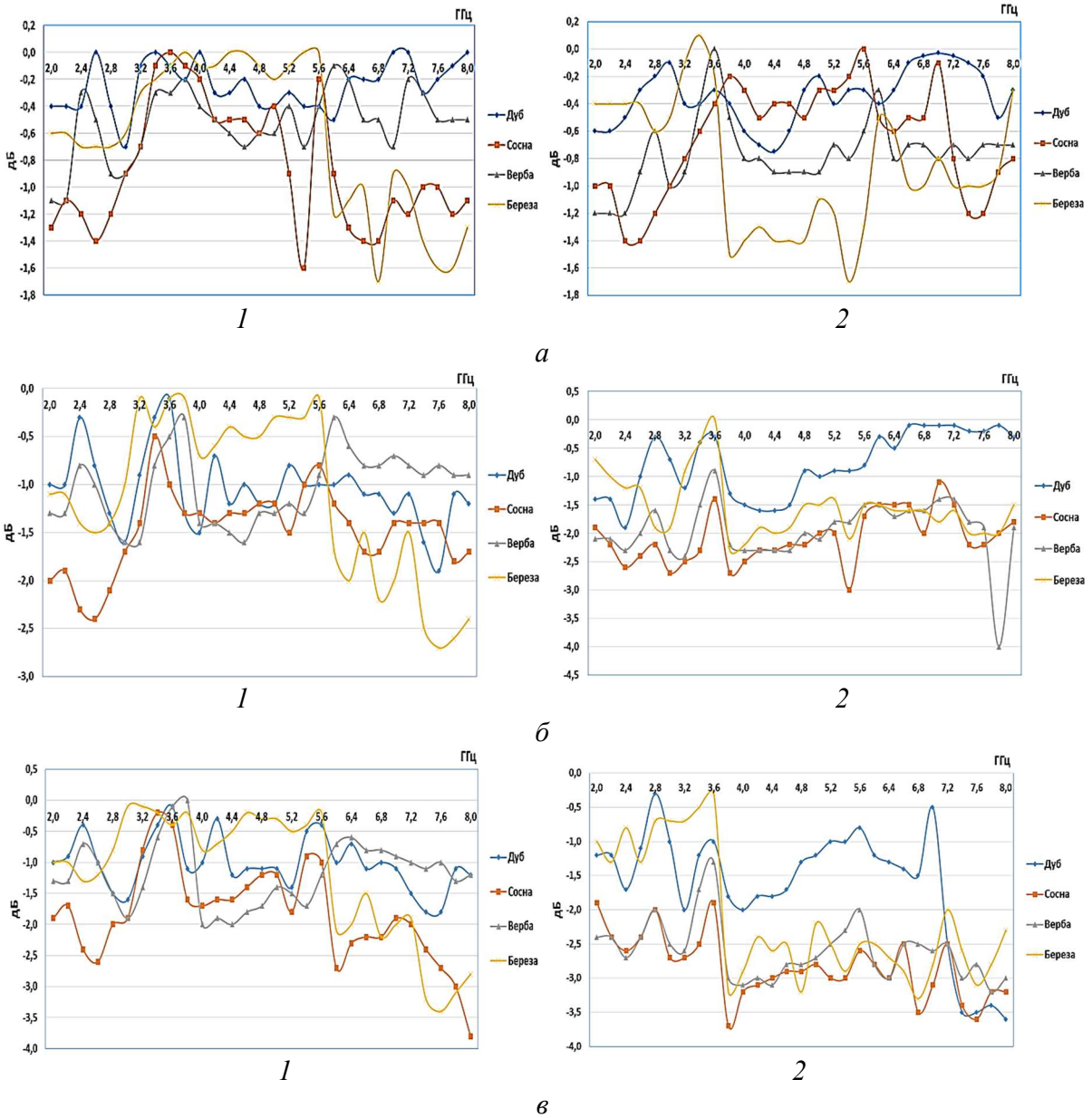
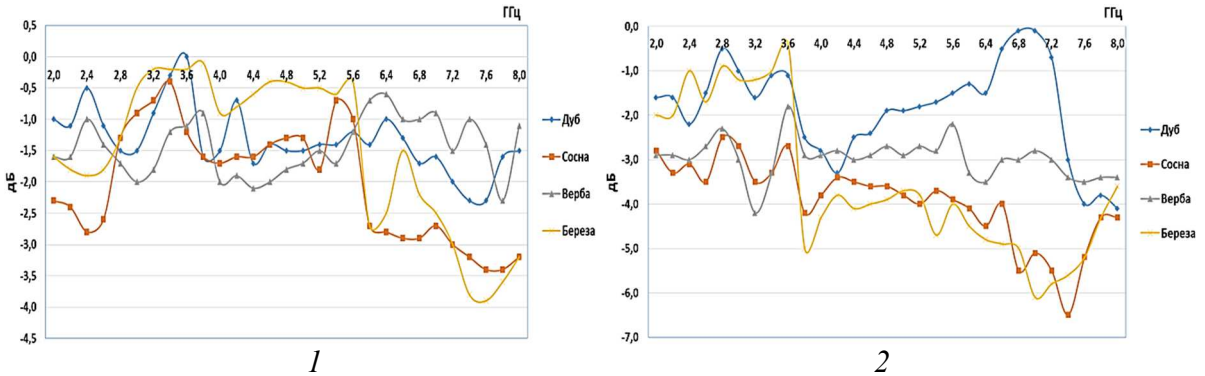



*Рис. 5. Залежності послаблення сигналу дерев'яними матеріалами для положення волокон перпендикулярно (1) та паралельно (2) від частоти при сталих рівнях вологості: а – 1 %; б – 3 %; в – 5 %; г – 8 %*




*1* *2*

*г*

*Рис. 5. Аркуш 2*

Аналіз цих залежностей показує вплив положення волокон обраних порід дерев до площини поляризації, а саме визначає зони максимумів та мінімумів затухання сигналу.

Для всіх досліджуваних матеріалів, із перпендикулярним розташуванням волокон, можна виділити діапазон 3,4–5,6 ГГц. Саме на таких частотах у більшості матеріалів послаблення сигналу найменше.

Для більшості матеріалів, розташованих волокнами паралельно, можна виділити частоту 2,8 та 3,6 ГГц, як найбільш придатну для роботи апаратури за рівнем вологості до 8 %. Підвищення вологи деревини твердих порід найменше впливає на роботу НВЧ системи.

**Висновки відповідно до статті.** Для основних дерев'яних матеріалів: дуб, сосна, верба, береза визначені експериментальні залежності послаблення сигналу НВЧ від вологості в смузі частот 2-8 ГГц.

Значний вплив на проходження сигналу через матеріал чинить зміна положення зразка. Наприклад, для берези затухання сигналу при перпендикулярному положенні досягає 2 дБ, при паралельному – 1,3 дБ. Варто звернути увагу, що для частоти 2,4 ГГц при паралельному розташуванні волокон найкращий матеріал для проходження сигналу – береза, а при перпендикулярному – дуб.

Дані залежності можуть використовуватись як інформаційні характеристики систем неруйнівного контролю чи діагностики стану технічних об'єктів та створення каналів радіозв'язку, які працюють у будівлях та спорудах. Враховуючи розташування зразків деревини різних порід відносно антен, можна забезпечити оптимальну роботу НВЧ системи.

## Список використаних джерел

1. Маилян Р. Л., Маилян Д. Р., Веселев Ю. А. Строительные конструкции: учебное пособие. Изд. 2-е. Ростов н/Д: Феникс, 2005. 880 с.

2. Харвей А. Техника СВЧ. Москва: Сов. радио, 1965. 775 с.

3. Мальцев П., Шахнович И. СВЧ-технологии – Основа электроники будущего тенденции и рынки. *ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ*. 2015. № 8. С. 72-73.

4. Шахнович И. Системы беспроводной связи 5G: телекоммуникационная парадигма, которая изменит мир. Краткие тезисы. *ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ*. 2015. № 7. С. 48–55.

5. Кудряшов А. А. Затухание радиоволн и беспроводные технологии построения промышленных сетей диапазона 2,4 ГГц. *Вісник ЧДТУ*. 2012. № 4 (61). С. 183-190.

6. Приступа А. Л., Безручко В. М., Велігорський О. А., Ревко А. С., Кришньов Ю. В. Сучасні автономні гідрометеорологічні вимірювальні станції: монографія. Чернігів: Видавець Брагинець О.В., 2019. 180 с.

7. Аўтаматызаваныя аўтаномныя станцыі гідраметэаралагічнага/экалагічнага маніторынгу навакольнага асяроддзя : манаграфія / Ю. В. Крышнеў і ін. Гомель: Pitmedia, 2019. 198 с.

8. Нарытник Т., Бабак В., Ильченко М., Кравчук С. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах. Київ: Техніка, 2000. 298 с.

9. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. Москва: Высш. школа, 1986. 367 с.

10. Вязьмитинов И. А., Мирошниченко Е. И., Сытник О. В. Результаты исследований ослабления энергии электромагнитных волн оптически непрозрачными преградами. *Радіофізика та електроніка.* 2007. Т. 12, № 2. С. 426-434.

11. Сатюков А. І., Приступа А. Л., Ленько Ю. В. НВЧ метод вимірювання вологості об'єктів довільної форми. *Технічні науки та технології:* науковий журнал. 2017. № 2(8). С. 20-28.

12. Сатюков А. І., Приступа А. Л. Використання хвилеводно-коаксиального переходу при вимірюванні вологості тіл з довільною геометрією. *Збірник матеріалів науково-технічної конференції. Фізика, електроніка, електротехніка* / Сумський державний університет. Суми, 2014. С. 51.

13. Сатюков А., Приступа А., Журко В., Бивалькевич М. Результати експериментальних досліджень впливу вологості стінових будівельних матеріалів на проходження радіохвиль НВЧ діапазону. *Технічні науки та технології*: науковий журнал. 2018. № 1(11). С. 252-263.

14. Сурикова Н. С., Вилипп Е. М. Строение дерева и древесины. Методические указания. Томск: Изд-во Томского архитектурно-строительного университета, 2004. 46 с.

15. Carullo, A. Ferrero and M. Parvis. A microwave system for relative humidity measurement. *IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.99CH36309)*, Venice, 1999. Vol. 1. P. 124-129.

16. Reyes-Guerrero J. C., Ciamulski T. Influence of temperature on signal attenuation at microwaves frequencies underwater. *OCEANS 2015 - Genova*, Genoa, 2015. P. 1-4.

17. Asp A., Hentilä T., Valkama M., Pikkuvirta J., Hujanen A., Huhtinen I. Impact of Concrete Moisture on Radio Propagation: Fundamentals and Measurements of Concrete Samples. *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Oulu, Finland, 2019. P. 542-547.

18. Pozar D. M. Microwave engineering, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.

19. Kon S., Horibe M., Kato Y. Dynamic measurements of moisture content using microwave signal and its verification. *2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, Ottawa, ON, 2016. P. 1-2.

20. Jiang Y., Zhang Y. Research on Microwave Measurement for Grain Moisture Content in Granary. *2009 IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (case 2009)*. Zhangjiajie, 2009. P. 327-330.

21. Pengfei L., Bo W., Junfeng J. The Application of Microwave Detecting Textile Moisture Content. *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Changsha, 2010. P. 706-709.

22. Menke F., Knochel R. New density-independent moisture measurement methods using frequency-swept microwave transmission. *1996 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. San Francisco, CA, USA, 1996. Vol. 3. P. 1415-1418.

23. Vermeulen C., Hancke G. P. Continuous measurement of moisture in nonconducting materials. *Conference Record IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Metropolitan, NY, USA, 1992. P. 419-421.

## References

1. Mailyan, R. L., Mailyan, D. R., Veselev, Yu. A. (2005). *Stroitelnye konstruktsii [Building construction]* (2nd ed.). Rostov n/D: Feniks [in Russian].

2. Kharvey, A. (1965). *Tekhnika SVCH [Microwave technology]*. Moscow: Sov. radio [in Russian].

3. Maltsev, P., Shakhnovich, I. (2015). SVCH-tekhnologii – Osnova elektroniki budushchego tendentsii i rynki [Microwave Technology – The Basics of Future Electronics Trends and Markets]. *ELEKTRONIKA – ELECTRONICS*, 8, 72-73 [in Russian].

4. Shakhnovich, I. (2015). Sistemy besprovodnoy svyazi 5G: telekommunikatsionnaya paradigma, kotoraya izmenit mir [5G wireless systems: the telecommunication paradigm that will change the world]. *ELEKTRONIKA - ELECTRONICS*, 7, 48–55 [in Russian].

5. Kudryashov, A. A. (2012). Zatukhaniye radiovoln i besprovodnyye tekhnologii postroyeniya promyshlennykh setey diapazona 2,4 GGts [Radio wave attenuation and wireless technologies for building industrial networks in the 2.4 GHz band]. *Visnik CHDTU. – Bulletin of CHSTU*, 4 (61), 183-190 [in Russian].

6. Prystupa, A. L., Bezruchko, V. M., Veligorskii, O. A., Revko, A. S., Krishnov, Yu. V. (2019). *Suchasni avtonomni hidrometeorolohichni vimiriuvalni stantsii [Modern autonomous hydrometeorological measuring stations]*. Chernihiv: Braginecz O. V. [in Ukrainian].

7. Kryshneў, Yu. V. (Ed.) (2019). *Aўtamatyzavanyya aўtanomnyya stancyi gidrametearalagichnaga / ekalagichnaga manitoryngu navakolnaga asyaroddzya [Automated autonomous hydrometeorological / ecological monitoring environment station]*. Gomel: Pitmedia [in Belorussian].

8. Narytnik, T., Babak, V., Ilchenko, M., Kravchuk, S. (2000). *Mikrovolnovye tekhnologii v telekommunikatsionnykh sistemakh [Microwave technology in telecommunication systems]*. Kyiv: Tekhníka [in Russian].

9. Pasynkov, V. V., Sorokin, V. S. (1986). *Materialy elektronnoy tekhniki [Electronic Materials]*. Moscow: Vyssh. shkola [in Russian].

10. Vyazmitinov, I. A., Miroshnichenko Ye. I., Sytnik O. V. (2007). Rezultaty issledovanii oslableniia energii elektromagnitnykh voln opticheski neprozrachnymi pregradami [The results of studies of the attenuation of the energy of electromagnetic waves by optically opaque barriers]. *Radiofizika ta yelektronika – Radiophysics and electronics*, 12 (2), 426–434 [in Russian].

11. Satiukov, A. I., Prystupa, A. L., Lenko, Yu. V. (2018). NVCh metod vymiriuvannia volohosti obiektiv dovilnoi formy [Microwave method of measuring moisture objects of the arbitrary form]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2(8), 20–28 [in Ukrainian].

12. Satyukov, A. I., Pristupa, A. L. (2014). Vikoristannya khvilevodno-koaksial'nogo perekhodu pri vimíryuvanní vologostí tíl z dovíl'noyu geometríêyu [The use of waveguide-coaxial transition when measuring the humidity of bodies with arbitrary geometry]. *Naukovo-tekhníchna konferentsía: Fizika, yelektronika, elektrotekhnika – Scientific and technical conference: Physics, electronics, electrical engineering.* Sumy, 51 [in Ukrainian].

13. Satyukov, A., Pristupa, A., Zhurko, V., Bivalkevich, M. (2018). Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen vplivu vologosti stinovykh budyvelnykh materialiv na prokhodzhennia radiokhvil NVCH díapazonu [Results of experimental studies of the Moisture influence for wall building materials on the passage of microwave radio waves]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2(8), 20-28 [in Ukrainian].

14. Surikova, N. S. (2004). *Stroenie dereva i drevesiny [The structure of wood and wood]*. Tomsk: TABU [in Russian].

15. Carullo, A. Ferrero, and Parvis, M. (1999). A microwave system for relative humidity measurement. *IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.99CH36309)* (vol. 1, pp. 124-129). Venice.

16. Reyes-Guerrero, J. C., Ciamulski, T. (2015). Influence of temperature on signal attenuation at microwaves frequencies underwater. *OCEANS 2015 – Genova* (pp. 1-4). Genoa.

17. Asp, A., Hentilä, T., Valkama, M., Pikkuvirta, J., Hujanen, A., Huhtinen, I. (2019). Impact of Concrete Moisture on Radio Propagation: Fundamentals and Measurements of Concrete Samples. *2019 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)* (pp. 542-547). Oulu, Finland.

18. Pozar, D. M. (2012). Microwave engineering. Hoboken, NJ, USA: Wiley.

19. Kon, S., Horibe, M., Kato, Y. (2016). Dynamic measurements of moisture content using microwave signal and its verification. *2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)* (pp. 1-2). Ottawa, ON.

20. Jiang Y., Zhang, Y. (2009). Research on Microwave Measurement for Grain Moisture Content in Granary. *2009 IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (case 2009)* (pp. 327-330). Zhangjiajie.

21. Pengfei, L., Bo, W., Junfeng, J. (2010). The Application of Microwave Detecting Textile Moisture Content. *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation* (pp. 706-709). Changsha.

22. Menke, F., Knochel, R. (1996). New density-independent moisture measurement methods using frequency-swept microwave transmission. 1*996 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* (vol. 3, pp. 1415-1418). San Francisco, CA, USA.

23. Vermeulen, C., Hancke, G. P. (1992). Continuous measurement of moisture in nonconducting materials. *1992 Conference Record IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference* (pp. 419-421). Metropolitan, NY, USA.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*UDC 621.391.812*

*Anatoliy Satukov, Anatoliy Prystupa, Mykola Moshel*

# RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE INFLUENCE OF WOOD MATERIAL MOISTURE ON THE TRANSMISSION OF UHF BAND SIGNALS

***Relevance of the research.*** *Continuous development of microwave systems causes the emergence of new devices and methods for measuring the parameters of various materials. The field of application of equipment operating in the range of high frequencies is expanding rapidly. A large number of modern systems operate in the range of 2-8 GHz within the premises and between various engineering structures. Their performance is related to the passage of high-frequency signals through various surrounding obstacles - walls, doors, ceilings, etc. Therefore, the urgent task is a detailed study of the interaction of microwave signals with different materials. The wood, which has a high ability to absorb moisture, and the water content of the material, even in small quantities significantly affects its physical, chemical and electrical properties, is of particular importance.*

***Formulation of the problem.*** *The propagation of radio waves in a room is complex, since the modern structure is a non-uniform space, filled with randomly arranged semiconductor obstacles. As a rule, not one wave gets to the point of reception, but several - due to reflections from different surfaces and diffraction on obstacles. Understanding the influence of various factors on the propagation of radio waves has many practical applications, from frequency selection for international shortwave broadcasting, to the design of reliable mobile telephone systems, radio navigation and operation of radar and monitoring systems.*

***Analysis of recent research and publications.*** *The issues of radio wave propagation in the air have been studied very carefully and thoroughly. Frequency attenuation of signals is determined. This made it possible to create reliable and optimally structured wireless channels operating at frequencies with the least signal attenuation.*

***Selection of previously unsettled parts of the general problem.*** *In recent years, radio systems have been increasingly developed, that operate in the presence of radio interference in the presence of various interferences. For example, mobile or wireless internet, including in premises and buildings. Radio channel parameters such as transmitter power, antenna design and placement are closely linked to the interference of radio waves with various interference. Such obstacles, in particular, can be different building structures - walls, ceilings, etc. They reduce the power of the radio waves passing through them. The value of such attenuation can significantly depend on the Moisture level of the obstruction material. Data from various literary sources largely ignore this aspect.*

***The purpose of the study*** *is the effect of wood moisture on the level of microwave attenuation and determining the frequencies at which the minimum attenuation is observed.*

***Presenting main material.*** *The authors conducted experimental studies to determine the degree of microwave signals attenuation by wood at different levels of Moisture. The results obtained were compared with the passage of radio waves through a dry sample. This made it possible to find out precisely the effect of the change in Moisture on the attenuation of the radio signal. Measurements were made in the frequency range of 2 - 8 GHz and changes in humidity of the samples from 0 to 8 %.*

*The analysis of the attenuation of the signal from the degree of humidity at individual frequencies is carried out. We compared the attenuation of radio waves with different materials with the same humidity level.*

***Conclusions****. According to the results of experimental studies, graphical dependences of the signal attenuation on the humidity level with increasing frequency for the selected tree species (oak, pine, willow and birch) were made. The obtained data allows to allocate frequency intervals for optimal operation of the equipment.*

***Keywords:*** *microwave signal; attenuation of radio waves; wooden materials; humidity; experimental studies.*

*Fig .: 5. Bible: 23.*

**Сатюков Анатолій Іванович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, метрології та фізики, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Satukov Anatoliy** – PhD of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Associate Professor of Information and Measurement Technology Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035, Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** ivtmif@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-2901-1152

**Приступа Анатолій Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, метрології та фізики, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Prystupa Anatoliy** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Information and Measurement Technology Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** a.l.prystupa@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9412-2698

**Мошель Микола Васильович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Чернігівського національного технологічного університету (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Moshel Mykola** – Doctor in Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Information and Measurement Technologies of Chernihiv National Technological University (95, Shevchenko Str., Chernihiv, 14035, Ukraine).
**E-mail:** ivtmif@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8775-5793

Сатюков А., Приступа А., Мошель М. Результати експериментальних досліджень впливу вологості дерев'яних матеріалів на проходження сигналів НВЧ діапазону. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 156-167

*УДК 621.311.4.031*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-168-176*

*Олег Сінчук, Сергій Бойко, Олексій Городній,*
*Андрій Некрасов, Андрій Онищенко, Марина Ножнова*

# АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УМОВАХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

***Актуальність теми дослідження.*** *Перспектива розвитку залізорудної галузі зумовлюється перспективою розвитку металургійного виробництва й експорту сировини. Нині проведено реформування гірничо-металургійного комплексу. У зв'язку із загостренням енергетичних проблем та необхідністю енергозбереження, останніми роками дедалі більше уваги у світі приділяється використанню відновлюваної енергії. Серед лідерів є використання сонячної енергії. Сонячну енергію використовують для отримання гарячої води, тепла та електроенергії. Завдяки впровадженню сонячних колекторів з'явились значні можливості енергозабезпечення будівель для систем гарячого водопостачання та опалення. Сонячні установки екологічно чисті, за їх допомогою можна отримувати енергію, що не шкодить навколишньому середовищу.*

***Постановка проблеми.*** *Проблемою цієї роботи є визначення основних аспектів впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Багато авторів досліджували питання експлуатації та проєктування сонячних електростанцій. Обґрунтовано позитивний ефект від впровадження системи очищення сонячних панелей від пилу та від впровадження системи нахилу сонячної панелі. Дослідження, які були проведені раніше, вказують на те, що енергетичні характеристики сонячних панелей при роботі в умовах гірничих підприємств будуть на достатньо ефективному рівні, враховуючи природні вентиляційні потоки, що будуть їх охолоджувати. Між тим, залишаються недослідженими питання впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств. У попередніх дослідженнях нами обґрунтовано позитивний ефект від впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств, а саме модульність, надійність, зменшення негативного впливу на екологію.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Враховуючи нові, раніше не досліджені фактори, що у мовах гірничорудних підприємств впливають на енергетичні характеристики сонячних електростанцій, актуальним науково-практичним завданням є дослідження потенціалу сонячної енергії в умовах цих підприємств, та особливості експлуатації сонячних електростанцій.*

***Постановка завдання.*** *Отже, актуальним науково-практичним завданням є дослідження потенціалу сонячної енергії в умовах цих підприємств та особливості експлуатації сонячних електростанцій, враховуючи фактори, що впливають на їхні енергетичні показники.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Гірничорудні підприємства України розташовані на території, що сприятлива для впровадження сонячної енергетики. Використання системи очистки та системи нахилу панелі генерована потужність становила 2000 кВт, при використанні системи очистки генерована потужність зросла на 300 кВт. Тобто можна зробити висновок і зазначити що застосування системи очистки та нахилу сонячних панелей має кращий ефект на роботу сонячної електростанції.*

***Висновки відповідно до статті.*** *На гірничорудних підприємствах актуальним та можливим є впровадження в загальну структуру систем електроживлення сонячних електростанцій, враховуючи специфіку їх експлуатації. Сонячні панелі при експлуатації в умовах гірничорудних підприємств, повинні мати систему очищення та орієнтації з метою підвищення ефективності їх функціонування в розподільчих мережах цих підприємств.*

***Ключові слова:*** *розосереджена генерація; електропостачання підприємств; потенціал сонячної енергії; гірничорудні підприємства.*

*Рис.: 4. Табл.: 3. Бібл.: 9.*

**Актуальність теми дослідження.** На даний час проведено реформування гірничорудної галузі, що було зумовлено перспективою розвитку металургійного виробництва і експорту сировини [1].

Між тим, у зв'язку з необхідністю енергозбереження, новітні технології у сфері енергетики в останні роки все більш направлені на використання джерел розосередженої генерації, а саме джерел відновлюваної енергії. Серед джерел відновлюваної енергії наразі пріоритет надається використанню сонячної енергії. Завдяки впровадженню новітніх технологій у сфері сонячної енергетики з'являються можливості енергозабезпечення як побутових так і промислових споживачів електроенергії. Сонячні фотоенергетичні установки вважаються умовно екологічно чистими, за їх допомогою можна отримувати електричну енергію, не завдаючи шкідливого впливу навколишньому середовищу [2].

**Постановка проблеми.** Проблемою цієї роботи є визначення основних аспектів впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств, що зумовлено запиленістю середовища експлуатації фотоелектричних установок, внаслідок чого погіршуються їх енергетичні характеристики.

© Сінчук О. М., Бойко С. М., Городній О. М., Некрасов А. В., Онищенко А. О., Ножнова М. О., 2020

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Багато авторів досліджували питання експлуатації та проєктування сонячних електростанцій. Обґрунтовано позитивний ефект від впровадження системи очищення сонячних панелей від пилу та від впровадження системи нахилу сонячної панелі. Дослідження, які були проведені раніше, вказують на те, що енергетичні характеристики сонячних панелей при роботі в умовах гірничих підприємств будуть на достатньо ефективному рівні, враховуючи природні вентиляційні потоки, що будуть їх охолоджувати. Між тим, залишаються недослідженими питання впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств [1-9].

У попередніх дослідженнях нами обґрунтовано позитивний ефект від впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств, а саме модульність, надійність, зменшення негативного впливу на екологію [1].

**Визначення недосліджених частин загальної проблеми.** Отже, актуальним науково-практичним завданням є вивчення питань щодо впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств, враховуючи специфіку їх експлуатації.

**Мета статті.** Головною метою цієї роботи є визначення основних аспектів впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств.

**Виклад основного матеріалу.** Територія України відноситься до зон із середньою інтенсивністю сонячної радіації. Густина сонячної радіації залежить від часу доби та пори року, а також від характеристик земної поверхні, широти місцевості та прозорості атмосфери. З цієї причини для різних регіонів України, величина річного потрапляння сонячної радіації на 1 м$^2$ з поверхні землі суттєво змінюється та має статичний характер розподілу. У напрямку з Півночі на Південь основною тенденцією є збільшення густини сонячної радіації та кількості сонячних днів, з відповідним збільшенням річного значення сонячної радіації, що потрапляє на 1 м$^2$ поверхні Землі.

Більша частина території України лежить у другій та в третій зоні. Четверта зона найменше придатна для використання сонячної енергії. Усі південні області країни – у першій та другій зонах. Саме в першій зоні надходження сонячного проміння є найбільшим і становить 1350 кВт год/км$^2$ на рік, а найменша – в четвертій 1000 кВт год/км$^2$. Для другої зони ця велична становить 1250 кВт год/км$^2$ та для третьої – 1150 кВт год/км$^2$ на рік.

Отже, ми маємо достатні можливості для ефективного використання теплоенергетичного обладнання на території Україні. Термін «ефективне використання» означає, що геліоустановка може працювати з віддачею в 50 % і більше, а це 9 місяців у південних областях України (з березня по листопад), і 7 місяців – у північних областях (з квітня по жовтень). Взимку ефективність роботи знижується, але не зникає.

Отже, і в умовах нашого клімату сонячні системи працюють круглий рік, правда тільки зі змінною ефективністю. Тому варто розглянути сумарний річний потенціал сонячної енергії на території України, де розташовані гірничорудні підприємства, який представлено в табл. 1 [1].

Таблиця 1

*Річний потенціал сонячної енергії на території Полтавської і Дніпропетровської областей*

| Області | Потенціал сонячної енергії МВт год/рік | | |
|---|---|---|---|
| | Загальний потенціал ($\cdot 10^9$) | Технічний потенціал ($\cdot 10^7$) | Доцільно-економічний потенціал ($\cdot 10^5$) |
| Дніпропетровська | 37,6 | 18 | 2,8 |
| Полтавська | 31,9 | 15,3 | 2,4 |

Під час розробки деяких місцеродовищ в атмосферу кар'єру можуть виділятися газоподібні речовини, основним із яких є радон.

При розробці корисних копалин в атмосферу кар'єрів виділяється також пил, що являє собою дрібні тверді частинки розміром менше 0,1–0,5 мм. Він може бути ядовитим (кварцовий пил) та радіоактивний пил.

Фізика процесу поширення пилу дозволяє виявити три основних фактори, що визначають пилову обстановку на будь-якому об'єкті, – це вміст пилу в повітрі, винос (викид) пилу потоками, що рухаються, і відкладення пилу на прилеглих до її джерел територіях. Цілком логічно досліджувати ці чинники у взаємному зв'язку, причому головним з них є вміст пилу в повітрі, а наступні два залежать від нього і від параметрів аерозольної системи, зокрема, від швидкості газоповітряного потоку, маси пилових частинок і параметрів показників, що характеризують дифузію цих частинок.

Наша рекомендація щодо очищення фотогальванічних енергетичних установок: апарат високого тиску з підігрівом води HDS 10 / 20-4 M або без підігріву води HD 10 / 23-4 S в комбінації з водопомякчувачем і приладдям системи iSolar - дискової щіткою (або щіткової складанням) і телескопічною штангою.

Для розрахунків енергетичних характеристик, при проєктуванні сонячних електростанцій, необхідно задатися такими вихідними даними (для прикладу взято м. Кременчук, Україна):

1) *координати розташування сонячної батареї:* місто Кременчук із широтою φ = 49,33°;

2) *день року*: розрахунок проводиться для 15 дня 3, 6, 9 і 12 місяців;

3) *година дня:* дані обчислюються на кожну годину дня;

4) позиціонування проводиться безперервно з постійним суміщенням нормалі до поверхні сонячної батареї і напрямку на Сонце.

Визначення схилення Сонця для зазначених днів (табл. 2) у році проведено за допомогою формули (1) [3].

Таблиця 2

*Порядкові номери днів 2014 року та схилення Сонця*

| | 15 березня | 15 червня | 15 вересня | 15 грудня |
|---|---|---|---|---|
| *m* | 74 | 166 | 257 | 349 |
| *δ* | -2,82 | 23,36 | 2,62 | -23,38 |

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+m}{365}\right), \quad (1)$$

де – схилення Сонця; град; *m* – порядковий номер дня в році.

Розрахунок тривалості дня 15 березня, 15 червня, 15 вересня і 15 грудня проведено згідно з формулою (2), а також визначено час сходу і заходу Сонця.

$$T_{\partial} = \frac{24}{\pi}\arccos(-tg\varphi \cdot tg\delta), \quad (2)$$

де $\varphi$ – географічна широта місцевості.

Відповідно до цього прийнято за початкову годину розрахунків найменше значення часу сходу Сонця – це 4 година ранку, а за кінцеву – найбільше – це 20 година.

Для розрахунку інтенсивності потоку сонячного випромінювання, яке поступає на похилу поверхню сонячної батареї, необхідно знати кути падіння сонячних променів на неї.

Нами проведено розрахунок кутів падіння сонячних променів на поверхню з однаковими азимутами, користуючись формулою (2). При цьому годинний кут ω розраховано згідно з формулою (3) від 4 до 20 години і кроком 1 година.

$$\cos\theta_1 = \cos(\varphi-\beta)\cdot\cos\delta\cdot\cos\omega + \sin\delta\cdot(\varphi-\beta); \quad (3)$$

$$\omega = 15 \cdot (12 - \tau), \tag{4}$$

де $\beta$ – кут нахилу поверхні сонячної батареї відносно поверхні Землі.

Коефіцієнт відбивання для прямовисного падіння променів у випадку використання систем позиціонування сонячних батарей визначено за формулою (5)

$$\rho = \left[ (n-1)/(n+1) \right]^2. \tag{5}$$

При цьому що коефіцієнт заломлення скла становить $n$ = 1,526.

Знаючи кут падіння променів $\theta_1$ (рис. 1), кут заломлення падіння $\theta_2$ визначимо за співвідношенням:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\theta_2)}{\sin(\theta_1)}. \tag{6}$$

Враховуючи, що для повітря $n$ = 1, отримаємо:

$$\theta_2 = \arcsin\left( \frac{\sin(\theta_1)}{n_2} \right). \tag{7}$$

Здатність скла відбивати промені, які падають на нього під кутом $\theta_1$, розраховано за формулою (8).

$$\rho(\theta_1) = (1/2)\left[ \begin{pmatrix} \sin^2(\theta_2 - \theta_1)/\sin^2(\theta_2 + \theta_1) + \\ + tg^2(\theta_2 - \theta_1) + tg^2(\theta_2 + \theta_1) \end{pmatrix} \right]. \tag{8}$$

Прийнявши, що для механічного захисту сонячної батареї використано лише одне чисте скло завтовшки 3 мм, розраховано його пропускну $\tau_{пр}$ та поглинальну $\tau_{пог}$ здатність за формулами (5) і (6) відповідно.

$$\tau_{пр} = (1-\rho)/\left[ 1 + (2 \cdot i - 1) \cdot \rho \right]; \tag{9}$$

$$\tau_{пог} = \exp\left( -\frac{k \cdot L}{\cos(\theta_2)} \right). \tag{10}$$

Розрахунок надходження сонячної енергії здійснено для двох вищезазначених випадків монтажу сонячних панелей.

На будь-яку поверхню попадає сонячне випромінювання із двох джерел: безпосередньо від сонця – *пряме* та *розсіяне* через атмосферу. Для розрахунку залежності розсіяного сонячного випромінювання *Ep* від кута висоти сонця *h* дані табл. 3 взяті із [3] апроксимовано неперервною функцією із середньоквадратичним відхиленням 0,29 Вт/м$^2$, яку використано для розрахунків.

Таблиця 3

*Інтенсивність розсіяної сонячної радіації*

| *h*, град | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Ep*, Вт/м$^2$ | 31,4 | 43,1 | 52,4 | 60,5 | 65,2 | 67,5 | 68,6 |

$$E_p = -0{,}011 \cdot h^2 + 1{,}25 \cdot h + 17{,}24, \tag{11}$$

де h – кут висоти Сонця (3.45)

$$h = \arccos(\sin\varphi \cdot \sin\delta \cdot \sin\omega + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega). \tag{12}$$

Розрахунок надходження прямого сонячного випромінювання виконано за формулою

$$E_{ср} = 1360 \cdot \sin(h) / \left[ \sin(h) + (1 - P_{пр}) / P_{пр} \right]. \tag{13}$$

При розрахунку сумарної сонячної енергії на перпендикулярну поверхню враховано коефіцієнти пропускання та поглинання захисного скла для кута падіння проміння 0° ($\tau_{пр}$ = 0,917, $\tau_{пог}$ = 0,988 ).

Результати розрахунків використано при моделюванні роботи фотоелектричного перетворювача.

На рис. 1 зображено запропоновану функціональну схему системи очистки та системи нахилу.

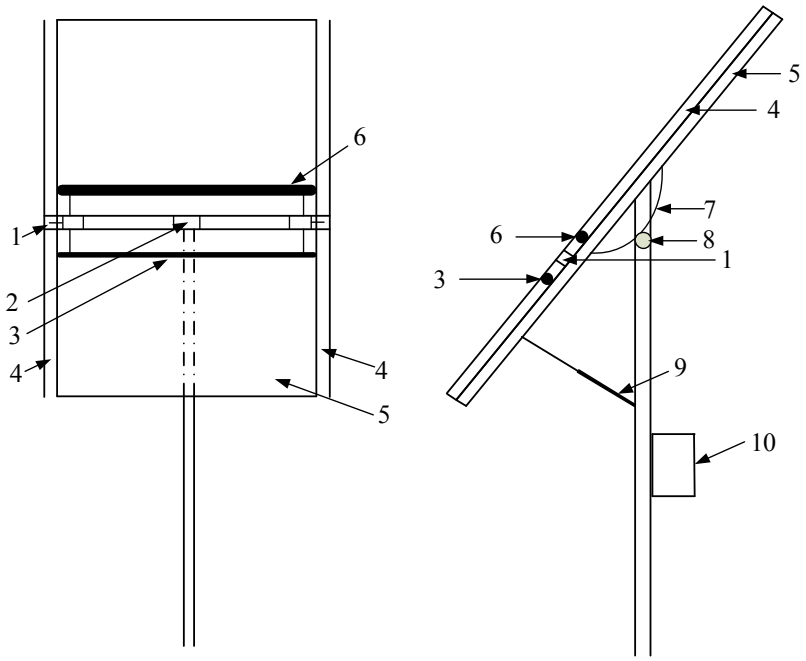



*Рис. 1. Функціональна схема системи очистки та системи нахилу сонячної панелі:*
*1 – блок переміщення системи очистки; 2 – блок керування переміщенням системи очистки; 3 – блок магнітної очистки; 4 – направляюча рейка; 5 – сонячна панель; 6 – блок сухої очистки; 7-8 – система нахилу; 7 – направляюча рейка; 8 – рухомий ролик; 9 – привод системи нахилу; 10 – блок керування сонячної панелі*

Система очистки сонячних панелей в умовах залізорудних підприємств працює таким чином: система керування сонячною панеллю *10* подає сигнал на систему керування очисткою *2*, система керування очисткою *2* подає сигнал на блок переміщення *1*, переміщення здійснюється завдяки направляючій рейці *4*, в верхньому положенні починає працювати магнітна очистка 3, після магнітної очистки *3* починає працювати система сухої очистки *6*, система керування сонячною панеллю *10* подає сигнал на систему нахилу *9*, сонячна панель змінює кут нахилу завдяки рухомому ролику *8* і направлючій рейці *7*.

Моделювання роботи СЕС покаже, як її можна бути використати для моделювання продуктивності роботи фотоелектричного перетворювача. Поступово проводячи тестування моделі, шляхом зміни інтенсивності опромінення в моделюванні, що приблизно моделює вплив навколишнього середовища. Також при генерації враховується температура фотоелектричного перетворювача, що своєю чергою відображається на ефективності роботи фотоелектричного перетворювача. Ефективність інвертора вважається фіксованою 97 %, це значення було визначено з моделі examplec solar converter. Модель представлена на рис. 2.

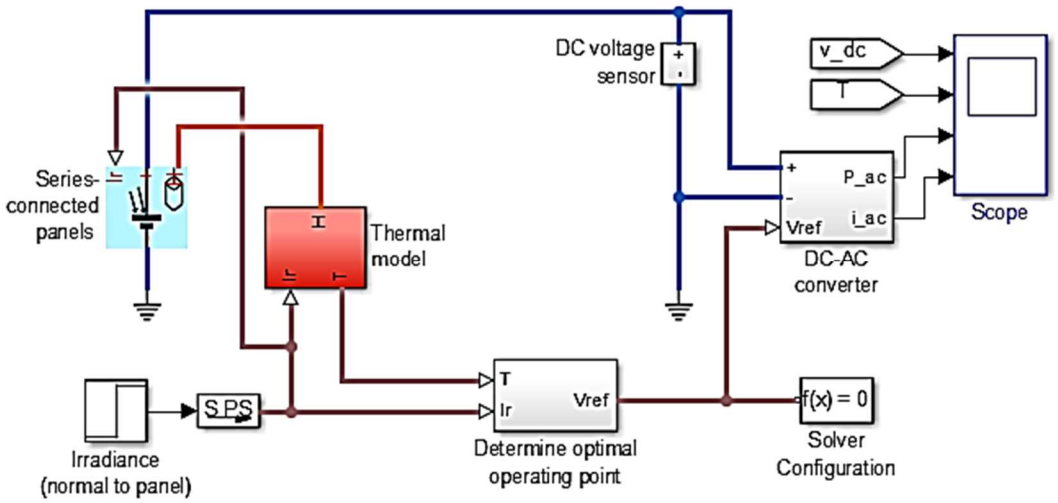



*Рис. 2. Загальний вигляд моделі фотоелектричного перетворювача*

Наведені нижче графіки показують характеристики сонячної панелі без системи очистки (рис. 3).

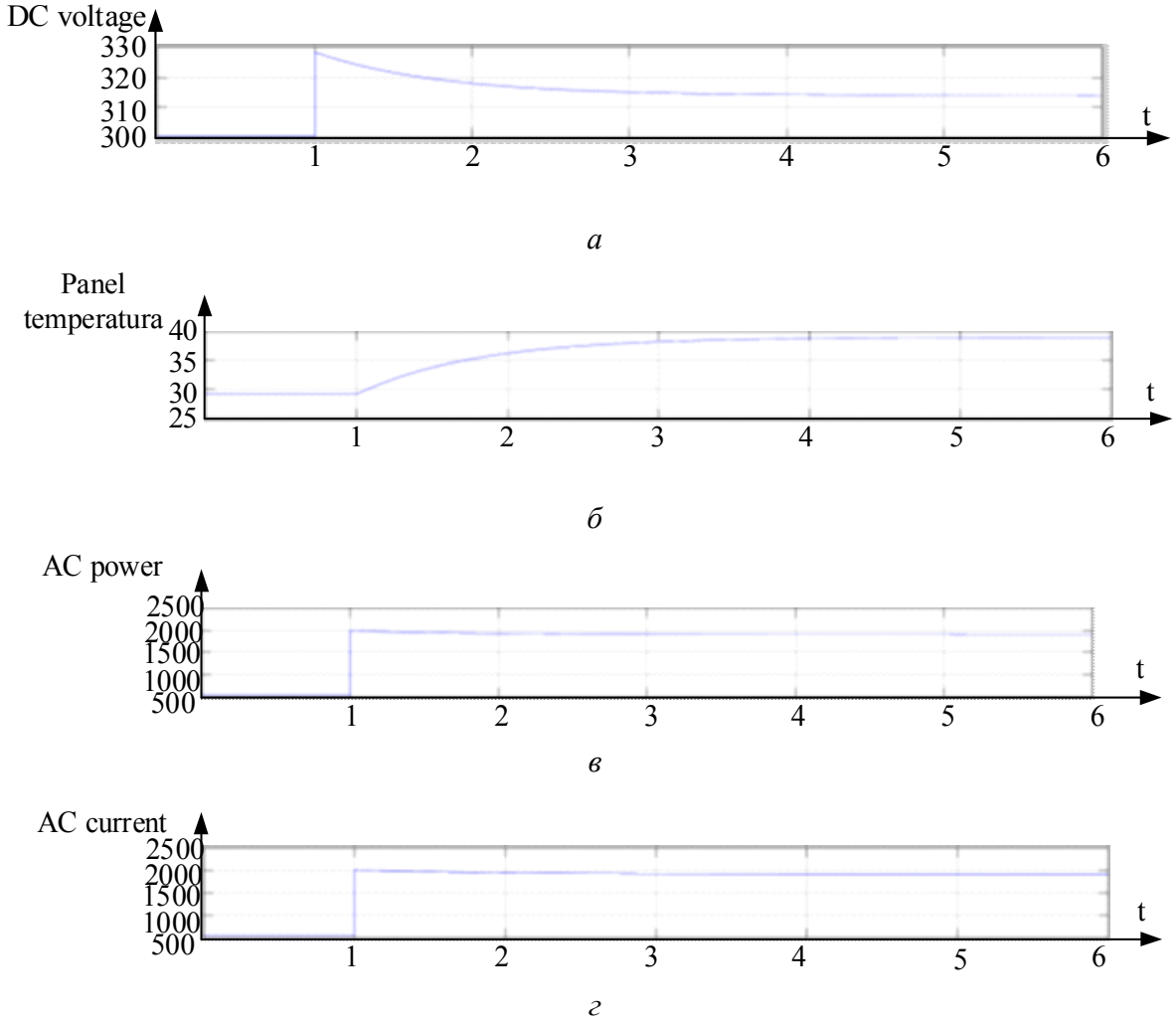



*Рис. 3. Енергетичні характеристики представленої моделі:*
*а – характеристика напруги постійного характеру; б – температура фотоелектричного*

*перетворювача; в – змінна потужність фотоелектричного перетворювача; г – графік змінного струму*

Після впровадження системи очистки та системи нахилу панелі було повторено експеримент і отримані такі графіки (рис. 4).

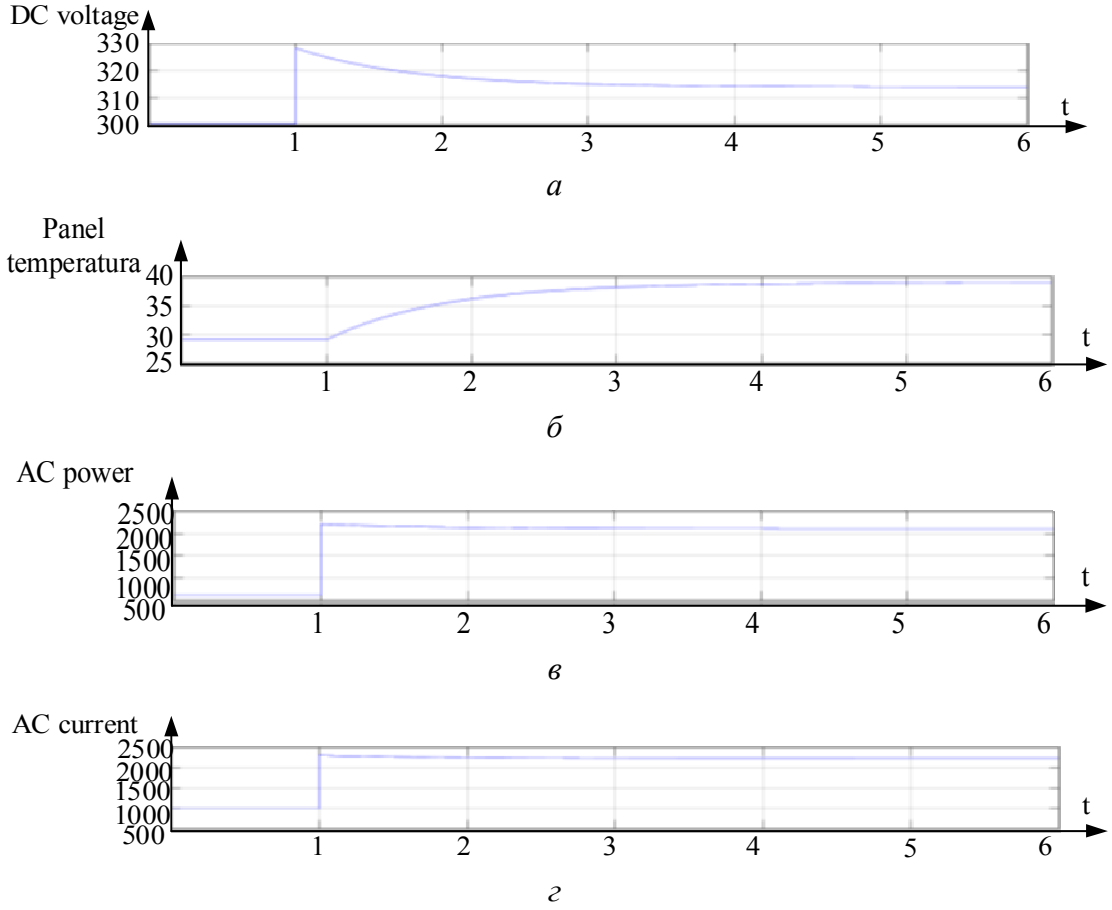



*Рис. 4. Енергетичні характеристики представленої моделі після впровадження системи очистки:*
*а – характеристика напруги постійного характеру; б – температура фотоелектричного перетворювача; в – змінна потужність фотоелектричного перетворювача; г – графік змінного струму*

Згідно з графіками (рис. 3, 4) можна зробити висновки, що до використання системи очистки та системи нахилу панелі генерована потужність становила 2000 кВт, при використанні системи очистки генерована потужність зросла до 2300 кВт. Тобто можна зробити висновок, що застосування системи очистки має кращий ефект на роботу СЕС.

**Висновки відповідно до статті.** 1. На гірничорудних підприємствах актуальним та можливим є впровадження в загальну структуру систем електроживлення сонячних електростанцій, враховуючи специфіку їх експлуатації.

2. Сонячні панелі при експлуатації в умовах гірничорудних підприємств повинні мати систему очищення та орієнтації з метою підвищення ефективності їх функціонування в розподільчих мережах цих підприємств.

**Список використаних джерел**

1. Сінчук О. М., Сінчук І. О., Бойко С. М., Караманиць Ф. І., Ялова О. М., Пархоменко Р. О. Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізорудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти): монографія. Кривий Ріг: Видавництво ПП Щербатих О. В., 2017. 152 с.

2. Кудря С. О., Морозов Ю. П., Кузнєцов М. П. Дослідження ефективності комбінованого використання енергії вітру, сонця і теплоти землі для отримання водню при електролізі води.

*Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях*: тези доп. наукової звітної сесії НАН України. Київ, 2013. С. 30.

3. Головко В. М., Денисюк П. Л., Кириленко В. М. Аналіз принципів побудови локальних систем енергозабезпечення на базі відновлювальних джерел енергії. *Відновлювана енергетика XXI століття*: IX Міжнар. конф., 15–19 вересня 2008 р.: тези доп. Крим, 2008. С. 124–125.

4. World Energy Outlook –2019, OECD/IEA, Paris.

5. Michael Forst. Germany's module industry poised for growth. *SUN & Wind Energy*. 2011. Vol. 5. P. 256-263.

6. Clean electricity from photovoltaics / by Archer M.D., Hill R. London: Imperial College Press, 2001. 868 p.

7. Harkonen J. Processing of high efficiency silicon solar cells. 2001. 115 p.

8. Eckart von Malsen. Opportunities for large-scale projects. *SUN & Wind Energy*. 2011. Vol. 5. P. 254-255.

9. Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley&Sons, 2003. 1179 p.

## References

1. Sinchuk, O. M., Sinchuk, I. O., Boyko, S. M., Karamanitsy, F. I., Yalova, O. M., Parkhomenko, R. O. (2017). *Renewable sources of electricity in structures of power supply systems of iron ore enterprises. (Analysis, prospects, projects) [Vidnovliuvani dzherela elektrychnoi enerhii v strukturakh system elektropostachannia zalizorudnykh pidpryiemstv. (Analiz, perspektyvy, proekty)]*. Kryvyi Rih: Publishing House PE Shcherbatyh O. V. [in Ukrainian].

2. Kudrya, S. O., Morozov, Yu. P., Kuznetsov M. P. (2013). Doslidzhennia efektyvnosti kombinovanoho vykorystannia enerhii vitru, sontsia i teploty zemli dlia otrymannia vodniu pry elektrolizi vody [Investigation of the Efficiency of Combined Use of Wind Energy, Sun and Earth Heat for Hydrogen Production at Water Electrolysis]. Proceeding from *Voden v alternatyvnii enerhetytsi ta novitnikh tekhnolohiiakh: tezy dop. naukovoi zvitnoi sesii NAN Ukrainy – Hydrogen in Alternative Energy and the Newest Technologies: Abstracts. Scientific Reporting Session of NAS of Ukraine* (p. 30), Kyiv [in Ukrainian].

3. Golovko, V. M., Denysyuk, P. L., Kirilenko, V. M. (2008). Analiz pryntsypiv pobudovy lokalnykh system enerho-zabezpechennia na bazi vidnovliuvalnykh dzherel enerhii [Analysis of the principles of construction of local systems of energy supply on the basis of renewable energy sources]. Proceeding from *Vidnovliuvana enerhetyka KhKhI stolittia: IX Mizhnar. konf. – Renewable energy of the 21st century: IX International. Conf.* (September 15-19, 2008, pp. 124–125). Crimea [in Ukrainian].

4. World Energy Outlook 2019, OECD/IEA, Paris.

5. Michael Forst. Germany's module industry poised for growth. *SUN & Wind Energy*. 2011. Vol. 5. P. 256-263.

6. Clean electricity from photovoltaics / by Archer M.D., Hill R. London: Imperial College Press, 2001. 868 p.

7. Harkonen J. Processing of high efficiency silicon solar cells. 2001. 115 p.

8. Eckart von Malsen. Opportunities for large-scale projects. *SUN & Wind Energy*. 2011. Vol. 5. P. 254-255.

9. Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley&Sons, 2003. 1179 p.

*UDC 621.311.4.031*

*Oleg Sinchuk, Sergii Boiko, Oleksiy Gorodny,*
*Andrey Nekrasov, Andrey Onishchenko, Maryna Nozhnova*

# ASPECTS OF IMPLEMENTATION OF SOLAR POWER PLANTS IN THE CONDITIONS OF MINING ENTERPRISES

***Urgency of the research.*** *The prospect of development of the iron ore industry is determined by the prospect of development of metallurgical production and export of raw materials. At present, the mining and metallurgical complex has been reformed. Due to the exacerbation of energy problems and the need for energy conservation, the use of renewable energy in the world has increased in recent years. The use of solar energy is among the leaders. Solar energy is used to produce hot water, heat and electricity. Due to the introduction of solar collectors, significant opportunities for the energy supply of buildings for hot water supply and heating systems have emerged. Solar installations are environmentally friendly, with the help of which you can get energy that is not harmful to the environment.*

***Target setting.*** *The issue of this work is to identify the main aspects of the introduction of solar power plants in the conditions of mining enterprises.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *A number of authors have explored the issues of operation and design of solar power plants. Positive effects from the introduction of the solar panel cleaning system from dust and from the inclination of the solar panel tilt system are substantiated. Previous studies have shown that the energy performance of solar panels when operating in mining companies will be at a sufficiently efficient level, taking into account the natural ventilation flows that will cool them. Meanwhile, the question of the introduction of solar power plants in the conditions of mining enterprises remains unexplored. In previous studies, we have substantiated the positive effect of the introduction of solar power plants in the conditions of mining enterprises, namely modularity, reliability, reducing the negative impact on the environment.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *Taking into account a number of new, previously unexplored factors that in the languages of mining enterprises are floating the energy characteristics of solar power plants, an urgent scientific and practical task is to study the potential of solar energy in the conditions of these enterprises, and especially the operation of solar power plants.*

***The research objective.*** *Therefore, an urgent scientific and practical task is to study the potential of solar energy in the conditions of these enterprises, and the peculiarities of the operation of solar power plants, taking into account the factors that affect their energy performance.*

***The statement of basic materials.*** *Mining enterprises of Ukraine are located in the territory that is favorable for the introduction of solar energy. Using the cleaning system and the tilting system, the generated power was 2000 kW, while using the cleaning system, the generated power increased by 300 kW. That is, one can conclude and say that the use of a system of cleaning and tilting solar panels has a better effect on the operation of a solar power plant.*

***Conclusions.*** *At mining enterprises, it is relevant and possible to introduce solar power plants into the general structure of power systems, taking into account the specifics of their operation. Solar panels, when operated in mining enterprises, must have a cleaning and orientation system in order to increase their efficiency in the distribution networks of these enterprises.*

***Keywords:*** *distributed generation; power supply of enterprises; potential of solar energy sources; mining enterprises.*
*Fig.: 4. Table: 3. References: 9.*

**Сінчук Олег Миколайович** – доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою кафедра автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, Криворізький національний університет (вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна).
**Sinchuk Oleg** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of the Department of Automated Electromechanical Systems in Industry and Transport, Kryvyi Rih National University (11 Vitaliy Matusevich Str., 50027 Kryvyi Rih, Ukraine).
**E-mail:** speet@ukr.net
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-7621-9979
**ReseacherID:** https://www.researchgate.net/profile/Oleg_Sinchuk

**Бойко Сергій Миколайович –** кандидат технічних наук, завідувач відділення авіаційного транспорту, електроенергетики і управління, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).
**Boiko Serhii -** PhD in Technical Sciences, Head of the Air Transport, Power and Control Department, Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs (17/6 Peremohy Str., Kremenchuk, 39605, Ukraine).
**E-mail:** bsn1987@i.ua
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-9778-2202
**Scopus:** ID 56417478200

**Городній Олексій Миколайович -** кандидат технічних наук, старший викладач кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна).
**Gorodny Oleksiy –** PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Industrial Electronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** aleksey.gorodny@gmail.com
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-5303-9564
**Web of Science:** H-1425-2016
**Scopus:** ID 56338229500

**Некрасов Андрій Вікторович –** кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна).
**Nekrasov Andrey –** PhD in Technical Sciences, Kremenchuk National Universyty of Michaylo Jstrogradskiy (17/6, Perchotravneva Str., 39600 Kremenchuk, Ukraine).
**E-mail:** boikosn2017@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-3507-1987

**Онищенко Андрій Олександрович** – аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна).
**Onishchenko Andrey –** PhD Student, Kremenchuk National Universyty of Michaylo Jstrogradskiy (Pershotravneva Str., 20, 39600 Kremenchuk, Ukraine).

**Ножнова Марина Олександрівна –** викладач, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).
**Nozhnova Maryna** – lecturer, Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs (17/6, Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine).
**E-mail:** marina.nozhnova@yahoo.com

Сінчук О., Бойко С., Городній О., Некрасов А., Онищенко А., Ножнова М. Аспекти впровадження сонячних електростанцій в умовах гірничорудних підприємств. *Технічні науки та технології.* 2020. № 1 (19). С. 168-176

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 621.3.07*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-177-190*

*Роман Єршов, Володимир Войтенко*

# ЧАСТОТНО-ІМПУЛЬСНИЙ МОДУЛЯТОР З АДАПТИВНОЮ КОРЕКЦІЄЮ ТРИВАЛОСТІ ІМПУЛЬСУ

***Актуальність теми дослідження.*** *Вирішення ряду таких актуальних проблем імпульсних напівпровідникових перетворювачів енергії (ІНПП) для бортових систем, що входять до складу рухомих платформ і безпілотних літальних апаратів (БПЛА), як підвищення точності стабілізації цільового параметру (кута, швидкості, напруги, струму), а також покращення динаміки систем автоматичного керування, масо-габаритних та теплових характеристик можливо шляхом розробки нових структур ІНПП та алгоритмів керування ними.*

***Постановка проблеми.*** *Зміна періоду та форми резонансної кривої (РК) напруги/струму в квазірезонансних імпульсних перетворювачах (КРІП) в залежності від імпедансу навантаження призводить до неузгодженості сигналу закриття силового транзисторного ключа (СТК) з моментом переходу РК через нульове значення, а отже, – до різкого зниження ККД системи.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Типові реалізації частотно-імпульсних модуляторів (ЧІМ) містять у своєму складі керований напругою генератор та одновібратор, а повністю керовані рішення виконують на основі реверсивних лічильників та керуючого автомату. В якості новітніх ланок ЧІМ для задач керування ІНПП вводяться спостерігачі імпедансу навантаження та модулятори, побудовані на кільцевих зсувних регістрах та лініях затримки. Швидкодія ЧІМ підвищується за рахунок каскадування та використання табличного синтезу сигналу.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Існуючі рішення не корегують тривалість імпульсу керування СТК для забезпечення його комутації при нульових значеннях напруги/струму, що нівелює можливість практичного втілення КРІП з широким діапазоном навантажень.*

***Постановка завдання.*** *Стаття присвячена розробці структури цифрового частотно-імпульсного модулятора з адаптивною корекцією тривалості імпульсу (ЦЧІМ-АКТІ) та метода автоматичного слідкування за РК з метою прогнозування її переходу через нуль.*

***Викладення основного матеріалу.*** *Запропонована схемотехнічна структура та алгоритм функціонування модулятора у складі блоків ЦЧІМ та АКТІ на основі декількох цифрових автоматів, набору лічильників та арифметико-логічних пристроїв. Пара зовнішніх гістерезисних компараторів детектує перехід резонансної кривої через порогові рівні, розміщені симетрично відносно нульового рівня.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Створено новий завершений цифровий блок, який реалізований на основі програмованої логічної інтегрованої схеми (ПЛІС) з використанням мови VHDL. Введення цього блоку до складу стабілізатора напруги ланки постійного струму (ЛПС) на основі КРІП в електроприводі точного позиціювання рухомої платформи з безколекторним двигуном постійного струму (БДПС) дозволяє стабілізувати напругу ЛПС з точністю до 1%. Роздільна здатність за часом ширини імпульсу та паузи не перевищує 5нс.*

***Ключові слова:*** *квазірезонансний імпульсний перетворювач; КРІП; ЧІМ; ПЛІС; FPGA; VHDL; перемикання при нульовій напрузі (ПНН); перемикання при нульовому струмі; ПНС; адаптивне вимірювання.*

*Рис.: 10. Табл.: 1. Бібл.: 20.*

**Актуальність теми дослідження.** Підвищення точності стабілізації напруги, покращення динаміки системи автоматичного керування, масо-габаритних та теплових характеристик ІНПП енергії для бортових систем [1-3], що входять до складу систем стабілізації рухомих платформ (ССРП), відбувається за рахунок розробки нових структур перетворювачів та використання адаптивних алгоритмів керування ними.

**Постановка проблеми.** Період та форма резонансної кривої в квазірезонансних імпульсних перетворювачах (КРІП) змінюється в залежності від імпедансу навантаження. Це призводить до неузгодженості сигналу закриття силового транзисторного ключа (СТК) з моментом переходу резонансної напруги або струму через нульове значення, а отже, – до різкого зниження ККД системи [4-6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [7] розглянуто приклад аналізу усталеного процесу з використанням моделі у просторі станів для системи автоматичного керування (САК) з об'єктом другого порядку, яким виступає двигун постійного струму (ДПС), що стабілізує інверсний маятник. Крім того, показані переваги ЧІМ над ШІМ, обумовлені відсутністю пульсацій «shot noise», а також наведено фундаментальний перелік робіт, присвячених ЧІМ.

Аналогові рішення ЧІМ добре відомі та докладно висвітлені в [8, 9]. Типова змішана (аналогова та цифрова) реалізація ЧІМ базується на використанні ІМС перетворювача «напруга-частота» (генератор, керований напругою, ГКН) [10], який налаштовує тривалість періоду (несучу частоту), та програмованого таймера [11], який виступає формувачем тривалості імпульсу.

© Єршов Р. Д., Войтенко В. П., 2020

Одна з найбільш ранніх цифрових реалізацій ЧІМ з функцією інтегрування описана у [12] і складається з опорного та реверсивного лічильників. Вміст останнього модифікується двома послідовностями імпульсів: інкремент – модульованим сигналом зворотного зв'язку (СЗЗ) та декремент – модульованим сигналом заданого впливу (СЗВ). Таким чином, поточний вміст лічильника є інтегралом помилки регулювання частоти.

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} e(t)\,dt = K \cdot \left( f_{C3З}(t) - f_{C3B}(t) \right), \tag{1}$$

де: $f_{C3З}(t)$ − СЗЗ, представлений в частотно-імпульсному домені; $f_{C3B}(t)$ − СЗВ, представлений в частотно-імпульсному домені; $e(t)$ − помилка регулювання; $[t_i;\ t_{i+1}]$ − період вимірювання лічильників до переповнення одного з них; $K$ − коефіцієнт пропорційності.

Лічильник опорного значення працює на фіксованій частоті і починає роботу з деякого мінімального значення. Накопичені значення в обох лічильниках постійно порівнюються між собою за допомогою цифрового компаратора. Щойно компаратор детектує рівність вмісту реверсивного лічильника та лічильника опорного значення, скидаються обидва лічильники та генерується одиничний вихідний імпульс.

В [13] у типовому ІНПП, що знижує напругу, замість класичного ШІМ застосовується ЧІМ, який базується на однобітному сігма-дельта модуляторі. Реалізація на ПЛІС включає в себе два зовнішніх АЦП неперервного перетворення, які вимірюють напруги на вході та виході сігма-дельта модулятора, ПІД-регулятор, вузол м'якого старту та каскади захисту від перенапруги та короткого замикання. Часові діаграми показують, що запропонована замкнена система має швидкодію, зіставну з аналоговими САК.

Стратегічні переваги в цифровому підході до реалізації керування в силовій електроніці фундаментально доведені у [14], де наведені структурні рішення контролерів ІНПП та коректора коефіцієнту потужності (ККП) на основі ШІМ. У [15] детально описано різні типи ШІМ.

Найпростіший цифровий ШІМ (на основі лічильника, компаратора та детектора нуля) був запропонований для заміни аналогових рішень, і дозволяє отримувати змінну шпаруватість при постійній несучій частоті. Пристрій має відмінну лінійність, проте знижену швидкодію у разі збільшення розрядності та підвищене споживання струму під час поширення сигналів переносу в лічильнику. Альтернативою ШІМ на основі лічильника є схема на основі лінії затримки, яка має порівняно високу швидкодію та низький струм споживання. Недоліки – нелінійність перетворення та великі апаратні витрати, зумовлені застосовуванням масиву мультиплексорів. Цей масив, у свою чергу, може бути реалізований в розімкненій або замкненій (у вигляді кільцевого осцилятора) формі та може виконувати операції у двійкових кодах та кодах Джонсона.

Усі ЦШІМ-рішення мають широкі можливості для підвищення швидкодії шляхом каскадування та/або сегментування. Новітня архітектура ЦШІМ-ЦЧІМ, запропонована у [18], заснована на застосуванні таблиць відповідності (Lookup Table), значення в яких наперед обчислені та занесені до блочної пам'яті ПЛІС, а проєкт реалізований МОА Verilog. Запропонована архітектура дозволяє досягти вищої роздільної здатності, і відповідно, – більш точного регулювання вихідного сигналу. Запропоноване рішення зберігає *4096* різних бітових шаблонів для отримання більш точних ШІМ та ЧІМ сигналів у випадку 6-розрядного керуючого входу та забезпечує операційну частоту до *306 МГц*.

Комбінована стратегія керування для ІНПП із жорсткою комутацією, яка має назву ЦШІМ/ЦЧІМ [16-18] заснована на застосуванні ШІМ при високих вихідних навантаженнях та ЧІМ при малих, що дозволяє оптимізувати ефективність регулювання. У відомих рішеннях [16–18] обидва модулятори побудовані на кільцевому осциляторі чи лінії затримки, що дозволяє досягти несучих частот у десятки *МГц*, а вибір модуляції

заснований на спостерігачі опору навантаження, який, у свою чергу, керує мультиплексором вибору виходу одного з модуляторів.

В [19] також досліджено ЧІМ з адаптивною тривалістю імпульсу для застосування в типовому синхронному ІНПП, що понижує напругу, оскільки при низьких навантаженнях ефективність ШІМ-керування низька, що обумовлено великим співвідношенням втрат на ключі до потужності, яка комутується цим ключем. Але зі зниженням частоти регулювання одночасно зростають і вихідні пульсації регульованої величини. Цей недолік компенсується новітньою схемою корекції тривалості імпульсу, реалізованою у базисі КМОП, що дає зростання точності до рівня, прийнятного для портативних акумуляторних пристроїв з режимом глибокого енергозберігання. Проблематика ефективності перетворювача на низьких навантаженнях також вирішена повністю цифровим ЧІМ у [20] в поєднанні з цифровою амплітудно-імпульсною модуляцією (ЦАІМ) для досягнення одночасно як високої швидкодії, так і максимальної амплітуди керуючого впливу. Запропонована структура контролера містить 4 основних блоки: дві програмовані лінії затримки, кільцевий осцилятор та детектор закінчення «гонки». Це дозволяє оперувати на частотах *20…500 кГц* у режимі ЧІМ при зміні тривалості імпульсу в межах *10...400 нс* при ефективності вищій, ніж для стандартних ШІМ та ЧІМ. Обидва контролери [19, 20] втілені у вигляді замовних КМОП ІМС.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Жодне з розглянутих рішень не корегує тривалість імпульсу керування СТК для забезпечення його комутації при нульових значеннях напруги/струму, що нівелює можливість практичного втілення КРІП із широким діапазоном навантажень (у випадку електропривода ССРП).

**Постановка завдання.** Розробити адаптивний метод автоматичного слідкування за резонансною кривою з метою прогнозування її переходу через нуль, промоделювати роботу у складі ІНПП-стабілізатора, що підвищує напругу, на основі КРІП у широкому діапазоні навантажень та реалізувати завершений цифровий блок на основі програмованих логічних інтегрованих схем (ПЛІС).

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 зображено структуру розробленого модулятора, який складається з двох основних блоків: цифрового частотно-імпульсного модулятора (ЦЧІМ) та адаптивного коректора тривалості імпульсу (АКТІ).

ЦЧІМ складається з лічильника тривалості імпульсу (ЛТІ), компаратора тривалості імпульсу (КТІ), регістрів мінімальної тривалості імпульсу (РМТІ) та заданої тривалості імпульсу (РЗТІ), лічильника тривалості паузи (ЛТП), компаратора тривалості паузи (КТП), регістрів мінімальної тривалості паузи (РМТП) та заданої тривалості паузи (РЗТП). Узгоджену роботу вищеописаних блоків забезпечує цифровий автомат формування ЧІМ (ЦА-ЦЧІМ).

АКТІ складається з чотирьох двійкових лічильників: лічильника затримки розповсюдження сигналу керування (ЛЗРСК), лічильника тривалості знаходження над верхнім пороговим рівнем (ЛНВПР), лічильника тривалості знаходження під нижнім пороговим рівнем (ЛППНПР), та лічильника тривалості знаходження між пороговими рівнями (ЛМПР). На основі значень в лічильниках арифметичний блок розрахунку тривалості керуючого імпульсу (АБ-РТКІ) здійснює розрахунок тривалості керуючого імпульсу, після чого зберігає його в регістрі розрахованої тривалості керуючого імпульсу (РРТКІ).

Задати значення тривалості керуючого імпульсу можна вручну, записавши його в регістр фіксованої тривалості керуючого імпульсу (РФТКІ). Вибір значень з РРКТІ або РФКТІ, яке буде записане на початку періоду в РПТІ, здійснюється через мультиплексор вибору тривалості керуючого імпульсу (МП-ВТКІ), який керується бітами в регістрі керування АКТІ (РК-АКТІ). Стан блока АКТІ можна визначити через сукупне зна-

чення прапорців в регістрі стану АКТІ (РС-АКТІ). Злагоджену роботу вищеописаних блоків забезпечує цифровий автомат АКТІ (ЦА-АКТІ).

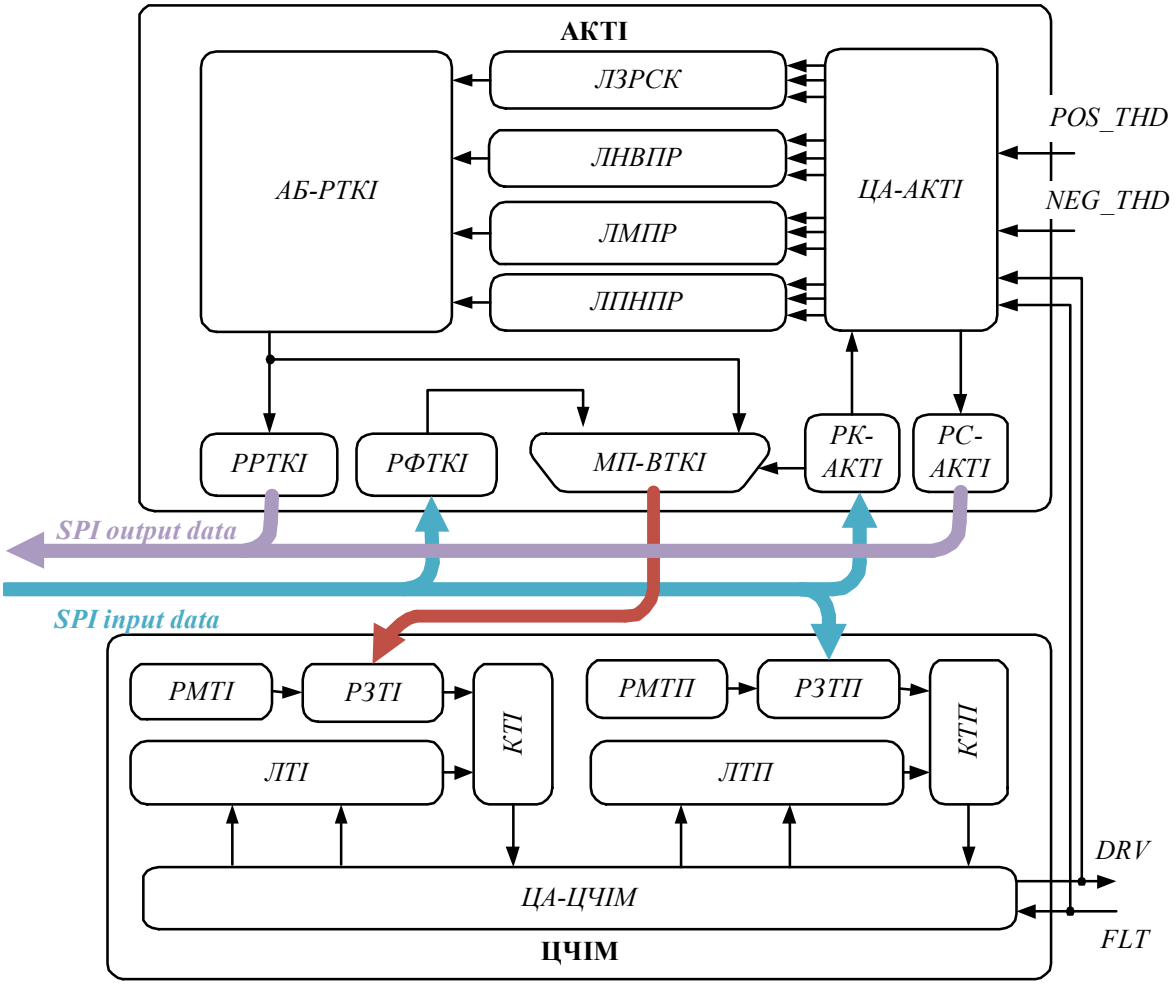



*Рис. 1. Структура ЦЧІМ із додатковим блоком АКТІ для автоматичного знаходження КРІП у режимах ПНН та/або ПНС*

Сигнали системної синхронізації та системного скидання приєднані до всіх блоків схеми, тому на рис. 1 умовно не показані.

*Опис алгоритму спостереження за резонансною кривою.* Алгоритм спостереження за резонансною кривою $i_r(t)$ з виділенням спеціальних інтервалів показаний на рис. 2. Перший керуючий імпульс $U_{SW}(i)=\tau_{appr}$ переривається (виконується закривання СТК) за межами режимів ПНН та/або ПНС тільки після того, як компаратори зафіксують повторний вихід резонансної кривої за межі порогових рівнів (на графіку маркування «зірочкою»), тобто пізніше на час затримки розповсюдження сигналу. Але, одночасно з цим, попередньо виміряні тривалості фаз резонансу, отримані на основі показань компараторів (їх виходи позначені на графіках рис. 2 у часі як *POS_THD(t)* та *NEG_THD(t)*), дозволяють арифметичному блоку розрахувати скореговану тривалість імпульсу $U_{SW}(i+1)=\tau_{CORR}$ і виконати наступне закриття з упередженням точно при переході резонансної кривої через нуль.

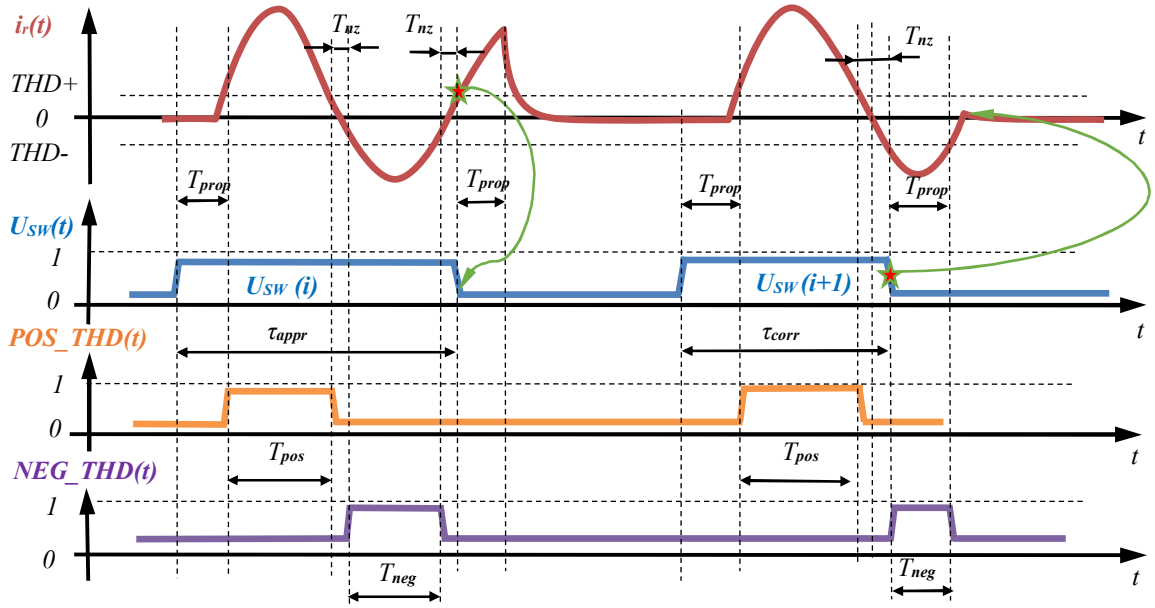



*Рис. 2. Інтервали спостереження за резонансною кривою та часові діаграми формування скорегованої тривалості імпульсу*

Сукупне значення виходів аналогових компараторів порогових рівнів (*POS_THD* та *NEG_THD*) утворюють вектор *'PN'*, який є вхідним сигналом для ЦА-АКТІ, і дозволяє однозначно визначити поведінку резонансної кривої:

1) *PN = '00'* – між порогами спрацьовування компараторів (біля нуля);
2) *PN = '01'* – під нижнім порогом спрацьовування;
3) *PN = '10'* – над верхнім порогом спрацьовування;
4) *PN = '11'* – помилка налаштування порогових значень.

Використовуючи припущення, що затримки поширення сигналу від блока ЦЧІМ до початку резонансу, обумовлені послідовною зв'язкою «драйвер ключа – силовий ключ», є однаковими як при відкриванні ключа так і при його закриванні, доволі просто скласти залежності, що обчислюють тривалість скоректованого імпульсу $\tau_{CORR}$ (рис. 2).

$$\tau_{CORR}^{HW} = T_{POS} + T_{NZ} - T_{PROP}, \quad (2)$$

$$\tau_{CORR}^{FW} = T_{POS} + T_{NEG} + 2 \times T_{NZ} - T_{PROP}, \quad (3)$$

де $\tau_{CORR}^{HW}$ – тривалість скоректованого імпульсу в напівперіодному (half-wave) режимі; $\tau_{CORR}^{FW}$ – тривалість скоректованого імпульсу в повноперіодному (full-wave) режимі; $T_{POS}$ – тривалість знаходження резонансної кривої вище позитивного порогового рівня (*PN = '10'*); $T_{NZ}$ – тривалість знаходження між пороговими рівнями (*PN = '00'*); $T_{NEG}$ – тривалість знаходження нижче негативного порогового рівня (*PN = '01'*); $T_{PROP}$ – тривалість часу розповсюдження вихідного сигналу *DRV* ЦЧІМ до перетину резонансною кривою позитивного порогового рівня.

Наприкінці кожного спостереження накопичені в лічильниках значення передаються на АБ-РТКІ, який апаратно реалізує формули (2) або (3) залежно від встановленого режиму спостереження. Автоматний граф спостерігача за резонансною кривою показаний на рис. 3. Переходи в помилкові стани *'ERROR_FAULT_STATE'* та *'FORCE_CLOSED'* умовно не показані, оскільки детально умови виникнення цих переходів описані нижче.

*'WAIT_FOR_ START_PULSE'* – початковий стан, в який ЦА-АКТІ переходить після виконання розрахунків на основі попереднього циклу спостереження, або внаслідок програмного чи апаратного скидання. Перехід з цього стану та початок нового циклу вимірювань здійснюється за виникненням активного рівня вхідного сигналу DRV;

*'CNT_PROP_DELAY'* – підрахунок за допомогою ЛЗРСК тривалості затримки розповсюдження сигналу (після активації сигналу DRV і до перемикання компаратора позитивного порогового рівня *PN = '00' –> PN = '10'*);

*'CNT_POS_THD_DUR'* – підрахунок за допомогою ЛНВПР тривалості знаходження резонансної кривої над верхнім пороговим рівнем. Перехід у наступний стан відбувається при зміні вхідного сигналу *PN = '10' –> PN = '00'*;

*'CNT_NEAR_ZERO_DUR_PN'* – підрахунок за допомогою ЛМПР тривалості знаходження резонансної кривої між пороговими рівнями спрацьовування компараторів. Саме в цьому стані відбувається розгалуження переходів ЦА-АКТІ залежно від обраного через РК-АКТІ режиму спостереження;

*'CNT_NEG_THD_DUR'* – підрахунок за допомогою ЛПНПР тривалості знаходження резонансної кривої під нижнім пороговим рівнем, перехід у наступний стан відбувається при зміні вхідного сигналу *PN = '01' –> PN = '00'*. Цей стан активується лише у full-wave режимі спостереження;

*'CNT_NEAR_ZERO_DUR_NP'* – підрахунок за допомогою ЛМПР тривалості повторного знаходження резонансної кривої між пороговими рівнями спрацьовування компараторів. Цей стан активується лише у full-wave режимі спостереження;

*'CALC_OCRR_PULSE_DUR'* – стан, протягом якого виконується проходження накопичених у лічильниках значень через АБ-РТКІ та з метою обчислення актуального значення тривалості резонансу з його подальшим збереженням у РРТКІ. Перехід з цього стану в початковий стан *'WAIT_FOR_START_PULSE'* виконується через наперед задану кількість тактів, яка зумовлена затримкою на АБ-РТКІ.

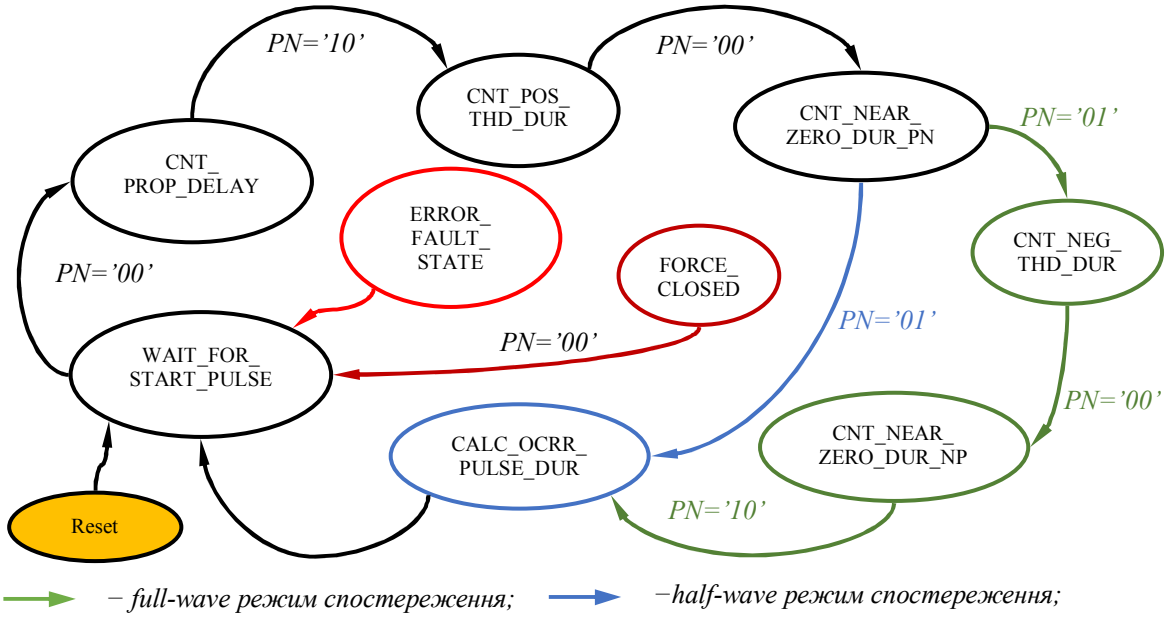



*Рис. 3. Автоматний граф спостерігача переходу через нуль резонансної кривої за пороговими значеннями (деякі переходи не представлені для кращої візуалізації основних гілок)*

*Опис принципів роботи блока ЦЧІМ.* В основі роботи ЦЧІМ лежить взаємодія двох лічильників: ЛТП підраховує кількість тактових імпульсів на інтервалі тривалості паузи між імпульсами (або періоді їх повторення), а ЛТІ виконує підрахунок тривалості імпульсу (тобто, виступає як формувач імпульсу). Існує дві можливі моделі взаємодії між ЛТП та ЛТІ у складі ЦЧІМ:

а) ЛТП працює весь період, обидва лічильники запускаються на початку відліку періоду, що збігається з переднім фронтом сигналу керування ключем (DRV). Коли ЛТІ досягає опорного значення в РЗТІ, генерується зріз DRV, але ЛТП продовжує працювати, поки не досягне значення в РЗТП, що перезапустить рахунок.

б) Сигнал збігу вмісту ЛТП з РЗТП, який формується на виході КТП, зупиняє рахунок ЛТП і одночасно виступає сигналом запуску ЛТІ. Навпаки, сигнал збігу вмісту ЛТІ з РЗТІ, який формується на виході КТІ, зупиняє рахунок ЛТІ і виступає сигналом запуску ЛТП. Таким чином, два лічильники працюють почергово, запускаючи та зупиняючи один одного, подібно до роботи шахового годинника.

Поточне значення в ЛТІ та ЛТП (після закінчення перехідного процесу розповсюдження переносу) безпосередньо порівнюється за допомогою КТІ та КТП зі значеннями у РЗТІ та РЗТП, відповідно. Генеруються сигнали рівності, які є вхідними для ЦА-ЦЧІМ, побудованого на основі RS-тригерів. Сигнал аварійного стану (FLT) припиняє роботу ЦЧІМ. DRV встановлений в *‘1’* протягом роботи ЛТІ та за умови неактивного (нульового) рівня FLT. В усіх інших випадках DRV скидається в *‘0’*. Вхідними сигналами для блока ЦЧІМ слугують значення в РЗТІ, РЗТП (завантаження значень відбувається синхронно за сигналом завантаження тривалості (СЗТ)), та рівень FLT. Значення для РМТІ та РМТП задаються константами на етапі синтезу блоку. Єдиним виходом ЦЧІМ є DRV.

Для моделювання роботи ЦЧІМ у середовищі **MATLAB/Simulink** розроблена модель, наведена на рис. 4.

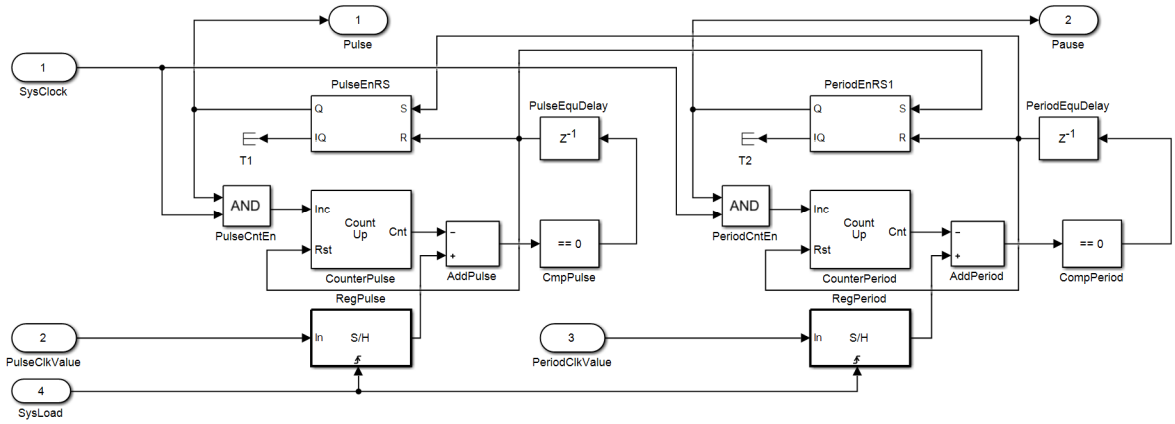



*Рис. 4. Модель ЦЧІМ у середовищі MATLAB/Simulink*

*Опис принципів роботи блока АКТІ.* Блок АКТІ складається з вищеописаного набору з чотирьох лічильників, запуск та зупинка рахунку яких централізовано виконується за допомогою ЦА-АКТІ, що спостерігає за резонансною кривою та детектує її переходи через нуль. Кожний із лічильників виконує підрахунок тривалості своєї ділянки резонансної кривої, яка розбивається на інтервали за допомогою порогових рівнів, заданих сукупним значенням компараторів. Арифметичний блок АБ-РТКІ, в залежності від режиму спостереження резонансу, виконує розрахунок скорегованої тривалості імпульсу у відповідності до (2) або (3), спираючись на поточний вміст лічильників. Вхідними сигналами для ЦА-АКТІ є виходи компараторів, об’єднані у вектор *‘PN’*, а також сигнали блока ЦЧІМ − DRV та FLT.

ЦЧІМ-АКТІ все ж потребує додаткових зовнішніх компонентів, які будуть вимірювати амплітуду резонансної кривої та вичерпно сповіщати про її поведінку. Для цих потреб доцільно використати два операційні підсилювачі (ОП), які працюють в режимі аналогових компараторів (з неглибоким гістерезисом та фільтрацією нижніх частот), та які налаштовані на симетричні відносно нуля резонансної кривої порогові рівні спрацьовування (рис. 5). Це, у свою чергу, потребує додаткового *двополярного малопотужного вторинного джерела живлення* (ВДЖ) компараторів.

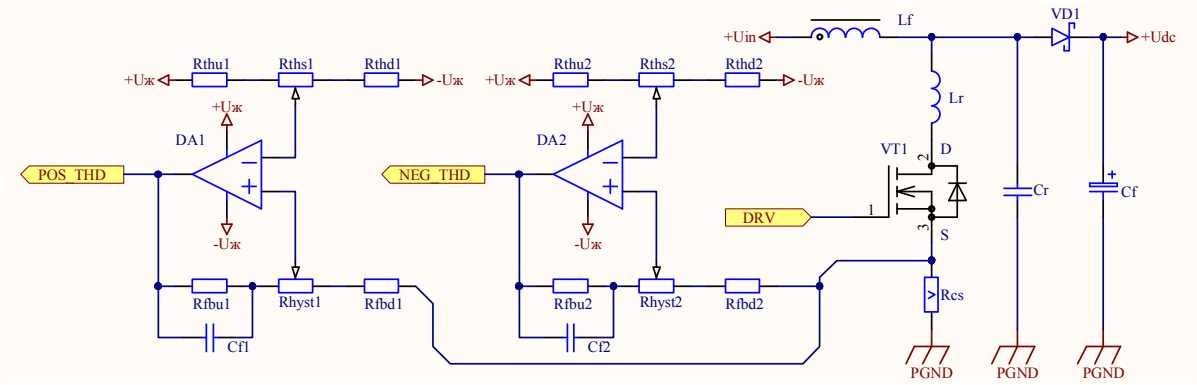



*Рис. 5. Схема включення компараторів порогових рівнів для спостереження за резонансною кривою струму КРІП-ПНС, що використовується як стабілізатор ланки постійного струму САК положенням БДПС*

Для моделювання роботи АКТІ у середовищі **MATLAB/Simulink** розроблена модель, наведена на рис. 6.

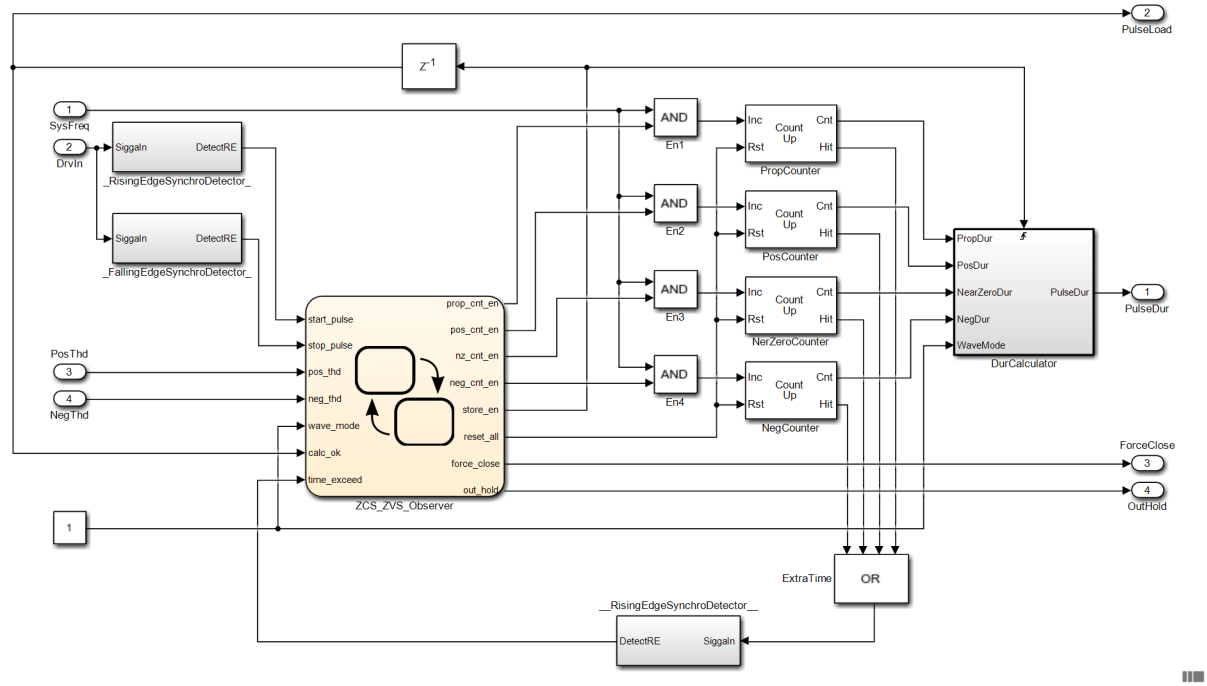



*Рис. 6. Модель АКТІ у середовищі MATLAB/Simulink*

*Особливості функціонування ЦЧІМ-АКТІ.* Залежно від потреб конкретної топології КРІП та структури його САК, запропонований ЦЧІМ може детектувати один з двох режимів: напівперіодний або повноперіодний резонанс. Залежно від режиму керування ЦЧІМ може працювати з введеною вручну (апріорною) та поточно вимірюваною (апостеріорною) тривалістю імпульсу. Обидва згадані вище налаштування можна встановити в РК-АКТІ через комунікаційний інтерфейс (в цьому випадку − SPI). Через цей інтер-

фейс також кількісно задаються тривалість як імпульсу, так і паузи, виражені цілим числом імпульсів системного тактового сигналу.

Обмін через інтерфейс SPI виконаний в повнодуплексному режимі, що дозволяє зчитувати РС-АКТІ з прапорцями помилок, та РРТКІ з розрахованою (на основі безпосередніх вимірювань) тривалістю керуючого імпульсу, з якого можна легко встановити тривалість резонансного періоду. Це, у свою чергу, дозволяє побудувати спостерігач імпедансу навантаження, розміщений в зовнішньому контурі регулювання, реалізованому на МК, софт-процесорі чи на жорстко програмованому блоці ПЛІС.

*Детектування помилкових станів та реакція на них.* Важливою складовою повноцінної цифрової системи є механізм детектування та виправлення (якщо це можливо) операційних помилок. Сукупність можливих помилок описується набором прапорців, які розміщуються в РС-АКТІ.

**Перша категорія помилок** – це аварійні ситуації, пов'язані зі спрацьовуванням різного роду захистів, наприклад, при перевищенні максимально допустимого резонансного струму. Ці помилки детектуються окремими швидкодіючими аналоговими каскадами (компараторами, підключеними до резистивного шунта чи трансформатора струму), і призводять до невідкладного закриття СТК з одночасним встановленням прапорця помилки *'HW_FAULT'* в РС-АКТІ, після чого ЦА-АКТІ переходить в стан *'ERROR_FAULT_STATE'*. Апаратне чи програмне (через РК-АКТІ) скидання ЦА-АКТІ у початковий стан призводить до перезапуску роботи ЦЧІМ-АКТІ.

**Друга категорія помилок** пов'язана з неправильним налаштуванням порогових рівнів спрацьовування компараторів. Ці помилки можуть детектуватися при прийнятті АКТІ хибного значення вхідного сигналу (порогові рівні *PN = '11'*), що також призводить до форсованого закриття СТК з одночасним встановленням прапорця *'WRONG_THD'* в РС-АКТІ, після чого ЦА-АКТІ переходить у стан *'ERROR_FAULT_STATE'*. Перезапуск ЦА-АКТІ відбувається шляхом апаратного чи програмного скидання (і тільки після вірного налаштування порогових рівнів компараторів).

**Третя категорія помилок** виникає, коли один з лічильників АКТІ протягом спостереження за резонансною кривою переповнюється до того, як ЦА зупинить його рахунок та перейде до іншого стану. Це означатиме, що коливання резонансної кривої вийшли за допустимі межі частот, або сходяться не до нульового рівня (мають наростаючу постійну складову). Це призведе до лінійного наростання струму чи напруги, тому необхідно форсовано закрити СТК після апріорно заданого проміжку часу одночасно з встановленням прапорця помилки *'CURVE_BORDER'* в РС-АКТІ та переходу ЦА-АКТІ в стан *'FORCE_CLOSED'*. Перезапуск ЦА-АКТІ відбувається автоматично одразу після входження значення резонансної кривої в межі, близькі до нуля (сукупне значення порогових рівнів *PN = '00'*).

*Результати моделювання роботи ЦЧІМ-АКТІ.* В середовищі **MATLAB/Simulink** проведено ряд експериментів з метою перевірки дієвості запропонованих рішень до початку процесу втілення. Для цього модель ЦЧІМ-АКТІ був включений в контур САК стабілізації напруги ланки постійного струму (ЛПС) інвертора БДПС.

Вхідні впливи підбиралися такими, щоб змінювати як період резонансної кривої струму (шляхом ступінчатої зміни резонансної ємності, рис. 7), так і її постійної складової (шляхом ступінчатої зміни опору навантаження, рис. 8). На рис. 7 та рис. 8 зображено: сигнал керування на затворі СТК (а); резонансний струм через СТК (б); розраховану на основі вимірювань тривалість керуючого імпульсу разом з упередженням, виражену в кількості тактів сигналу системної синхронізації (в).

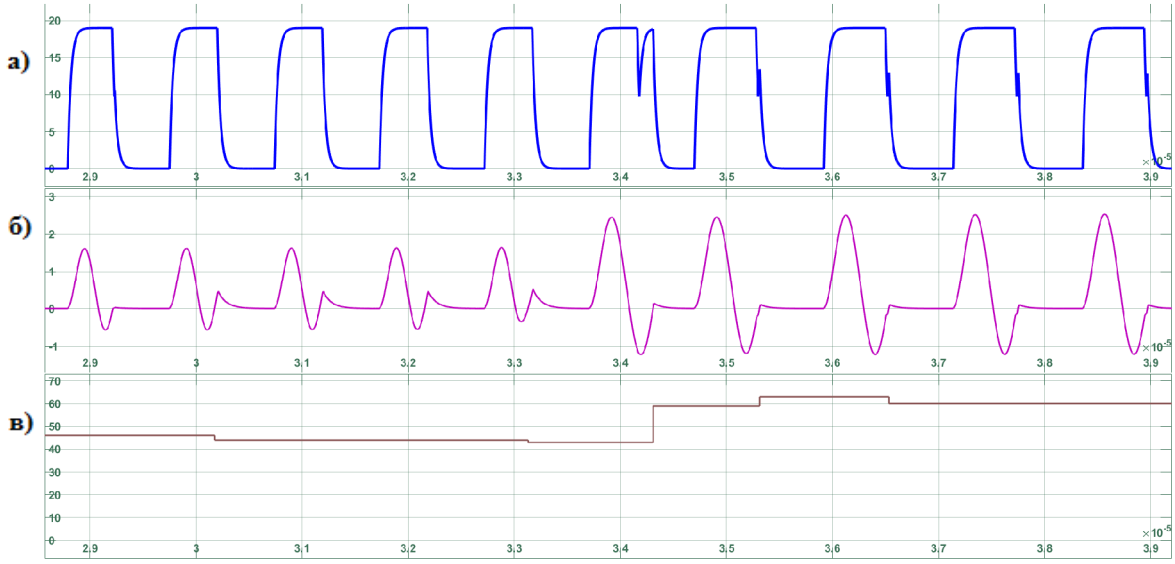



*Рис. 7. Корекція тривалості керуючого імпульсу ЦЧІМ-АКТІ при ступінчастому збільшенні резонансної ємності в 2 рази*

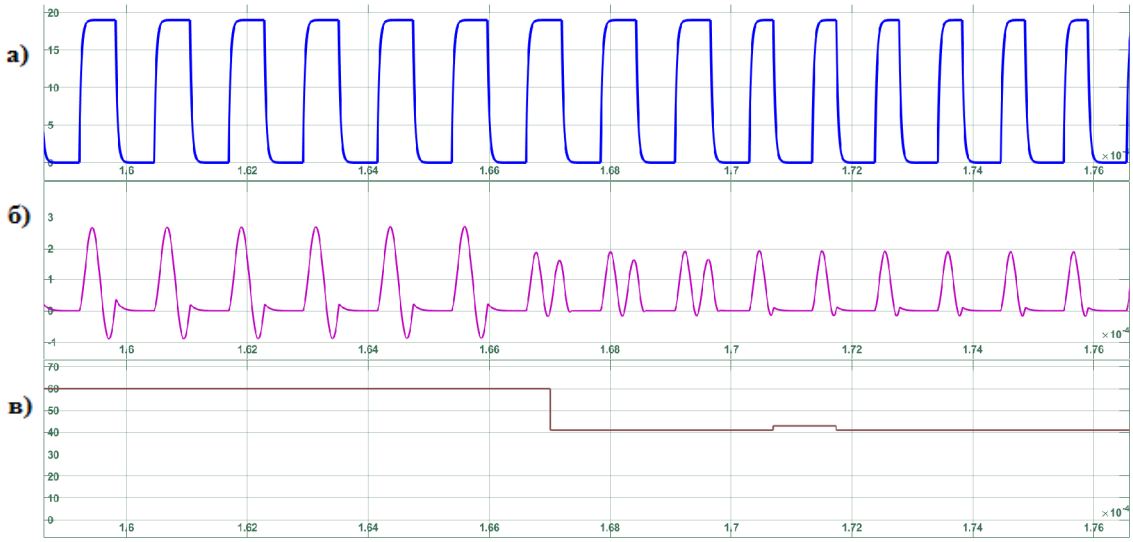



*Рис. 8. Корекція тривалості керуючого імпульсу ЦЧІМ-АКТІ при ступінчастому зменшенні опору навантаження в 4 рази*

*Результати синтезу структури ЦЧІМ-АКТІ на ПЛІС засобами мови VHDL.* Часове моделювання розроблених VHDL-сутностей виконувалась в середовищі **Altera® Quartus® II** для мікросхеми ПЛІС сімейства **Cyclone®-III**. В якості системного синхронізуючого сигналу було взято сигнал з виходу вузла ФАПЧ частотою *200 MHz*. Порівняльна оцінка ресурсів кристалу ПЛІС, які займає ЦЧІМ, залежно від обраної розрядності лічильників, наведена в *таблиці*.

Таблиця

*Ресурси мікросхеми ПЛІС моделі **Altera EP3C5E144A7** (5 136 LEs), зайняті компонентами ЦЧІМ-АКТІ залежно від розрядності лічильників*

| **Назва параметра** | **Задане значення на етапі синтезу** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Розрядність ЛТІ, біт* | 6 | | | 8 | | | 12 | | |
| *Розрядність ЛТП, біт* | 12 | | | 16 | | | 20 | | |
| **Складові модулятора** | **Тип примітиву ПЛІС** | | | | | | | | |
| | *LE* | *CF* | *RG* | *LE* | *CF* | *RG* | *LE* | *CF* | *RG* |
| **Блок ЦЧІМ** | 74 | 54 | 63 | 98 | 67 | 81 | 122 | 84 | 105 |
| **Блок АКТІ** | 241 | 241 | 107 | 314 | 314 | 139 | 385 | 385 | 171 |

Результати моделювання для блока ЦЧІМ, модель якого наведена на рис. 4, показані на рис. 9. Як можна побачити з діаграм, поточні значення тривалості імпульсу та тривалості паузи (задані в кількості імпульсів сигналу системної синхронізації *'sys_clk'*) завантажуються в модулятор за фронтом сигналу *'load'*. Нові значення враховуються модулятором на наступному періоді роботи завдяки однорівневій буферизації введених даних. Сигнали узгодження керування між лічильниками імпульсу та паузи *'pulse_start'* та *'pulse_stop'*, відповідно, оснащені формувачем імпульсу та синхронізатором, що забезпечує проміжок часу, достатній для детектування протилежною стороною.

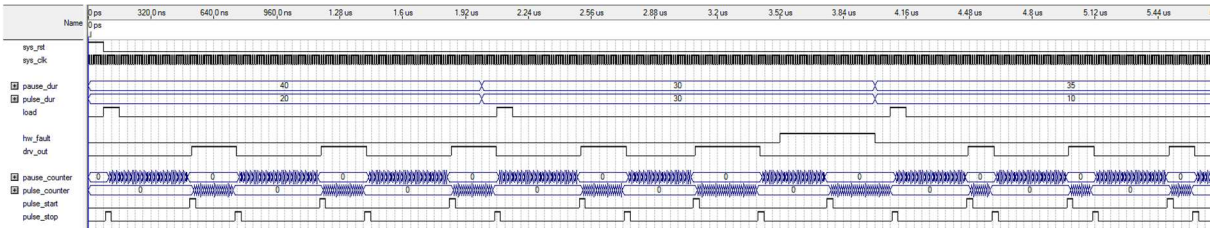



*Рис. 9. Часові діаграми роботи ЦЧІМ із різними завантаженими значеннями тривалості імпульсу й паузи та при активації сигналу 'HW_FAULT'*

Результати моделювання для блока АКТІ, автоматний граф якого наведений на рис. 3, показані на рис. 10. Як можна побачити з діаграм, АКТІ випробувано в обох режимах спостереження за резонансною кривою, перемикання між якими відбувається за сигналом *'period_mode'* в РК-АКТІ. Сигнали з виходів компараторів представлені у логічних рівнях. Апостеріорно виміряне значення тривалості імпульсу доступне через такт після вдалого завершення спостереження та зберігається в регістрі в незмінному стані до наступного вдало завершеного спостереження.

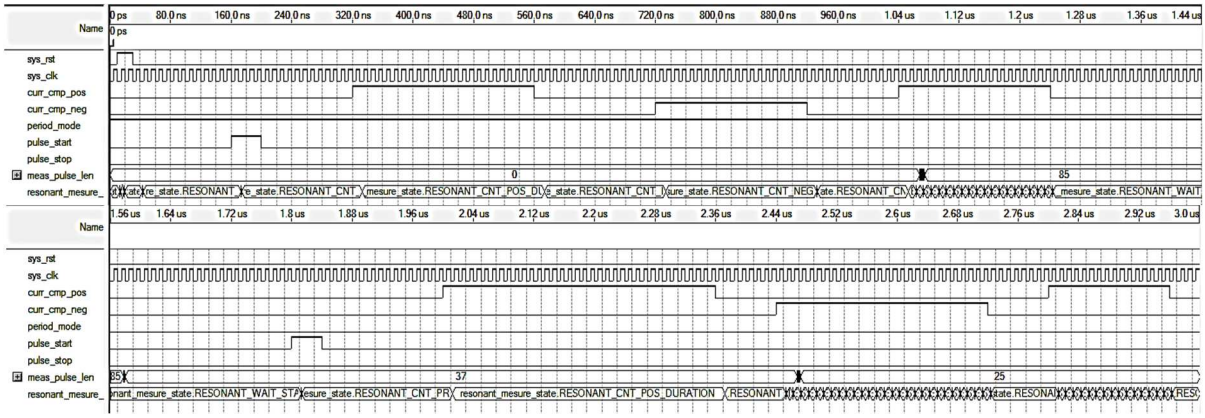



*Рис. 10. Часові діаграми АКТІ з ЦА детектування переходу через нуль за різних режимів резонансу*

**Висновки відповідно до статті.** Розроблена нова архітектура ЦЧІМ задовольняє потреби керування КРІП при широкому діапазоні навантажень та автоматично корегує тривалість керуючого імпульсу шляхом включення спеціального розробленого блоку АКТІ. При цьому:

1. Для використання у складі САК стабілізатора напруги ЛПС електропривода ССРП розроблено блоки ЦЧІМ та АКТІ, які дозволяють працювати в режимах як напівперіодного, так і повноперіодного резонансу та мають функціонально повний механізм детектування та класифікації аварійних станів.

2. Блок АКТІ утримує комутаційні процеси в режимах ПНН або ПНС в залежності від використаної схеми вимірювання СЗЗ та реагує на раптові зміни частоти резонансного контуру (як в межах одиниць відсотків, так і в декілька разів).

3. Результати моделювання показали, що розроблений ЦЧІМ-АКТІ дозволяє отримувати роздільну здатність як за тривалістю імпульсу, так і за тривалістю паузи між імпульсами в межах *5 нс*, що дає точність регулювання КРІП *1 %* при системній тактовій частоті ПЛІС у *200 МГц*.

4. Використання МОА VHDL для розробки блоків ЦЧІМ та АКТІ дозволяє на етапі синтезу автоматично розраховувати та налаштовувати розрядність лічильників, а також визначати поведінку ЦА через описовий розділ **generic**.

Результати розробки підтверджені моделюванням та експериментом з цифровою частиною. Створений блок виступає в якості контролера стабілізатора напруги ЛПС електропривода ССРП. Подальше вдосконалення має стосуватися введення у схему з ЦЧІМ-АКТІ блоку лінійного передбачення тривалості імпульсу (ЛПТІ) на основі аналізу поведінки заданої кількості попередньо виміряних імпульсів.

**Список використаних джерел**

1. Yershov R. FPGA-based Pulse-Frequency Modulator with Adaptive Zero-Crossing Detection for Quasi-Resonant Pulsed Converters. *Proc (IEEE) 38th International Scientific Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO'2018)*. 2018. P. 721–726.

2. Revko A., Yershov R. Control Rapidity Optimization Technique of DC-Motor Driven by Quasi-Resonant Converter Using Pontryagin's Maximum Principle. *Proc. (IEEE) 38th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO'2018)*. P. 705-710.

3. Gorodny A., Dymerets A. Transistor Switches Quasi-Control in Quasi-Resonant Pulse Converters. *Proc. (IEEE) 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO'2019)*. P. 789–792.

4. Voytenko V., Stepenko S., Velihorskyi O., Chakirov R., Roberts D., Vagapov Y. Digital control of a zero-current switching quasi-resonant boost converter. *Proc. (IEEE) Internet Technologies and Applications (ITA) conf.* 2015. P. 365–369.

5. Voytenko V., Stepenko S. Simulation peculiarities of high-frequency zero-current switching quasi-resonant boost converter. *Proc. (IEEE) Electronics and Nanotechnology (ELNANO) 35th International conf.* 2015. P. 486–491.

6. Denisov Y., Stepenko S., Gorodny A., Kravchenko A. Input current parameters analysis for PFC based on quasi-resonant and conventional boost converters. *Proc. (IEEE) Electronics and Nanotechnology (ELNANO) IEEE 34th International conf.* 2014. P. 393–397.

7. Friedland B. On design of observer-based pulse-frequency-modulated feedback control systems. *Proc. IECON 2010-36th Annual Conf. on (IEEE) Industrial Electronics Society. 2010*. P. 187–192.

8. Ridley R. B., Lee F. C. Multi-loop control for quasi-resonant converters. *United States patent US 4 866 367*, 1989.

9. Murakami Y., Sato T., Nishijima K. PFM controller with phase lead characteristics using hysteretic comparator for LLC converter. *Proc. (IEEE) Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 3rd conf.* 2016. P. 13–18.

10. Single and Multichannel, Synchronous Voltage-to-Frequency Converters AD7741\AD7742: Datasheet. Analog Devices Inc., 1999.

11. IttyBitty RC Timer/Oscillator MIC1555/57 (DS20005730A): Datasheet. Microchip Technology Inc., 2017.

12. Bombi F., Ciscato D. A modified integral pulse frequency modulator in control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control.* 1967. Vol. 12 (6). P. 784–785.

13. Capponi G., Livreri P., Di Blasi G.M., Marino F. Architecture of a digital PFM controller for IC implementation. Proc. *Computers in Power Electronics (IEEE) Workshop Proceedings*. 2004. P. 75–79.

14. Maksimovic D., Zane R., Erickson R. Impact of digital control in power electronics. *Proc. (IEEE) Int. Symp. Power Semicond. Devices ICs.* 2004. P. 13–22.

15. Syed A., Ahmed E., Maksimovic D., Alarcon E. Digital pulse-width modulator architectures. *Proc. Power Electronics Specialists Conference (PESC'04) IEEE 35th Annual.* 2004. Vol. 6. P. 4689–4695.

16. Wang K., Rahman N., Lukic Z., Prodic A. All-digital DPWM/DPFM controller for low-power DC-DC converters. *Proc. (IEEE) Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'06) Twenty-First Annual.* 2006. P. 719–723.

17. Agnihotri P., Kaabouch N., Salehfar H., Hu W.C. FPGA-based combined PWM-PFM technique to control DC-DC converters. *Proc. North American (IEEE) Power Symposium (NAPS)*. 2010. P. 1–6.

18. Radhika V., Baskaran K. FPGA-based DPWM/DPFM architecture for digitally controlled DC-DC converters. *Proc. Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON'2016) IEEE Uttar Pradesh Section International Conf.* 2016. P. 78–82.

19. Sahu B., Rincon-Mora G.A. An accurate, low-voltage, CMOS switching power supply with adaptive on-time pulse-frequency modulation (PFM) control. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2007. Vol. 54(2). P. 312–321.

20. Rahman N., Wang K., Prodic A. Digital pulse-frequency/pulse-amplitude modulator for improving efficiency of SMPS operating under light loads. *Proc. Computers in Power Electronics (COMPEL'06) IEEE Workshops on*. 2006. P. 149–153.

## References

1. Yershov, R. (2018). FPGA-based Pulse-Frequency Modulator with Adaptive Zero-Crossing Detection for Quasi-Resonant Pulsed Converters. *Proc (IEEE) 38th International Scientific Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO'2018)* (pp. 721–726).

2. Revko, A. Yershov, R. (2018). Control Rapidity Optimization Technique of DC-Motor Driven by Quasi-Resonant Converter Using Pontryagin's Maximum Principle. *Proc. (IEEE) 38th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO'2018)* (pp. 705–710).

3. Gorodny, A., Dymerets, A. (2019). Transistor Switches Quasi-Control in Quasi-Resonant Pulse Converters. *Proc. (IEEE) 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO'2019)* (pp. 789–792).

4. Voytenko, V., Stepenko, S., Velihorskyi, O., Chakirov, R., Roberts, D., Vagapov, Y. (2015). Digital control of a zero-current switching quasi-resonant boost converter. *Proc. (IEEE) Internet Technologies and Applications (ITA) conf.* (pp. 365–369).

5. Voytenko, V., Stepenko, S. (2015). Simulation peculiarities of high-frequency zero-current switching quasi-resonant boost converter. *Proc. (IEEE) Electronics and Nanotechnology (ELNANO) 35th International conf.* (pp. 486–491).

6. Denisov, Y., Stepenko, S., Gorodny, A., Kravchenko, A. (2014). Input current parameters analysis for PFC based on quasi-resonant and conventional boost converters. *Proc. (IEEE) Electronics and Nanotechnology (ELNANO) IEEE 34th International conf.* (pp. 393–397).

7. Friedland, B. (2010). On design of observer-based pulse-frequency-modulated feedback control systems. *Proc. IECON 2010-36th Annual Conf. on (IEEE) Industrial Electronics Society* (pp. 187–192).

8. Ridley, R. B., Lee, F. C. (1989). Multi-loop control for quasi-resonant converters. *United States patent US 4 866 367*.

9. Murakami, Y., Sato, T., Nishijima, K. (2016). PFM controller with phase lead characteristics using hysteretic comparator for LLC converter. *Proc. (IEEE) Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 3rd conf.* (pp. 13–18).

10. Single and Multichannel, Synchronous Voltage-to-Frequency Converters AD7741\AD7742: Datasheet. (1999). Analog Devices Inc.

11. IttyBitty RC Timer/Oscillator MIC1555/57 (DS20005730A): Datasheet. (2017). Microchip Technology Inc.

12. Bombi, F., Ciscato, D. (1967). A modified integral pulse frequency modulator in control systems. *IEEE Transactions on Automatic Control,* 12 (6), 784–785.

13. Capponi, G., Livreri, P., Di Blasi, G. M., Marino, F. (2004). Architecture of a digital PFM controller for IC implementation. *Proc. Computers in Power Electronics (IEEE) Workshop Proceedings* (pp. 75–79).

14. Maksimovic, D., Zane, R., Erickson, R. (2004). Impact of digital control in power electronics. *Proc. (IEEE) Int. Symp. Power Semicond. Devices ICs.* (pp. 13–22).

15. Syed, A., Ahmed, E., Maksimovic, D., Alarcon, E. (2004). Digital pulse-width modulator architectures. *Proc. Power Electronics Specialists Conference (PESC'04) IEEE 35th Annual,* 6, 4689–4695.

16. Wang, K., Rahman, N., Lukic, Z., Prodic, A. (2006). All-digital DPWM/DPFM controller for low-power DC-DC converters. *Proc. (IEEE) Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'06) Twenty-First Annual. (*pp. 719–723).

17. Agnihotri, P., Kaabouch, N., Salehfar, H., Hu, W. C. (2010). FPGA-based combined PWM-PFM technique to control DC-DC converters. *Proc. North American (IEEE) Power Symposium (NAPS)* (pp. 1–6).

18. Radhika, V., Baskaran, K. (2016). FPGA-based DPWM/DPFM architecture for digitally controlled DC-DC converters. *Proc. Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON'2016) IEEE Uttar Pradesh Section International Conf.* (pp. 78–82).

19. Sahu, B., Rincon-Mora, G. A. (2007). An accurate, low-voltage, CMOS switching power supply with adaptive on-time pulse-frequency modulation (PFM) control. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 54(2), 312–321.

20. Rahman, N., Wang, K., Prodic, A. (2006). Digital pulse-frequency/pulse-amplitude modulator for improving efficiency of SMPS operating under light loads. *Proc. Computers in Power Electronics (COMPEL'06) IEEE Workshops on* (pp. 149–153).

*UDC 621.3.07*

*Roman Yershov, Volodymyr Voytenko*

## PULSE-FREQUENCY MODULATOR WITH ADAPTIVE PULSE DURATION CORRECTION

***Urgency of the research.*** *Solving a number of such urgent problems as increasing the stabilization accuracy of the target parameter (angle, velocity, voltage, and current) and improving the dynamics of control systems, mass-dimensional and thermal characteristics of switched-mode power supply (SMPS) converters for onboard systems that are part of mobile platforms and unmanned aerial vehicles (UAVs) become possible by development of novel converter structures and their control algorithms.*

***Target setting.*** *The change of the period and shape of the resonant voltage/current curve (RC) in quasi-resonant pulsed converters (QRPC) depending on the load impedance leads to inconsistency between the closing signal to the power transistor switch (PTS) and the moment of transition of the RC through zero, and, consequently, to a dramatically decreases the efficiency.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Typical implementations of pulse-frequency modulators (PFM) include a voltage-controlled oscillator and a monostable vibrator, while fully controlled solutions are implemented based on reversible counters and finite-state machine. The impedance observers and modulators built on circular shift registers and delay lines are introduced as the newest PFM links for SMPS control tasks. The PFM operation velocity is enhanced by cascading and using table-based signal synthesis.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *Existing solutions do not adjust the duration of the control pulse to provide it PTS with switching at zero voltage/current values, avoid the possibility of the practical implementation of the QRPC in a wide range of loads.*

***The research objective.*** *The article is devoted to the development of the structure of the digital frequency-pulse modulator with the adaptive correction of the pulse duration (DPFM-APDC) and the method of automatic tracking of the RC to predict its transition through zero.*

***The statement of basic materials.*** *The schematic structure and modulator operation algorithm of the DPFM-APDC unit based on several finite-state machines, a set of binary counters and arithmetical-logical devices are proposed. A pair of external hysteresis comparators detects the transition of the resonance curve through threshold levels arranged symmetrically about zero level.*

***Conclusions.*** *A novel full-featured digital block has been created and implemented on a field programmable gate array (FPGA) using the VHDL. The introduction of this unit into the voltage regulator of a DC-link based on the QRPC in the BLDC electric drive for precise angle stabilizer of the mobile platform allows keeping the DC-link voltage with an accuracy of 1%. The resolution in time domain both the pulse and pause width is 5ns.*

***Keywords:*** *PFM; FPGA; VHDL; quasi-resonant; QRPC; zero-voltage switching; ZVS; zero-current switching; ZCS; adaptive measurement.*

*Fig.: 10. Table: 1. References: 20.*

**Єршов Роман Дмитрович** – старший викладач кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, Україна).
**Yershov Roman** – senior lecturer of the Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** roman.d.yershov@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0267-2906
**ResearcherID:** H-1432-2016
**Scopus Author ID:** 57188719994

**Войтенко Володимир Павлович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Voytenko Volodymyr** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** volodymyr.voytenko@inel.stu.cn.ua
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-1490-0600
**ResearcherID:** F-8698-2014
**Scopus Author ID:** 36167678700

Єршов Р., Войтенко В. Частотно-імпульсний модулятор з адаптивною корекцією тривалості імпульсу. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 177-190.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*UDC 621.398:616–073.7+62–182.4*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-191-198*

*Ihor Sobianin, Valerii Skonechnyi, Inna Yarova*

# PORTABLE ELECTROCARDIOGRAPH WITH GSM MODULE FOR TELEMEDICINE

***Urgency of the research.*** *The principles of telemedicine need to be put into practice of emergency medical care and family medicine, so there is a need for diagnostic medical equipment with the ability of data transfer and remote consulting with subject matter experts.*

***Target setting.*** *Currently, ECG testing consumes the time to prepare the device for work, needs for the personal computer as the additional equipment and requires highly skilled staff. The development of portable electrocardiographic equipment with built-in means of communication is a task of current importance for biomedical engineering.*

***Actual scientific researches and issues analysis****. The current researches in the development of portable cardiograph for primary preclinical diagnostics are focused on the choice of optimal design parameters of device and the incensement of noise immunity of medical equipment.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *This article focuses on the design development of the portable electrocardiograph with built-in GSM module for operation in telemedicine systems.*

***The research objective*** *is the design of the portable electrocardiograph for telemedicine that has a convenient interface for device control, is equipped with means of communication with cardiac care centers, has universal ports for information output to external drives and connection of additional devices, is as ergonomic as possible, meets safety, reliability and energy efficiency requirements.*

***The statement of basic materials.*** *The main design requirements to portable electrocardiographic equipment are formulated. The basic functional units of the device are chosen and its electronic block diagram is synthesized. The computer simulation of processes and parameters of the circuitry of the instrumentation amplifier functionality at given operating temperatures proves the validity of proposed circuit design. The constructive implementation of the schematic diagram is designed. The device constructive parameters that meet the requirements of telemedicine most closely are defined.*

***Conclusions.*** *The key features of the designed portable electrocardiograph with GSM module are: the embodiment in folding form-factor, the availability of GSM module, the constant connection of ECG electrodes via integrated ECG cable. The embodiment in folding form-factor optimizes ergonomic characteristics of the device. The replacement of non-integral ECG cable with integrated one reduces the intensity of internal noise and reduces time to prepare the device for work. Built-in GSM module provides affordable communication with specialized medical facilities, thus reducing the duration of the diagnostics and increasing the efficiency of the medical care in non-ambulatory out-hospital an outpatient setting.*

***Keywords:*** *electrocardiography; portable electrocardiograph; telemedicine; GSM module; data transfer; folding form-factor; integrated ECG cable.*

*Fig.: 4. References 17.*

**Urgency of the research.** The cardiovascular disease (CVD) is the most common type of noncommunicable diseases worldwide. According to the WHO, deaths from CVD make up 31% in the structure of all-cause mortality. This issue is extremely relevant for Ukraine too that takes the first place among European countries in terms of incidence and mortality from CVD [1]. The concept of combating CVD provides a universal health coverage that includes the mandatory electrocardiography in Ukraine. It can take two forms: the routine testing carried out in an outpatient setting and unscheduled non-ambulatory express-ECG in providing the emergency medical care or in suspected case of CVD.

The portable electrocardiograph with the function of data transfer to the specialized medical facilities is necessary for a real-time unscheduled assessment of the patient's condition. It is proven that preclinical diagnostics and immediate care in case of acute manifestations of the CVD increase the effectiveness of further treatment.

The urgency of this research is to develop the design of the portable electrocardiograph (PEC) intended for use in telemedicine – in family medicine and in emergency medical care.

**Target setting.** The electrocardiographic equipment is generally a kit consisting of electronic unit of monoblock form-factor, standard ECG electrodes, the shielded ECG cable. ECG testing data are saved as printout on ECG-paper or by transferring on the computer. As a result, ECG testing consumes time to prepare the device for work, needs the personal computer as the additional equipment and requires highly skilled staff. The development of portable electrocardiographic equipment with built-in means of communication is a task of current importance for biomedical engineering.

© Собянін І. В., Сконечний В. В., Ярова І. А., 2020

**Actual scientific researches and issues analysis** are devoted to the selection of optimal design parameters of the portable electrocardiograph and the incensement of its noise immunity. The design of the proposed PEC is determined by the following parameters: method of registration of biopotentials, number of recorded leads, interface type for the device, method of data displaying, type of ports for data transfer, type of the power source.

The method of registration of biopotentials plays an important role. Simplest single-channel devices include integrated capacitive ECG sensors [2]. The disadvantages of such devices are signal distortion because of the variable skin-electrode resistance and high sensitivity to mechanical movement upon contact that reduce accuracy of received data [3]. In order to take an ECG test, the aforementioned devices should be pressed against the chest or they should be firmly squeezed with the palms of both hands. This method is convenient for monitoring or self-monitoring of the well-being, but it cannot be used in emergency medical care, especially if the patient is unconscious. In terms of interference minimization and convenience of information acquisition, PECs equipped with electrodes fixed to the patient's body are preferred [4]. Out of two designs used, the clamp ECG electrodes are more convenient to use rather than the suction cup ECG electrodes [5].

The number of recorded leads for electrocardiographs of different designs varies from 1 to 12 [6]. This parameter is not considered as the primary one for the express-ECG [5]. In order to determine the critical deviations of the cardiovascular system functionality the registration of biopotentials from three leads according to the Einthoven principle is enough [7]. An increase in the number of leads affects the amount of interference and the energy intensity of the device, and it also increases the testing preparation phase for the patient.

PEC tor express-diagnostics in non-ambulatory setting must have both a user-friendly visual interface and an ergonomic way of interacting with the device [8]. Practically all the devices, which are in service, are controlled via the button interface with the dialogue window on the liquid crystal display, that simplifies the handling of the device, increases the device's strength and minimizes system energy consumption [5, 7].

A number of PECs provide a function to print the cardiogram on a thermal paper directly at the place of diagnostics, which is convenient for diagnosis and saving of the results of the testing [5]. On the other hand, the use of the thermal paper involves the design of the thermal printing compartment with the possibility of paper replacement, the allocation of volume to house the heat source and the support shaft. Not only do these elements significantly complicate the design, but also affect the power consumption and resistance of the device to the shock loads.

Energy efficiency and autonomy are significant factors to be considered in the development of portable medical equipment in general and equipment for telemedicine in particular [4; 9]. To implement them, the device must have a low power consumption and stay operational at the testing place, regardless of the availability or absence of electrical powerlines.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The disadvantage of standard electrocardiography methods is the signal distortion, as a result of the electromagnetic interference [3]. Connectors and connecting cables, the human body, the PEC computing module generate electromagnetic distortions [10]. In addition, an important factor is the mechanical strength of the connectors in operating conditions with a large number of pairing cycles [11]. One of the aspects of PEC development is crosstalk level reduction and durability improvement of the equipment by reducing the number of cables and connectors in structural design of the device.

The built-in GSM module is a key design element in the development of portable electrocardiograph for telemedicine. It provides an opportunity of transferring diagnostics results and receiving instructions from specialists, reducing the time interval between taking a cardiogram and diagnosis [12 – 14]. The LAN port should be considered as an alternative to the GSM module – a less expensive, but a rather quick method of an access to the cardiology network [14]. However, at the same time, a place of a patient's testing should have access to the Internet, and the PEC kit must come with an appropriate cable.

There is a need to study the dynamics of cardiologic indications; therefore, it is important to save this information by transferring it to external storage devices or a computer [12]. The prevalence of the USB connector as a generally accepted method of the data transfer explains why it is a feature in PECs, but it requires certain design changes, taking into account the ergonomics of the device [2, 7]. The use of the SD card provides an ability to store up to 2 terabytes of cardiac imaging protocols [15]. However, the SD card port is less common than USB, which explains the need for an external storage devices reader.

**The research objective** is the design of portative electrocardiograph for telemedicine that has a convenient interface for device control, is equipped with means of communication with cardiac care centers, has universal ports for information output to external drives and connection of additional devices, is as ergonomic as possible, operates in compliance with safety, reliability and energy efficiency requirements.

**The statement of basic materials.** The designed PEC is focused on the potential use in Ukraine and bordering countries of Eastern Europe. The ambient temperature is the main external factor that has a destabilizing effect on the operation of the device. Taking into account the specifics of work of family doctors and emergency medical care teams, it is assumed that the device will be used indoors, while the operating temperature can vary in the range from + 1 to + 40° C.

The main functional units of the designed PEC are:

– PIC24FJ256DA106 microcontroller;
– HJ070NA-13A color liquid crystal display with the touch screen;
– SMD-KAAG15008C micro dynamic speaker;
– PJ-002A-SMT tonometer port;
– SIM900D mobile communication module;
– 220V power supply unit;
– JiNWo NiMh 9.6V 4000mAh rechargeable battery.

In this paper the electronic block diagram is synthesized (fig. 1). The range of heart bioelectric potentials recorded by the device is 0.03 to 5.0 mV. Signals from the ECG electrodes are sent to the lead selector switch. The selection of the current lead is done by the microcontroller through the user menu on the display of the cardiograph. Then the signal enters the circuitry of the instrumentation amplifier, which amplifies the voltage difference that is present in the electrodes. After the signal passes the low-pass filter with a double T-bridge and the cut-off frequency of 10 Hz, it enters the inverter that creates the waveforms of standard form on the display. The inverter is driven by the microcontroller. The tuning resistor located in the signal regulator block sets the signal strength. The diffuser loudspeaker sounds an indication of the cardiography completion and of other performed processes.

The USB with an antenna module is connected to the microcontroller to download reference cardiograms and save the testing results to a portable storage. According to the technical requirements of the GSM module, this structural unit includes the separate power supply circuitry and the SIM card slot.

The touch panel display driven by the microcontroller is intended to create user menu via software and optimize PEC button interface.

The proposed cardiograph model contains the port for connecting an electronic tonometer to supplement the electrocardiogram with blood pressure readouts that is an integral part of ECG diagnostics.

Operation of the device in the autonomous mode is provided by a built-in battery, which is charging through the power supply unit from a standard 220 V power line.

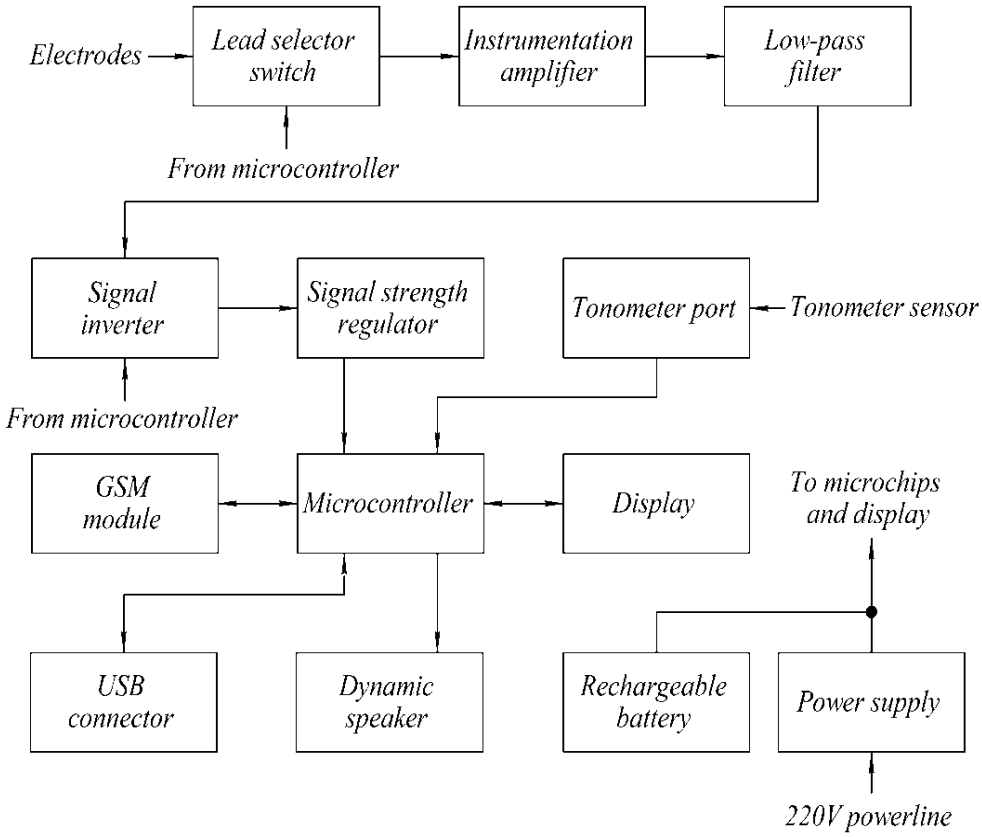



*Fig. 1. The portable electrocardiograph: block diagram*

Verification of the signal conversion efficiency by the designed electronic unit was produced by the computer simulation of the circuitry section. The circuitry of the instrumentation amplifier, which is the input circuitry of the schematic diagram of designed PEC, is selected as the object of the simulation. The reliability of signal travel through this section is of utmost importance during the ECG-testing [16]. The ranges of cardiometry data deviations at various values of the ambient temperature are the output parameters of simulation [17].

The given tasks were solved in the OrCad 9.2 system. The model of the cascade of PEC instrumentation amplifier was constructed in electronic circuit simulator Pspice Schematics and the relations of its electrical characteristics at specified operating temperatures were determined.

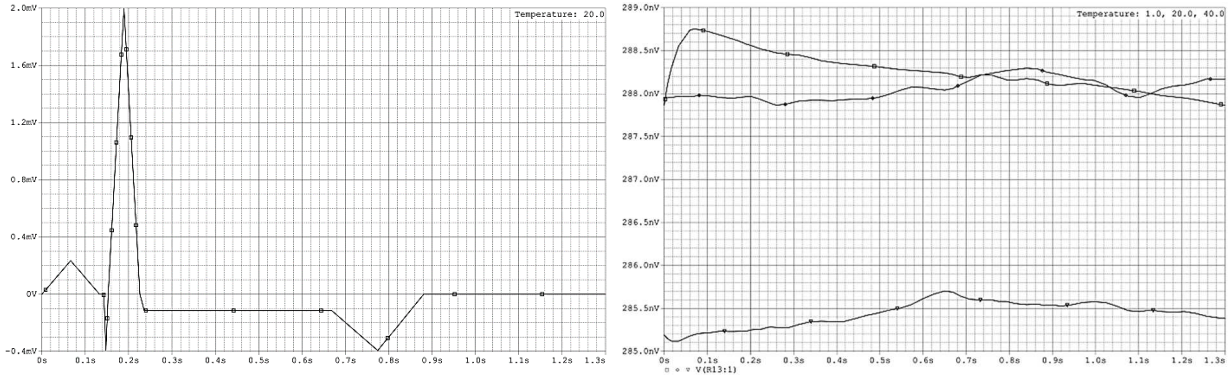
The temperature values for the simulation are selected by:

– extreme values of operating temperature +1 and + 40° C in the macroclimatic modification of the device for a moderate and cold climate (according to GOST 15150) when it is operated by emergency medical care teams;

– the mean value of operating temperature is + 20° C, which corresponds to the standard temperature in the family doctor's office (according to DSTU B EN 15251:2011).

The simulation condition is introduced, that assumes the circuitry operates in the mode of the 1st lead biopotential aquisition according to Einthoven. The simulation was carried out for the condition of the inverted test signal, which simulates the cardiac waveform. In PSpice software the test signal is simulated by the piecewise-linear voltage source VPWL (fig. 2*a*).

The simulated section of the circuitry has a property of amplifying the difference of the input signals. Thus, ideally, the output should be represented by a straight line $f(t) = 0$ when applying the same signals to the inputs. The actual result of the simulation of the operation of the cascade of the PEC instrumentation amplifier for three given values of operating temperatures are the curves of internal interference (fig. 2*b*).

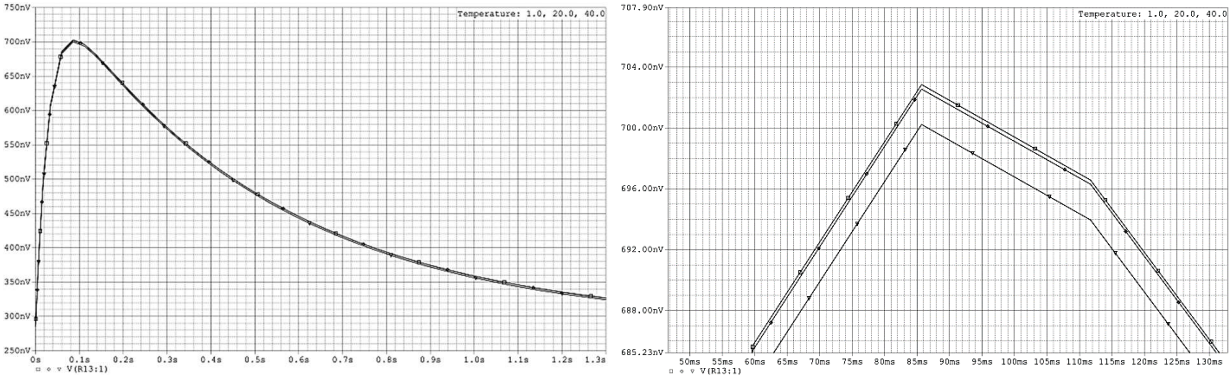



*a* *b*

*Fig. 2. The simulation of the signal travel through the instrumentation amplifier circuitry:*
*a – test signal simulating cardiac waveform; b – the range of deviation of the test signal*

According to simulation results of the signal travel through the circuitry of the instrumentation amplifier, the internal noise level of the circuitry reproduced by the software does not exceed 300 nV. Obtained values of the internal noise level are significantly less than margin of error of ± 25 μV. The nature of the curves shows that the affect of noise changes insignificantly with an increasing temperature in the studied range.

According to the simulation results, stabilization of the system occurs within 3 s (fig. 3*a*). In this case the primary voltage surge in the circuitry reaches values of 700 nV. (fig. 3*b*). The obtained voltage value does not endanger the equipment, since the electronic components can withstand surges of up to several volts, while the stabilization time is comparable to the period of the cardiac waveform. Thus, by means of complex computer simulation, the efficiency of signal conversion by a circuitry of the instrumentation amplifier in the given range of operating temperatures is confirmed.




*a* *b*

*Fig. 3. The transient simulation in PEC circutry:*
*a – transient response in 5 s. range; b – the scaled peak of the transient waveform with visible temperature fluctuations*

For the designed PEC the folding form-factor is proposed. The case and the cover connected by hinges are the major structural elements of the device (fig. 4).

The cover serves as the frame for the color LCD touch screen. The printed circuit board with the processor module and the GSM module are placed behind the display. There is also the low-profile micro speaker. The USB connector is located on the side of the cover.

The case contains the tonometer port, battery and power supply. The case design houses a removable insert with pockets for placing the ECG electrodes kit in transport position, while simultaneously hides the implementation of the wired connections of the tonometer port, battery and power supply. To prevent an accidental loss of the ECG electrodes from insertion

pockets and to prevent damage to other parts of the device, the Velcro tape reliably fixing their position is featured. The electrical safety of the battery and power supply elements meets the requirements of IEC 60601-1: 2005.

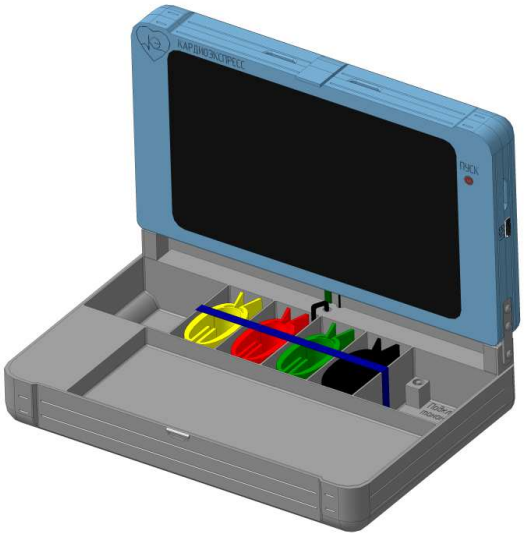


*Fig. 4. The portable electrocardiograph: 3D-model*

The designed PEC model is proposed to be equipped with four standard ECG electrodes of clamp design. Sensors of this type are firmly fixed to the body and they provide high accuracy acquisition of the standard 3-lead ECG. For practical purposes color and letter marking of the electrodes meets the requirements of ANSI/AAMI EC13, EC53 and IEC 60601-2-47. ECG electrode conductors are assembled into a single shielded ECG cable, permanently connected to the adapter located in the case. This omits the operation of connecting the cable, thus reducing the level of electromagnetic noise and the time spent to get the device into the operating position.

The cover and the case are connected with hinges. The proposed design solution minimizes the volume of PEC during transportation and allows an ergonomic adjustment of the device for the user's needs. The maximum angle of the device opening is 135°. During transportation, the PEC is locked with a latch. The cable of the ECG electrodes is connected to the processor module located in the cover, by means of an adapter with a flexible loop.

**Conclusions.** In the arrangement of the functional elements of the personal electrocardiograph, technical solutions are proposed that are not applicable in electrocardiographs produced by domestic manufacturers. The key design features of the developed PEC model:

– the folding form-factor provides the most ergonomic placement of structural elements, as well as protects the LCD touch screen from damage;

– the built-in GSM module ensures ECG data transfer to cardiologic care centers;

– the color LCD touch screen creates an optimal user interface;

– the electronic tonometer port expands the possibilities of express-diagnostics;

– the absence of a thermal printing unit reduces energy consumption and weight of the device, thus increasing its mobility.

The structural implementation of the electrical circuit is characterized by an innovative approach to the placement of the device functional elements. The implementation of the device in folding form-factor improves ergonomic characteristics of the device. The biopotential measurement in three leads fully suits the requirements of primary preclinical diagnostics in non-ambulatory settings. Replacing the removable cable with an integrated one reduces the level of induced internal noise and also reduces the time taken to bring the device to operating condition. The built-in GSM module provides a reliable communication channel with specialized medical institutions. The use of a 7-inch color touch-sensitive liquid crystal display coupled with a virtual user interface expands the capabilities of the device.

Implementation of the proposed PEC model will make it possible to provide emergency medical care services and family medicine services with equipment for express-ECG, which in turn will reduce the number of CVD deaths in Ukraine, as well as facilitate monitoring of patients who undergo respective outpatient treatment.

## References

1. Noncommunicable diseases country profiles 2018 (2018). *World Health Organization*. Retrieved from https://www.who.int/nmh/publications/ncd-profiles-2018/en.

2. Boyakhchyan, A., Lezhnina, I., Overchuk, K. et. al.Clinical trials of a personal electrocardiograph. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2018. Vol. 363, Iss. 1. P. 012030. DOI: 10.1088/1757-899X/363/1/012030.

3. Yadav O. P., Ray S. ECG signal characterization using Lagrange-Chebyshev polynomials. *Radioelectronics and Communications Systems*, 62, 72–85 (2019). DOI: 10.3103/S0735272719020031.

4. Chang W.-L., Hou, C. J.-Y., Wei, S.-P. et. al. Utilization and Clinical Feasibility of a Handheld Remote Electrocardiography Recording Device in Cardiac Arrhythmias and Atrial Fibrillation: A Pilot Study. *International Journal of Gerontology*. 2015. No. 9 (4). P. 206–210. DOI: 10.1016/j.ijge.2015.06.002

5. Bansal, A., Joshi, R. (2018). Portable out-of-hospital electrocardiography: A review of current technologies. *Journal of Arrhythmia*, 34, 129–138. DOI: 10.1002/joa3.12035.

6. Desteghe, L., Raymaekers, Z., Lutin M. et. al. (2017). Performance of handheld electrocardiogram devices to detect atrial fibrillation in a cardiology and geriatric ward setting. *EP Europace, 19* (1), 29–39. DOI: 10.1093/europace/euw025.

7. Azucena, H., Rios, E., Pena, R. D., Diaz, J. (2015). Design and implementation of a simple portable biomedical electronic device to diagnose cardiac arrhythmias. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 4, 1–10. DOI: 10.1016/j.sbsr.2015.01.001.

8. Jeon, T., Kim, B., Jeon, M., Lee, B.-G. (2014). Implementation of a portable device for real-time ECG signal analysis. *BioMedical Engineering Online*, 13 (1). DOI: 10.1186/1475-925X-13-160.

9. Kuzmin, A., Safronov, M., Bodin, O. et. al. (2017). Device and software for mobile heart monitoring. *Conference of Open Innovation Association, FRUCT4*, 121–127. DOI: 10.23919/FRUCT.2016.7892191.

10. Shcherbakova, G. Y., Krylov, V. N., Bilous, N. V. (2015). Methods of automated classification based on wavelet-transform for automated medical diagnostics. *2015 Information Technologies in Innovation Business Conference (ITIB)*, 7–10. DOI: 10.1109/ITIB.2015.7355048.

11. King, W., Bunke, C. (2010). Making medical connections. *Electronic Products, 52* (8). Retrieved from https://www.electronicproducts.com/Interconnections/Connectors/Making_medical_connections.aspx.

12. Jha, C. K., Kolekar, M. H. (2017). ECG data compression algorithm for tele-monitoring of cardiac patients. *Int. J. Telemedicine and Clinical Practices*, 2 (1), 31–41. DOI: 10.1504/IJTMCP.2017.082106.

13. Campillo, D., Torres, H., Gonzalez, R. et. al. (2014). A portable device for a modular system of patient ECG monitoring. *Computing in Cardiology*, 41, 1077–1079. Retrieved from http://www.cinc.org/archives/2014/pdf/1077.pdf.

14. Kyriacou, E., Pavlopoulos, S., Berler, A. et. al. (2003). Multi-purpose HealthCare Telemedicine Systems with mobile communication link support. *BioMedical Engineering OnLine,* 2:7. DOI: 10.1186/1475-925X-2-7.

15. Segura-Juarez, J. J., Cuesta-Frau, D., Samblas-Pena, L., Aboy, M. (2004). A Microcontroller-Based Portable Electrocardiograph Recorder. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 51* (9), 1686–1690. DOI: 10.1109/TBME.2004.827539.

16. Shcherbakova, G., Hao-Su, Shi, Krylov, V. , et. al. (2017). Estimation of the duration of RR-intervals of electrocardiograms by mean of multi-start optimization based on wavelet transformation. *2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* (pp. 752–755). DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095190.

17. Yarova, I. A., Skonechnyi, V. V., Sobianin, I. V. (2019). Proektuvannia portatyvnoho elektrokardiohrafa dlia vneambulatornoi ekspres-kardiometrii [Design of the portable electrocardiograph for the outpatient express-cardiometry]. *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system: materialy IX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Complex Quality Supply for Technological Processes and Systems*: proceedings of IX International Scientific-Practical Conference (vol. 2, pp. 219–220). Chernihiv: ChNTU.

*УДК 621.398:616–073.7+62–182.4*

*Ігор Собянін, Валерій Сконечний, Інна Ярова*

# ПОРТАТИВНИЙ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФ ІЗ GSM МОДУЛЕМ ДЛЯ ТЕЛЕМЕДИЦИНИ

***Актуальність теми дослідження.*** *Необхідність впровадження в практику принципів телемедицини обумовлює потребу створення діагностичної медичної апаратури, що реалізує можливість передачі даних і дистанційного консультування з профільними фахівцями при наданні екстреної медичної допомоги та в сімейній медицині.*

***Постановка проблеми.*** *Електрокардіографічне обладнання як правило представляє собою комплекс, що складається з електронного блоку в форм-факторі моноблок, комплекту знімних ЕКГ електродів і ЕКГ кабелю. Кардіодані зберігаються друкуванням на термопапері або передачею на персональний комп'ютер. Таким чином, проведення ЕКГ вимагає витрат часу на приведення приладу в робочий стан, додаткового обладнання у вигляді персонального комп'ютера і високої кваліфікації лікаря для інтерпретації результатів. Проєктування портативної електрокардіографічної техніки з вбудованими засобами зв'язку є актуальним завданням біомедичної інженерії.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Сучасні дослідження в області проєктування портативного обладнання для первинної діагностики серцево-судинних захворювань присвячені вибору оптимальних конструктивних параметрів і підвищенню завадостійкості медичної техніки.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Стаття присвячена розробці конструкції портативного електрокардіографа з вбудованим GSM модулем для експлуатації в системах телемедицини.*

***Постановка завдання.*** *Актуальним завданням є проєктування портативного електрокардіографа для експрес-діагностики серцево-судинних захворювань, що має зручний інтерфейс для управління приладом, забезпеченого засобами зв'язку з центрами кардіологічної допомоги, із універсальними портами для виведення інформації на зовнішні накопичувачі й підключення додаткових пристроїв, максимально ергономічного, такого, що задовольняє вимогам безпеки, надійності та енергоефективності.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Сформульовано основні вимоги до портативної електрокардіографічної техніки. Обрані основні функціональні одиниці приладу і синтезована його схема електрична структурна. Комп'ютерне моделювання процесів і параметрів функціонування каскаду інструментального підсилювача приладу при заданих значеннях робочих температур підтвердило обґрунтованість запропонованих схемотехнічних рішень. Розроблена конструктивна реалізація електричної схеми. Визначено конструктивні характеристики приладу, які найбільш повно відповідають вимогам телемедицини.*

***Висновки.*** *Характерними особливостями спроєктованого портативного електрокардіографа є виконання в розкладному форм-факторі, наявність GSM модуля і постійне підключення ЕКГ електродів через інтегрований ЕКГ кабель. Виконання в розкладному форм-факторі оптимізує ергономічні характеристики приладу. Заміна знімного кабелю інтегрованим знижує рівень наведених внутрішніх шумів, а також скорочує час приведення приладу в робочий стан. Наявність вбудованого GSM модуля забезпечує доступний зв'язок зі спеціалізованими медичними установами, скорочує тривалість діагностики і підвищує ефективність медичної допомоги в неамбулаторних умовах.*

***Ключові слова:*** *телемедицина, електрокардіографія, портативний електрокардіограф, GSM модуль, передача даних, розкладний форм-фактор, інтегрований ЕКГ кабель.*

*Рис. 4. Бібл. 17.*

**Sobianin Ihor** – Master, Department of Electronic Equipment and Information processing Computer Technologies, Odessa National Polytechnic University (1 Shevchenko Av., 65044 Odesa, Ukraine).
**Собянін Ігор Володимирович** – магістр, магістр кафедри електронних засобів і інформаційно-комп'ютерних технологій, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна).
**E-mail:** sobyanin.igor.1997@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5444-602X

**Skonechnyi Valerii** – PhD in Technical Science, Senior Lecturer of Department of Electronic Equipment and Information processing Computer Technologies, Odessa National Polytechnic University (1 Shevchenko Av., 65044 Odesa, Ukraine).
**Сконечний Валерій Володимирович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електронних засобів і інформаційно-комп'ютерних технологій, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна).
**E-mail:** valeriy.skonechnuy@opu.ua
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-3778-1392

**Yarova Inna** – PhD in Technical science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Vitality Protection Systems Management, Odessa National Polytechnic University (1 Shevchenko Av., 65044 Odesa, Ukraine).
**Ярова Інна Анатоліївна –** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління системами безпеки життєдіяльності, Одеський національний політехнічний університет (просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна).
**E-mail:** inaodua@ukr.net
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7154-6674

Sobianin, I., Skonechnyi, V., Yarova, I. (2020). Portable electrocardiograph with GSM module for telemedicine. *Technical sciences and technologies*, *1* (19), 191-198.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*UDC 621.38:614.8*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-199-205*

*Mohanad Abdulhamid, Deng Peter*

# REMOTE HEALTH MONITORING: FALL DETECTION

***Urgency of the research.*** *Falling is a serious health issue among the elderly population; it can result in critical injuries like hip fractures. Immobilization caused by injury or unconsciousness means that the victim cannot summon help themselves.*

***Target setting.*** *The target of this paper is to design and create a fall detection system. The system consists of a monitoring device that links wirelessly with a laptop. The device is able to accurately distinguish between fall and non-fall.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Healthcare systems in the world have undergone tremendous evolution in the last 50 years. In the early 1960s, we had computers in the form of mainframes being incorporated into healthcare systems. However, there were some problems met from their usage. These mainframes were very few, expensive, large in size and consumed a lot of electrical power and as a result, they had to be shared by several hospitals since independent ownership wasn't feasible an idea to be considered at all.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *Despite all of the changes, there was still the issue of affordability of the treatments offered by the hospitals from the patients' point of view. This had a negative impact on both the hospitals & patients. Hospitals were not getting that large enough a number of patients for treatment while patients were opting for alternatively cheaper treatment plans.*

***The research objective.*** *The scope of this paper is limited to fall detection and remote viewing of the collected data. Fall detection algorithm is developed and implemented through programming on Arduino Uno board. Remote viewing of the data is done on a laptop after having fall detection data wirelessly transmitted to it.*

***The statement of basic materials.*** *To detect fall along an axis, the acceleration magnitude is considered. With the accelerometer output data, the angle change can also be calculated using the dot product. In the event of falling, one experiences a momentary free-fall then a large spike in acceleration. For wireless data transmission, we choose the HC□05 module which is an easy to use Blue-tooth SPP (Serial Port Protocol) module, designed for transparent wireless serial connection setup. For appropriate fall detection, we choose an accelerometer. The Bluetooth module receives fall detection data from the micro-controller and transmits the same to a laptop computer where we realize remote viewing of the data.*

***Conclusions.*** *The objective of this paper was to design a fall detection system that links wirelessly with a laptop computer (where we have remote viewing of the collected data). By the conclusion of this paper, we had achieved the primary goal of creating a working system able to recognize falls from non-falls, while wirelessly synched with a laptop.*

***Keywords:*** *Remote health monitoring; fall detection; design.*

*Fig.: 6. References: 4.*

**Urgency of the research.** Falling is a serious health issue among the elderly population; it can result in critical injuries like hip fractures. Immobilization caused by injury or unconsciousness means that the victim cannot summon help themselves. With elderly who live alone, not being found for hours after a fall is quite common and drastically increases the significance of fall-induced injuries. With an aging Baby Boomer population, the incidence of falls will only rise in the next few decades.

**Target setting.** The target of this paper is to design and create a fall detection system. The system consists of a monitoring device that links wirelessly with a laptop. The device is able to accurately distinguish between fall and non-fall.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Healthcare systems in the world have undergone tremendous evolution in the last 50 years. In the early 1960s, we had computers in the form of mainframes being incorporated into healthcare systems. However, there were some problems met from their usage. These mainframes were very few, expensive, large in size and consumed a lot of electrical power and as a result, they had to be shared by several hospitals since independent ownership wasn't feasible an idea to be considered at all[1].

Come 1970s to early 1990s, there were enormous changes in terms of size and cost for computers & some of the hospital equipment that were invented and innovated at the time. Hospitals were thus able to acquire smaller sized computers and be able to easily operate their independent healthcare systems. Also, in this period, we had the invention of the internet which had a positive impact on health systems. Communication amongst hospitals, their staff and patients greatly improved. Hospitals were also able to upload and store some of their data (especially patients' data) online so as to make their accessibility easy for authorized personnel (personnel need not be physically present at the premise since all they needed was just a computer, internet connection & and the necessary access password)[2].

© Моханад Абдулхамід, Ден Пітер, 2020

Despite all of the tremendous changes, there was still the issue of affordability of the treatments offered by the hospitals (that were properly equipped with computers & hospital equipment) from the patients' point of view. This had a negative impact on both the hospitals & patients.

Hospitals were not getting that large enough a number of patients for treatment while patients were opting for alternatively cheaper treatment plans (which were not that good enough compared to that of properly equipped hospitals)[3].

Then came the mid-1990s to early-2000 and present where significant technological advancements have taken place. This has seen to great improvements in the healthcare systems with the diversification of remote health monitoring which by definition, is a form of technology which allows a patient to use a mobile medical device to perform tests from outside a clinic and collects the medical and health data to securely transmit to healthcare professionals for remote assessment. As a result, patients, especially the chronically ill, elderly or disabled are able to have increased healthcare access at their homes with decreased healthcare delivery costs [4].

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Despite all of the changes, there was still the issue of affordability of the treatments offered by the hospitals from the patients' point of view. This had a negative impact on both the hospitals & patients. Hospitals were not getting that large enough a number of patients for treatment while patients were opting for alternatively cheaper treatment plans.

**The research objective.** The scope of this paper is limited to fall detection and remote viewing of the collected data. Fall detection algorithm is developed and implemented through programming on Arduino Uno board. Remote viewing of the data is done on a laptop after having fall detection data wirelessly transmitted to it.

**The statement of basic materials.** The algorithm design is described below. To detect fall along an axis, the acceleration magnitude is considered. This is achieved by a magnitude vector. Consider:

$$\mathrm{AM} = \sqrt{(a_x^2 + a_y^2 + a_z^2)}, \quad (1)$$

where AM is acceleration magnitude.

With the accelerometer output data, the angle change can also be calculated using the dot product. To achieve this, the instantaneous vector and a reference vector are introduced. Instantaneous vector is given by

$$a = (a_x, a_y, a_z). \quad (2)$$

Reference vector is generated when a user stands up. It is given by:

$$b = (b_x, b_y, b_z). \quad (3)$$

Using both the instantaneous vector and reference vector in the following formula:

$$a.\ b = |a||b| \cos\theta, \quad (4)$$

Making the angle as subject:

$$\theta = \cos^{-1}(\mathrm{a.b}/|a||b|). \quad (5)$$

In the event of falling, one experiences a momentary free-fall then a large spike in acceleration. In the flow-chart shown in Fig.1, we have two decision figures: lower threshold AM and upper threshold AM.

The algorithm runs in the following manner. First, it checks whether the lower threshold value has been broken by the AM and if so, it then quickly checks whether the upper threshold is broken within a span of 0.5s. If it's not broken, we go back to data collection and if so, the algorithm recognizes this event as a fall. This algorithm's strength is that it requires two AM thresholds to be broken by an activity for a fall to occur.

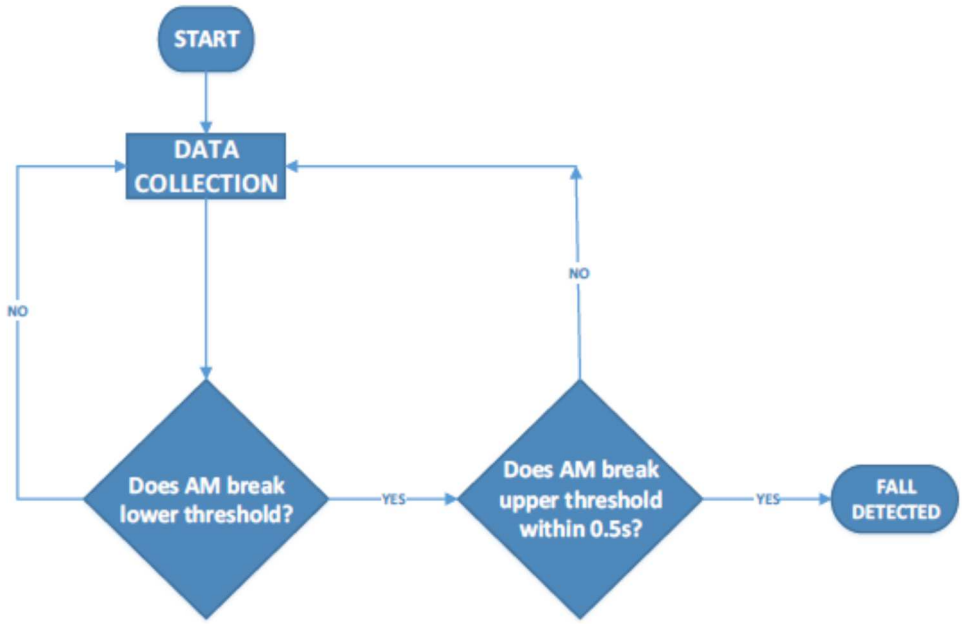



*Fig. 1. Fall detection algorithm*

**Components of the system.** The Arduino Uno is a very popular board among hobbyists and is the microcontroller board of choice when building small model projects. Because of this, there are extensive tutorials and open source examples available to facilitate learning and familiarizing oneself with the board. In addition to this, we choose this board because of the following characteristics:

1. Operating voltage – The operating voltage of 5V with a 3.3V option is appropriate because both our sensor boards and Bluetooth module operate under 5 or 3.3V power and output readings in the range of 0-5V.
2. Input voltage – The board has a built-in voltage regulator that allows an input voltage range of 7-12V, which is suitable because we plan to power the board with a 9V battery.
3. Memory – The flash memory (32KB) is appropriate because our algorithm programs can be fairly long and require a decent amount of memory on the microcontroller to store them. The Static Random Access Memory(SRAM) (2KB) is a little on the low side, but the algorithms can work around this by not storing too many variables, so as to not exhaust the SRAM capacity.
4. Specialty pins – The Arduino Uno comes with RX/TX pins, which will be used for serial communication with our Bluetooth module. The board also comes with I2C compatible pins, which will be crucial to interface with our digital accelerometer.

**Bluetooth module.** For wireless data transmission, we choose the HC□05 module which is an easy to use Bluetooth SPP (Serial Port Protocol) module, designed for transparent wireless serial connection setup.

The HC-05 Bluetooth module can be used in a Master or Slave configuration, making it a great solution for wireless communication. We choose this module namely because its pins and power are 5V compatible. It also supports RX/TX serial communication from 9600 to 115200bps (bits per second, baud rate), which makes it fully compatible with our Arduino Uno R3 board.

**Sensor.** For appropriate fall detection, we choose an accelerometer. The model selected is the ADXL345 triple axis digital accelerometer. It has a wide G range (up to ±16g). The range is very wide considering some severe falls are rated at 8 g's. Since it is a digital sensor, the resolution can be adjusted and there is less voltage noise, and less calibration.

The ADXL345 gives tri-axial data and requires a minimum of 3.3V power, is I2C compatible and thus our microcontroller board can interface with it correctly.

**Circuit setup.** The overall circuit setup is shown in Fig. 2.

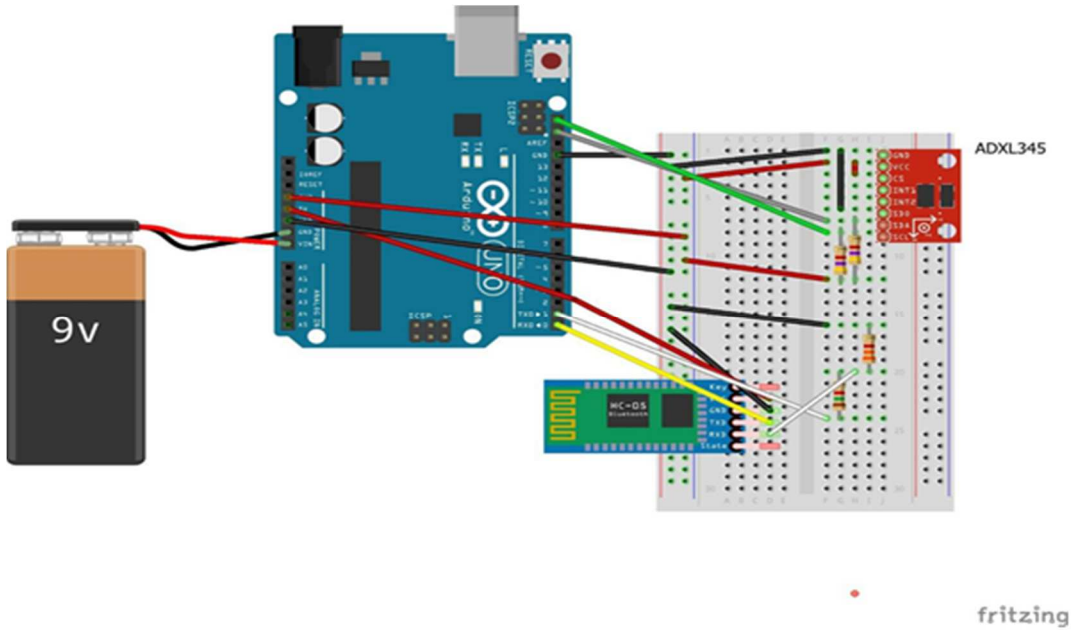



*Fig. 2. Overall circuit setup*

**Block diagram.** The overall block diagram is shown in Fig.3.

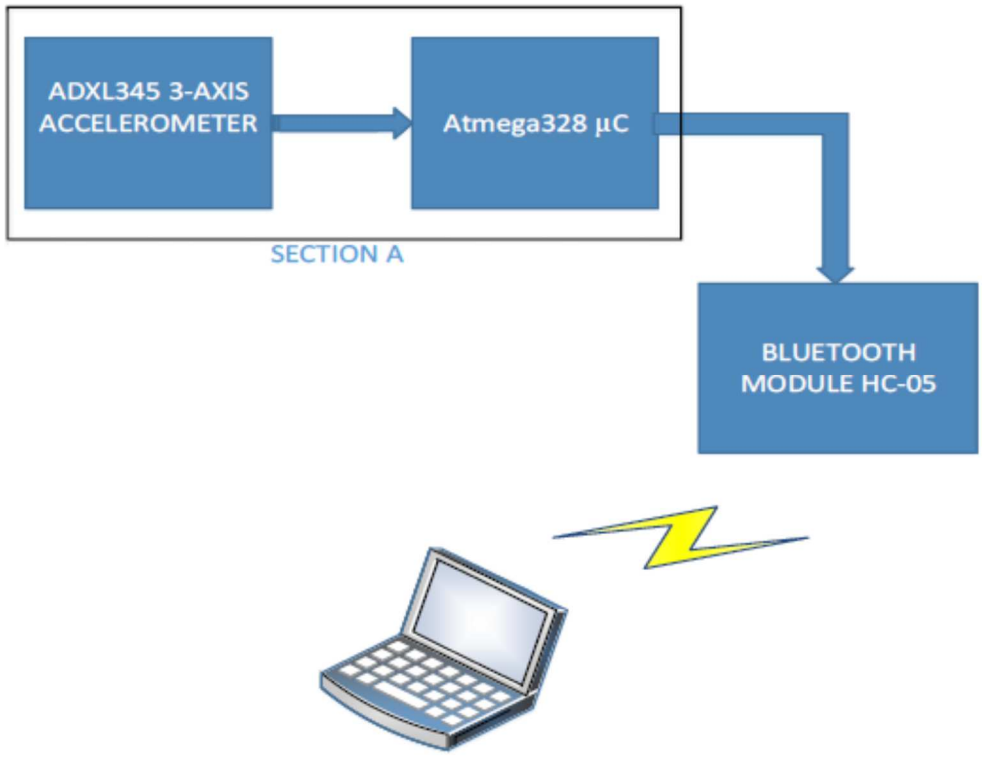



*Fig. 3. Overall block diagram*

In section A in Fig.3, we have the collection of data by the accelerometer, processing of the same by the micro-controller and ascertaining of whether a fall has occurred. Our algorithm, is run by the micro-controller. The Bluetooth module receives fall detection data from the micro-controller and transmits the same to a laptop computer where we realize remote viewing of the data.

**Results.** The graphs below represent the fall and non-fall data that we collect during our testing phase. They present a comparison between the kind of graphs we expect to see in a fall and non-fall scenarios. From our algorithm, we set the upper threshold value to 2g's so as to ensure that all acceleration values from fall activities break it just as illustrated in Fig.4. Also, we see that the set lower threshold value of 0.4 g's has been broken.

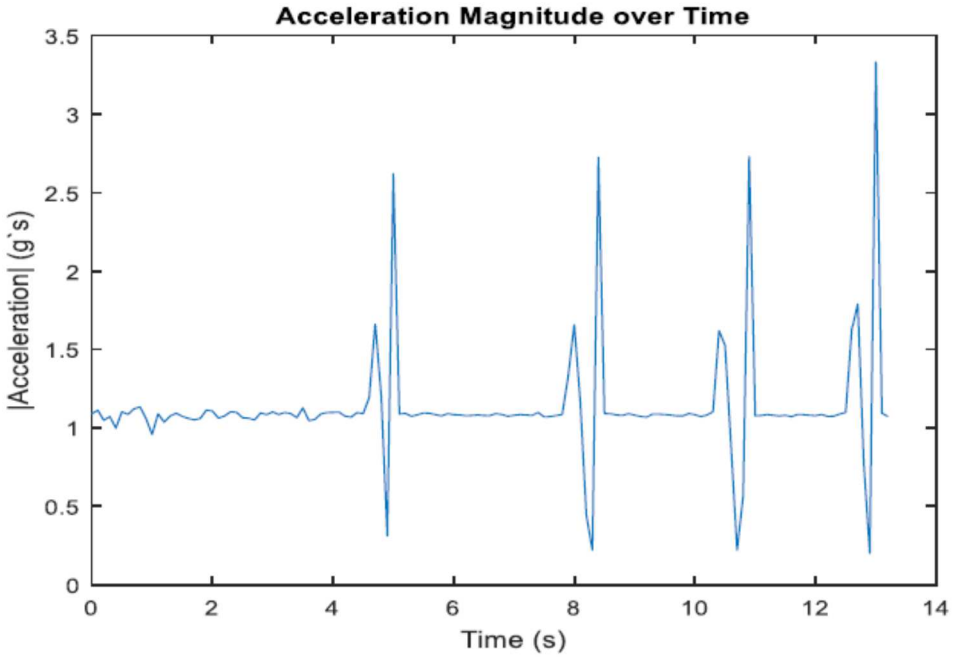



*Fig. 4. Graph of falling down*

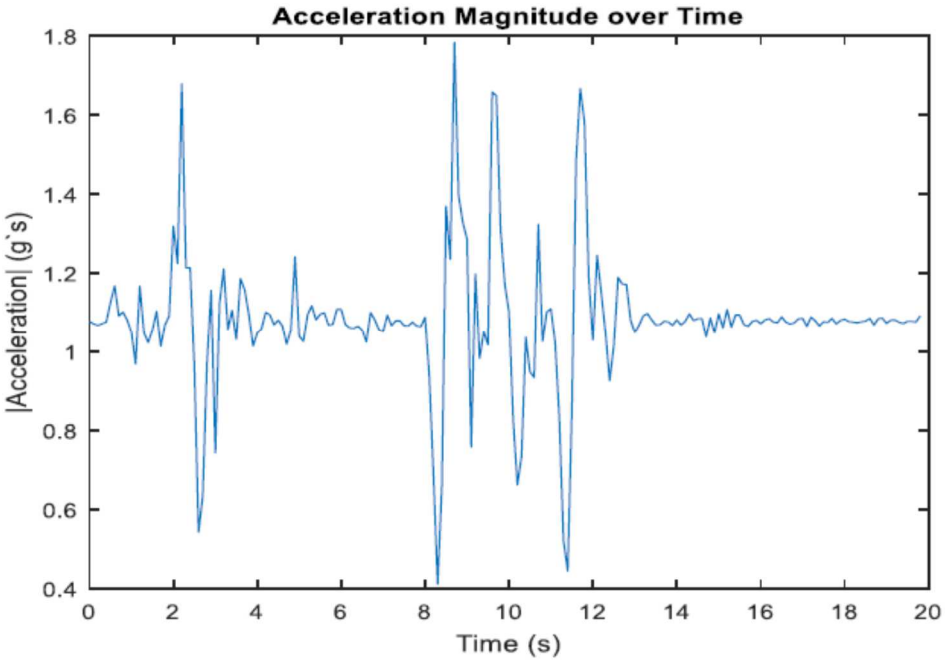



*Fig. 5. Standing up and sitting down hard*

In Fig.5 and Fig.6, we have graphs for non-fall activities. In both cases, we see that their acceleration magnitude does not exceed the set upper threshold value of 2g's.

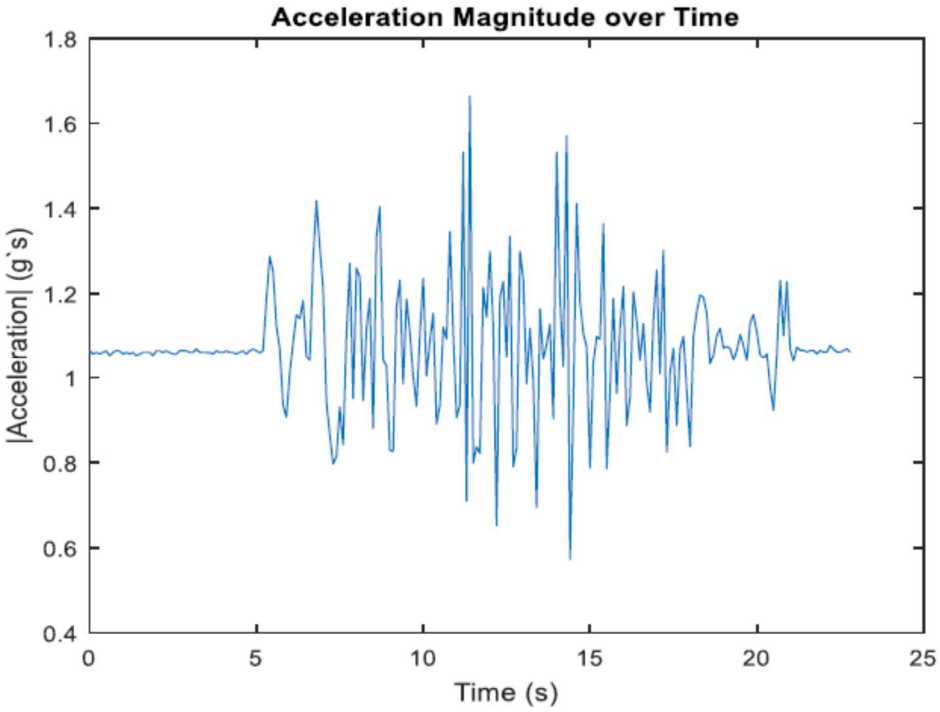



*Fig. 6. Walking*

**Conclusions.** The objective of this paper was to design a fall detection system that links wirelessly with a laptop computer (where we have remote viewing of the collected data). By the conclusion of this paper, we had achieved the primary goal of creating a working system able to recognize falls from non-falls, while wirelessly synched with a laptop.

With this paper, there are some areas for future development. From the commercial point of view, improvements would include: having the system housed in a proper and well-designed casing to prevent its damage in the occurrence of a fall, establishing emergency contacts though the PC-side by sending text messages, reduction of the size of the system by using custom printed circuit boards and Lithium-ion batteries, and porting the PC-side programming onto a mobile phone to realize complete mobile communication. Also, we could add a gyroscope and Global Positioning System(GPS) module to the setup. Both would greatly improve on the overall efficiency of the system.

## References

1. Huang Y., Newman K. (2012). Improve quality of care with remote activity and fall detection using ultrasonic sensors. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, USA.

2. Gong, S., Wang, Y., Zhang, M., Wang, C. (2017). Design of remote elderly health monitoring system based on MEMS sensorsю. *IEEE International Conference on Information and Automation*, China.

3. Saranya, M., Preethi, R., Rupasri, M., Veena S. (2018). A survey on health monitoring system by using IOT. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, *6* (III), 778–782.

4. Malasinghe, L., Ramzan, N., Dahal, K. (2019). Remote patient monitoring: a comprehensive study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, *10* (1), 57–76.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 621.38:614.8*

*Моханад Абдулхамід, Ден Пітер*

# ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ЗДОРОВ'Я: ВИЯВЛЕННЯ ПАДІНЬ

***Актуальність теми дослідження.*** *Падіння - серйозне питання охорони здоров'я серед літнього населення; це може призвести до критичних травм, як переломи стегна. Іммобілізація, спричинена травмою чи несвідомістю, означає, що потерпілий не може викликати собі допомогу.*

***Постановка проблеми.*** *Метою даної роботи є розробка та створення системи виявлення падіння. Система складається з пристрою моніторингу, який бездротово зв'язується з ноутбуком. Пристрій здатний точно розрізняти падіння і не падіння.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Системи охорони здоров'я у світі зазнали величезного розвитку за останні 50 років. На початку 1960-х у нас були комп'ютери у вигляді мейнфреймів, включених до систем охорони здоров'я. Однак виникли деякі проблеми з їх використанням. Ці мейнфрейми були дуже маленькими, дорогими, великими за розміром і споживали багато електроенергії, і, як результат, їм довелося ділитися декількома лікарнями, оскільки незалежна власність взагалі не була можливою.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Незважаючи на всі зміни, все ще залишалося питання доступності лікування, яке пропонували лікарні з точки зору пацієнтів. Це негативно впливало як на лікарні, так і на пацієнтів. Лікарні не отримували достатньо велику кількість пацієнтів для лікування, тоді як пацієнти вибирали альтернативні схеми лікування.*

***Постановка завдання.*** *Завдання цієї роботи полягає у виявленні падіння та віддаленому перегляді зібраних даних. Алгоритм виявлення падіння розробляється та впроваджується за допомогою програмування на платі Arduino Uno. Віддалений перегляд даних проводиться на ноутбуці після передачі на нього даних виявлення падіння бездротовим способом.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Для виявлення падіння вздовж осі враховується величина прискорення. За вихідними даними акселерометра зміна кута також може бути обчислена за допомогою крапкового добутку. У разі падіння людина відчуває миттєвий вільний падіння, а потім великий сплеск прискорення. Для бездротової передачі даних ми вибираємо модуль HC-05, який є простим у використанні синьозубим модулем SPP (протокол послідовного порту), призначеним для прозорого налаштування бездротового послідовного з'єднання. Для відповідного виявлення падіння ми вибираємо акселерометр. Модуль Bluetooth отримує дані виявлення падіння від мікроконтролера і передає їх на портативний комп'ютер, де ми здійснюємо віддалений перегляд даних.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Метою даної роботи було створити систему виявлення падіння, яка бездротово зв'язується з портативним комп'ютером (де ми маємо віддалений перегляд зібраних даних). Ми досягли первинної мети створення робочої системи, здатної розпізнавати падіння, одночасно бездротово синхронізуючись з ноутбуком.*

***Ключові слова:*** *дистанційний моніторинг здоров'я; виявлення падіння; дизайн.*
*Рис.: 6. Бібл.: 4.*

**Mohanad Abdulhamid** – AL-Hikma University, Iraq.
**Моханад Абдулхамід** – Університет Ал-Хікма, Ірак.
**E-mail:** moh1hamid@yahoo.com

**Deng Peter** – University of Nairobi, Kenya.
**Ден Пітер** – Університет Найробі, Кенія.
**E-mail:** researcher12018@yahoo.com

Abdulhamid, M., Peter, D. (2020). Remote health monitoring: fall detection. *Technical sciences and technologies*, *1* (19), 199-205.

*УДК 629.429.3:621.313*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-206-227*

*Олег Губаревич, Сергій Гулак, Олександр Горобченко, Інна Скляренко*

# УТОЧНЕНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКУ ВТРАТ ТЯГОВОГО ДВИГУНА ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ

***Актуальність теми дослідження.*** *Для визначення ККД і втрат у тяговому двигуні існує багато розрахункових методик, рекомендованих різними авторами. Наведені в методиках співвідношення для розрахунку деяких видів втрат мають відмінності. Крім того, рекомендуються для розрахунків різні діапазони, в яких змінюються нормувальні коефіцієнти в однакових розрахункових формулах, що призводить до значних варіацій кінцевих результатів. Для попередньої, якісної оцінки, будь-яка з методик цілком відповідає вимогам завдань. Однак для прийняття технічних рішень на етапі проєктування або модернізації конструкції і, особливо, аналізу впливу живлення, режимів роботи та управління на параметри двигуна, доцільно дотримуватися єдиного підходу при обліку втрат для адекватності порівняння отриманих результатів, проведених різними дослідниками на різних математичних моделях.*

***Постановка проблеми.*** *Питання аналізу й уточнення розрахунку втрат у тягових двигунах в єдиному методичному порядку, а також уявлення про рівень відмінностей, одержуваних результатів для різних розрахункових співвідношень, особливо з огляду на постійну модернізацію і активне застосування тягових двигунів пульсуючого струму на залізничному транспорті при проведенні досліджень та моделюванні.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Багато провідних авторів, які займалися питаннями проєктування і розрахунку тягових двигунів постійного струму, приводять співвідношення для розрахунку найбільш значущого виду втрат – основних втрат у сталі, які мають відмінності в загальному вигляді співвідношень або в деяких коефіцієнтах, а головне, відрізняються кінцевим результатом.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Точне визначення втрат потужності в двигунах, при існуючому стані речей являє собою задачу, в якій неможливе визначення єдино правильного результату, оскільки заводи-виробники не надають у довідковій літературі необхідну інформацію щодо методики розрахунку, а в паспортних даних вказують виміряні показники.*

***Мета і завдання дослідження.*** *Метою цієї роботи є аналіз існуючих методик для розрахунку всіх видів втрат у тяговому двигуні пульсуючого струму, що дозволить уточнити порядок розрахунку й отримати значення параметрів втрат двигуна для використання їх при проведенні подальших досліджень.*

***Виклад основного матеріалу.*** *У роботі проведено аналіз співвідношень із розрахунку всіх видів втрат, згідно з різними методиками, із розрахунком їх фактичних значень на прикладі конструкції тягового двигуна НБ-418К6 потужністю 740 кВт.*

***Висновки відповідно до статті.*** *На підставі проведеного аналізу та розрахункових досліджень, використовуваних співвідношень і проведених розрахунків отримані значення сумарних втрат у тяговому двигуні пульсуючого струму і втрати по кожному їх виду, виконані з урахуванням реальної конструкції і властивостей використовуваних матеріалів у двигуні НБ-418К6. Встановлено, що найбільш значущі відмінності мають співвідношення розрахунку магнітних втрат з різним урахуванням вихрових струмів у сталі. При розрахунку електричних втрат розбіжності в розрахунках можуть бути пов'язані з некоректним урахуванням фактичної робочої температури кожної обмотки, що позначається на точності визначення їх опорів. Також проведено аналіз розрахунку додаткових і механічних втрат на прикладі зазначеного двигуна з використанням різних співвідношень. Отримані значення ККД для розглянутого тягового двигуна, що розраховані з використанням різних методик, знаходяться в межах 93,64–94,14 %. На підставі проведених розрахунків і аналізу втрат рекомендована комбінована методика для застосування та оцінки ККД при проведенні подальших досліджень тягових двигунів. Розрахунок ККД за пропонованою (комбінованою) методикою для досліджуваного двигуна становив 94,25 %. Отримані значення кожного виду втрат можуть бути прийняті за основу для проведення оцінювання адекватності моделі при імітаційному моделюванні тягового двигуна пульсуючого струму НБ-418К6 з використанням Simulink.*

***Ключові слова****: тяговий двигун; пульсуючий струм; магнітні втрати; електричні втрати; додаткові втрати; сердечник якоря; питомі магнітні втрати*

*Рис.: 2. Табл.: 7. Бібл.: 28.*

**Актуальність теми дослідження.** Нині є проблема єдиного підходу до розрахунку втрат тягового двигуна пульсуючого струму, яка загострюється в умовах сучасних тенденцій математичного моделювання електричних машин і процесах, що в них проходять. Актуальність її визначається необхідністю проведення аналізу режимів роботи при розробці нових двигунів, вдосконалення існуючих, оцінці необхідності розробки спеціальних методів управління тяговими двигунами. У цій роботі проаналізовані та впорядковані співвідношення розрахунку всіх видів втрат для визначення коефіцієнта корисної дії (ККД) тягового двигуна. Наведені співвідношення перевірені порівнянням ручного розрахунку і паспортних даних тягового двигуна з уточненою методикою розрахунку втрат.

© Губаревич О. В., Гулак С. О., Горобченко О. М., Скляренко І. Ю., 2020

Усі основні методики з розрахунку та проєктування машин постійного струму і тягових машин належать таким авторам, чиї роботи взяті за основу у процесі проведення аналізу: А. Б. Іоффе [1], П. С. Сергєєву [2], М. Д. Находкіну [3], І. П. Копилову [4-7], А. Є. Алексєєву [8], А. С. Курбасову [9]. Теорія і природа втрат у машинах постійного струму докладно розглянута в роботах А. І. Вольдека [10], О. Д. Гольдберга [11], М. П. Костенко і Л. М. Піотровкого [12] та ін.

З огляду на достатню різноманіття методик, в яких можуть відрізнятися деякі співвідношення і діапазони рекомендованих значень коефіцієнтів, спостерігаються значні варіації кінцевих результатів, що отримуються. Для попередньої, якісної, оцінки будь-яка з методик цілком відповідає вимогам завдань, що вирішуються [13; 14]. Однак для прийняття технічних рішень на етапі проєктування або модернізації конструкції і, особливо, аналізі впливу якості живлення, режимів роботи та управління на параметри двигуна, доцільно дотримуватися єдиного підходу при врахуванні втрат для адекватності порівняння отриманих результатів, проведених різними авторами на різних математичних моделях [15].

Отже, точне визначення втрат потужності в двигунах, при існуючому стані речей являє собою задачу, в якій неможливе визначення єдино правильного результату, оскільки заводи-виробники не надають в довідковій літературі необхідну інформацію щодо методики розрахунку, а в паспортних даних вказують виміряні показники.

У зв'язку з цим питання аналізу й уточнення розрахунку втрат у тягових двигунах в єдиному методичному порядку є актуальним питанням, особливо з огляду на постійну їх модернізацію та активне застосування в залізничному транспорті.

**Аналіз останніх публікацій і постановка проблеми.** У теорії і практиці електричних машин застосовується методика, відповідно до якої втрати потужності $\Delta P$ представляють сумою двох складових – постійних $\Delta P_{пост}$ і змінних втрат $\Delta P_{зм}$, тобто:

$$\Delta P = \Delta P_{пост} + \Delta P_{зм}. \quad (1)$$

До постійних втрат відносяться втрати потужності, які приймають незалежними від навантаження двигуна, а саме: втрати в сталі магнітопроводу, механічні втрати й вентиляційні втрати. Для двигунів постійного струму з незалежним збудженням до постійних втрат зазвичай відносять і втрати в обмотках збудження [10-12].

Постійні втрати в дійсності не є незмінними, а залежать від багатьох факторів і режимів у період роботи тягового двигуна, проте, оскільки ці види втрат змінюються незначно, то вони приймаються незмінними й рівними номінальним постійним втратам.

Змінними втратами, є втрати, які утворюються в обмотках двигунів при протіканні по ним струмів, зумовлених механічним навантаженням тягового двигуна [3].

Загальна потужність втрат, що виникають при роботі тягового електродвигуна, може бути поділена на:

1) потужність магнітних втрат у сталі $\Delta P_{ст}$, що виділяються в основному в активній сталі якоря і зумовлених гістерезисом та вихровими струмами;

2) потужність електричних втрат $\Delta P_{ел}$ в обмотках двигуна й у колекторно-щітковому контакті;

3) потужність додаткових втрат $\Delta P_{дод}$, величина яких залежить від струму навантаження;

4) потужність механічних втрат $\Delta P_{мех}$ від тертя в підшипниках, на колекторі, тертя обертових частин якоря о повітря і аеродинамічних втрат, викликаних вентилятором (в разі самовентиляції).

Таким чином, у загальному випадку, сумарні втрати в двигуні:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{ст} + \Delta P_{ел} + \Delta P_{дод} + \Delta P_{мех}, \quad (2)$$

де $\Delta P_{ст}$ – основні (магнітні) втрати в сталі в режимі холостого ходу, Вт;

$\Delta P_{ел}$ – основні (електричні) втрати в міді, Вт;

$\Delta P_{дод}$ – додаткові втрати в сталі при навантаженні, Вт;

$\Delta P_{мех}$ – механічні втрати, Вт.

При розрахунковому визначенні основних (магнітних) втрат осердя статору розбивають на ряд ділянок з умови, що в межах кожної з ділянок магнітна індукція незмінна. При цьому втрати на гістерезис і вихрові струми знаходять одночасно, користуючись напівемпіричними формулами, які приводяться в посібниках з проєктування. Розрахунок втрат від гістерезису і вихрових струмів, викликаних перемагнічуванням осердь при холостому ході машини, знаходять, коли магнітний потік розподіляється рівномірно в повітряному зазорі [4; 16].

Додаткові втрати виникають при навантаженні двигуна і складаються з неврахованих втрат в осерді, що виникають через спотворення розподілу магнітного поля в зазорі під впливом реакції якоря, а також втрат, зумовлених нерівномірним розподілом струму в провідниках обмоток і в ковзному контакті. Точний облік додаткових втрат дуже важкий. Тому, в загальному випадку, їх приймають рівними 1 % потужності, що віддається (для генератора) і, що підводиться (для двигуна) в машинах постійного струму без компенсаційних обмоток. Для машин з компенсаційними обмотками ці втрати дорівнюють 0,5 % в [10].

До основних (магнітних) втрат у тягових електричних машинах відносяться втрати в ярмі й зубцях осердя якоря і втрати в сталі полюсних наконечників головних полюсів. Втрати в сталі полюсних наконечників головних полюсів зумовлені зубчастою будовою якоря і самого полюсного наконечника. До основних втрат у сталі також відносять втрати в бандажі, розташованому по активній довжині якоря (якщо він передбачений у конструкції і виконаний зі сталевого дроту). Бандажі зі сталевого проводу згодом були замінені на бандажні стрічки зі скловолокна, які практично не впливають на втрати в сталі [1; 3; 9].

Багато провідних авторів, які займалися питаннями проєктування і розрахунку тягових двигунів постійного струму, приводять співвідношення для розрахунку найбільш значимого виду втрат – основних втрат у сталі, які мають відмінності в загальному вигляді співвідношень або в деяких коефіцієнтах, а головне, відрізняються кінцевим результатом, що буде встановлено далі [1; 3; 7; 9].

**Мета і завдання дослідження.** Метою цієї роботи є аналіз існуючих методик для розрахунку всіх видів втрат в тяговому двигуні пульсуючого струму, що дозволить запропонувати уточнений порядок розрахунку й отримати фактичні значення параметрів втрат двигуна для використання їх при проведенні подальших досліджень.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих основних методик по розрахунку всіх видів втрат в тяговому двигуні пульсуючого струму;

- виконати повний розрахунок тягового двигуна НБ-418К6, на підставі якого визначити і проаналізувати фактичні значення втрат по співвідношенням, запропонованим різними авторами;

- встановити види втрат, які мають великі розходження отриманих кінцевих значень, виконаних за різними співвідношеннями;

- визначити комбіновану методику для подальшого застосування при розрахунку ККД у дослідженнях тягових двигунів;

- визначити значення кожного виду втрат, для використання при побудові імітаційної моделі тягового двигуна пульсуючого струму в одному з програмних пакетів і проведенні оцінки адекватності імітаційної моделі.

**Виклад основного матеріалу.** Проведемо аналіз співвідношень з розрахунку всіх видів втрат, що враховуються в різних методиках з розрахунком їх значень на прикладі конструкції тягового двигуна НБ-418К6 потужністю 740 кВт.

Розглянемо співвідношення, що найбільш часто застосовуються для розрахунку магнітних (основних) втрат за питомими втратами в сталевих ділянках осердя і зубців якоря двигуна і масами відповідних ділянок $\Delta P_{ст.а}$ у вигляді, наведеному в роботі А. Б. Іоффе [1]. Згідно з [1] втрати в сталі пакета якоря включають також поверхневі в башмаку полюса і складаються із втрат на гістерезис $\Delta P_{гіст}$ і втрат на вихрові струми $\Delta P_{вихр.стр}$:

$$\Delta P_{ст.а} = \Delta P_{гіст} + \Delta P_{вихр.стр} = 2,7 \cdot \left( \rho_a \cdot G_a + \rho_z \cdot G_z \right), \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{3}$$

де $\rho_a$ і $\rho_z$ – питомі магнітні втрати в якорі і зубцях відповідно, Вт/кг;

$G_a$ – маса сталі спинки якоря, кг;

$G_z$ – маса сталі зубців якоря, кг.

Питомі магнітні втрати в якорі й зубцях визначаються як:

$$\rho_a = \left[ 4,4 \cdot \frac{f}{100} + 5,6 \cdot \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot B_a^2, \tag{4}$$

$$\rho_z = \left[ 4,4 \cdot \frac{f}{100} + 5,6 \cdot \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \cdot B_{z1/3}^2, \tag{5}$$

де $B_a$, $B_{z1/3}$ – розрахункова індукція в режимі, що розглядається (часовому), в ярмі якоря і зубцях якоря на $^1/_3$ висоти від основи, Тл.

$f$ – частота перемагнічування осердя якоря в номінальному режимі, Гц:

$$f = \frac{p \cdot n_{дв}}{60},$$

де $p$ – число пар полюсів;

$n_{дв.}$ – частота обертання валу двигуна, об/хв.

Маса сталі спинки якоря, кг:

$$G_a = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ \left( D_a - 2 \cdot h_n \right)^2 - D_i^2 - m_к \cdot d_к^2 \right] \cdot l_\delta \cdot k_{ст} \cdot \rho_{ст}, \tag{6}$$

де $D_a$ – діаметр якоря зовнішній, м;

$h_n$ – висота паза, м;

$D_i$ – діаметр якоря внутрішній, м;

$m_k$ – загальна кількість вентиляційних каналів;

$d_k$ – діаметр вентиляційного каналу, м;

$l_б$ – довжина пакету якоря, м;

$k_{ст}$ – коефіцієнт заповнення пакета якоря сталлю (сталь листів якоря має ізоляційне покриття для зниження втрат на вихрові струми). При електроізоляційному покритті $k_{ст} = 0,97$, при лаковому $k_{ст} = 0,94$;

$\rho_{ст} = 7800$ – густина сталі, кг/м$^3$.

Маса сталі зубців якоря, кг:

$$G_a = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ \left( D_a - 2 \cdot h_n \right)^2 - D_i^2 - Z \cdot b_n \cdot h_z \right] \cdot l_\delta \cdot k_{ст} \cdot \rho_{ст}, \tag{7}$$

де $b_п$ – ширина паза, м;

$h_z$ – висота зубця, м;

$Z$ – число пазів якоря.

Коефіцієнти у формулах (4) і (5), відповідно до коментарів автора, дані для сталі, що застосовується в конструкціях якорів тягових машин 1212 (Е12). Для інших марок сталей розраховані питомі втрати $\rho_a$ і $\rho_z$ необхідно зменшити приблизно пропорційно кореню квадратному з відношення питомих втрат для сталі 1212 (Е12) та іншої марки за значенням для 50 *Гц* і 1,0 *Тл* – при товщині листа 0,5 мм. Наприклад, в такому випадку, значення коефіцієнта зниження питомих втрат кожної ділянки, розрахованого по вище наведеним співвідношенням для сталі 1312 (Е22), яка застосовується в цій конструкції двигуна НБ-418К6, враховуючи табл. 1, становитиме:

$$k = \sqrt{\frac{3,1}{2,2}} = 1,19. \tag{8}$$

Таблиця 1

*Питомі втрати в електротехнічній сталі при товщині листа 0,5 мм*

| Марка сталі | $\rho_{1.0/50}, Вт/кг$ | $\rho_{1.5/50}, Вт/кг$ | Марка сталі | $\rho_{1.0/50}, Вт/кг$ | $\rho_{1.5/50}, Вт/кг$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1211 | 3,3 | 7,7 | 1412 | 1,8 | 3,9 |
| 1212 | 3,1 | 7,2 | 1511 | 1,55 | 3,5 |
| 1213 | 2,8 | 6,5 | 1512 | 1,4 | 3,1 |
| 1311 | 2,5 | 6,1 | 1513 | 1,25 | 2,9 |
| 1312 | 2,2 | 5,3 | 3411 | 1,1 | 2,45 |
| 1411 | 2,0 | 4,4 | 3412 | 0,95 | 2,1 |

Треба відзначити, що в існуючих електричних машинах в основному застосовуються електротехнічні стали марок 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1411, 1412, 1511, 1512 3411, 3412, 3413, які відповідають старим позначенням Е11, Е12, Е13, Е21, Е22, Е31, Е32, Е41, Е42, Е310, Е320, Е330 [10].

Якщо потрібно виокремити втрати в полюсних башмаках із втрат у сталі, розрахованих по (3), то їх окремо можна визначити [1]:

$$\Delta P_{б.п.} = k_{б.п.} \cdot \left(\frac{Z \cdot n_{дв}}{10000}\right)^{1.5} \cdot \left[\left(k_{\delta} - 1\right) \cdot B_{\delta} \cdot t_1\right] \cdot 2p \cdot \alpha \cdot \tau \cdot l_{\delta}, \tag{9}$$

де $Z$ – число пазів;

$n_{дв.}$ – частота обертання, об/хв;

$k_б$ – коефіцієнт повітряного зазору;

$B_б$ – індукція в повітряному зазорі, Тл;

$t_1$ – зубцевий крок якоря, м;

$2p$ – число полюсів;

$\alpha$ – коефіцієнт полюсного перекриття;

$\tau$ – полюсний поділок, м;

$l_б$ – довжина осердя якоря, м;

$k_{б.п.}$ – коефіцієнт, що враховує конструкцію полюса: $k_{б.п}$ = 4 для полюсів зі сталі товщиною 1,5 мм, $k_{б.п}$ = 2,8 для сталі товщиною 1,0 мм, для суцільних полюсів $k_{б.п}$ = 14.

У роботі М. Д. Находкіна [3] для розрахунку основних втрат у сталі рекомендовано також співвідношення (1), але з експериментально встановленим діапазоном коефіцієнту на початку формули, що враховує марку стали, Вт:

$$\Delta P_{ст.а} = \Delta P_{гіст} + \Delta P_{вихр.стр} = (2,4 + 2,7) \cdot (\rho_a \cdot G_a + \rho_z \cdot G_z), \quad (10)$$

де $\rho_a$, $\rho_z$, $G_a$, $G_z$, визначаються за виразами (4), (5), (6), (7) відповідно.

У коментарях автора до виразу (3) зазначено, що коефіцієнти в формулах (4) і (5) дані для сталі 1211 (Е11), що застосовується в якорях тягових машин. Для інших марок сталей змінюють питомі втрати $\rho_a$ і $\rho_z$ пропорційно кореню квадратному з відношення питомих втрат для сталі 1211 (Е11) і іншої марки за даними 50 *Гц* і 1,0 *Тл*. Тоді значення коефіцієнту зменшення втрат, розрахованого по вище наведеним співвідношенням для сталі 1312 (Е22), яка найбільш часто застосовується для якорів цих типів машин, враховуючи дані табл.1., складе:

$$k = \sqrt{\frac{3,2}{2,2}} = 1,22. \quad (11)$$

Коефіцієнт 2,4 у формулі (10) відноситься до сталі марки 1312 (Е22, Е1300) з питомими втратами 2,2 *Вт/кг* [3]. У роботі Д. Д. Захарченко [17] наводиться діапазон зміни коефіцієнта у формулі (3) $k$ = 1,25–2,7, де зазначено, що це коефіцієнт, який враховує неоднорідність магнітопроводів і розподілу магнітних потоків в осерді. У процесі різання і штампування листів в області контакту з різальним інструментом виникають пластичні деформації, викликані наклепом. Унаслідок наклепу відбувається збільшення питомих втрат, переважно за рахунок збільшення втрат на гістерезис. Це зумовлено тим, що в областях, прилеглих до місця розрізу, відбувається деформація кристалічної решітки, що призводить до зростання втрат на перемагнічування. При розрізанні, згідно [18-20], зростання питомих втрат у сталі становить приблизно 10 %. При штампуванні пластин магнітні властивості сталі погіршуються ще більшою мірою, ніж при розрізанні, в результаті пластичної деформації, особливо в місцях прилягання штампу. При цьому зростання питомих втрат досягає приблизно 44 %, тобто в процесі розрізання та штампування питомі втрати можуть зрости майже в 1,5 раза.

У роботі В. І. Бочарова [21] для розрахунку магнітних втрат у сталі використовується так само співвідношення (1), а для вибору коефіцієнта втрат залежно від марки сталі запропонована табл. 2.

Таблиця 2

*Значення коефіцієнтів втрат від марки сталі*

| Марка сталі | 1212 (Е12) | 1213 (Е13) | 1311 (Е21) | 1312 (Е22) |
|---|---|---|---|---|
| Коефіцієнт втрат | 2,7 | 2,55 | 2,4 | 2,25 |

У роботі [9] у виразі

$$\Delta P_{ст.а} = k_{xx} \cdot (\rho_a \cdot G_a + \rho_z \cdot G_z) \quad (12)$$

рекомендується застосовувати розрахунковий емпіричний коефіцієнт, що враховує збільшення втрат у сталі через якість шихтовки, наклепу при штампуванні, а також всі види додаткових втрат холостого ходу

$$k_{xx} \approx 0,8 \cdot \sqrt{\rho_{1.5/50}}, \quad (13)$$

де $\rho_{1,5/50}$ Вт/кг – питомі втрати в електротехнічній сталі при В = 1,5 Тл і f =50 Гц. Для сталі марки 1312 (Е22) товщиною 0,5 мм $\rho_{1,5/50}$ =5,3 Вт/кг.

Слід враховувати, що застосування сучасних марок сталі з меншими питомими втратами дозволяє підвищити ККД і зменшити витрату електроенергії.

При розрахунку ККД, повне значення основних втрат в сталі машини, при використанні рівняння (12), можна отримати збільшенням втрат в якорі на 10-30% з огляду на втрати в бандажі та інші невраховані втрати[9]:

$$\Delta P_{ст} = (1,1 - 1,3) \cdot \Delta P_{ст.а} \quad (14)$$

Орієнтовно рекомендується прийняти при проведенні розрахунку ККД $\Delta P_{cm} = 1{,}15 \cdot \Delta P_{cm.a}$ [9].

В роботі Алексєєва А.Є. [8], для розрахунку магнітних втрат в якорі без врахування додаткових втрат рекомендується наступне співвідношення, виражене через об‘єми зубцевої зони і осердя якоря:

$$\Delta P_{cm.a} = \sigma_{Fe} \cdot f^{1.6} \cdot 10^2 \cdot \left( B_{z1/3}^2 \cdot V_z \cdot k_z + B_a \cdot V_a \right), \quad (15)$$

де $\sigma_{Fe}$ – коефіцієнт, що враховує марку сталі: для стали 1211 (Е11) товщиною листа 0,5 дорівнює 1,5, а для сталі 1312 (Е22) – 0,5 дорівнює 0,9;

$f$ – частота перемагнічування осердя якоря в номінальному режимі, Гц;

$B_a$, $B_{z1/3}$, – індукція в ярмі і зубцях якоря на 1/3 висоти від основи, Тл;

$V_z$, $V_a$, – об‘єм зубців і осердя якоря, м$^3$;

$k_z$ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу індукції по висоті зубця.

Коефіцієнт $k_z$ вибирається з рис. 1 за значенням відношення розмірів зубця у верхній частині і біля основи $z_2 / z_1$:

$$k_z = f\left(z_2 / z_1\right) \quad (16)$$

де $z_1$ – ширина зубця по зовнішній поверхні якоря $z_1 = t_1 - b_n, м$;

$z_2$ – ширина зубця біля основи $z_2 = t_2 - b_n, м$;

$t_1$ – пазовий розподіл, м;

$t_2$ – зубцевий розподіл по дні пазу, м;

$b_n$ – ширина пазу, м.

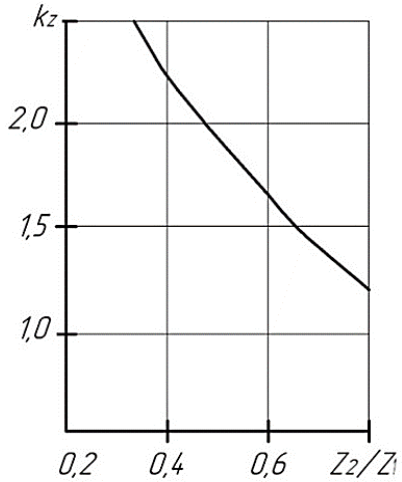



*Рис. 1. Коефіцієнт трапецеїдальності форми зубців якоря*

Об’єм осердя якоря, м$^3$:

$$V_a = \frac{\pi}{4} \cdot \left[ \left( D_a - 2 \cdot h_z \right) \cdot 2 - 2 \cdot D_i - 2 \cdot m_к \cdot d_к \right] \cdot k_{cm}, \quad (17)$$

де $D_i$ – внутрішній діаметр якоря, м:

$$D_i = D_a - 2 \cdot \left( h_z - h_a - \frac{1}{2} \cdot m_к \cdot d_к \right). \quad (18)$$

Об’єм зубців, м$^3$:

$$V_z = Z \cdot z_{cep} \cdot h_z \cdot k_{cm}, \quad (19)$$

де $z_{cep} = \left( z_1 + z_2 \right) / 2$ – середня ширина зубця, м.

У роботах І. П. Копилова [4-7] для розрахунку магнітних втрат у сталі якоря використовуються співвідношення:

- для розрахунку магнітних втрат в ярмі якоря, Вт:

$$\Delta P_a = k_{да} \cdot \rho_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot B_a^2 \cdot G_a, \quad (20)$$

- для розрахунку магнітних втрат у зубцях якоря, Вт:

$$\Delta P_z = k_{дz} \cdot \rho_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot B_z^2 \cdot G_z, \quad (21)$$

де $\rho_{1,0/50}$ – питомі втрати в листовій електротехнічній сталі при магнітній індукції В = 1,0 Тл і частоті перемагнічування f = 50 Гц. Для сталі 1312 (Е22) $\rho_{1,0/50}$ = 2,2 Вт/кг;

$\beta$ – коефіцієнт зміни питомих втрат залежно від частоти перемагнічування, залежить від типу сталі. Значення коефіцієнта лежить у діапазоні від 1,2 (для високолегованих) до 1,5 (для слаболегованих сталей);

$k_{да}$, $k_{дz}$ – коефіцієнти збільшення втрат унаслідок недосконалості технології виготовлення пакета якоря (наклеп при штампуванні, замикання листів через наявність задирок і пошкодження ізоляції листів і ін.), а також через несинусоїдальність закону зміни індукції в часі й наявності обертального перемагнічування. Для машин постійного струму $k_{да} = k_{дz}$ = 2,3; для машин змінного струму $k_д$ = 1,3 – 1,8.

Маса сталі зубців якоря $G_z$ і маса сталі спинки якоря $G_a$, розраховуються по (6) і (7).

Втрати в сталі якоря складаються з магнітних втрат в ярмі якоря (20) і в зубцях якоря (21):

$$\Delta P_{ст.а} = \Delta P_a + \Delta P_z. \quad (22)$$

При розрахунку основних втрат враховується, що магнітні втрати залежать від марки сталі, товщини листів магнітопроводу, індукції і частоти перемагнічування. Значний вплив на магнітні втрати надають технологічні чинники - штампування листів, пресування пакетів, механічна обробка магнітопроводу і ін. В таблиці 3 наведені значення питомих втрат при індукції 1,0 *Тл*, частоті перемагнічування 50 *Гц* і коефіцієнта $\beta$ для різних марок сталі при товщині листа 0,5 мм [4].

При невеликих значеннях індукції втрати на гістерезис при обертальному перемагнічуванні менше втрат на гістерезис при пульсаційному перемагнічуванні (вони можуть відрізнятися в 2 рази). Однак при індукціях 1,5–1,7 *Тл* втрати в сталі при обох видах перемагнічування стають приблизно однаковими [22-24].

Таблиця 3

*Значення коефіцієнта β для різних марок стали*

| Марка сталі | $\rho_{1,0/50}$, Вт/кг | $\beta$ |
|---|---|---|
| 2013, 2011, 2211 | 2,5–2,6 | 1,5 |
| 2312 | 1,75 | 1,4 |
| 2411 | 1,6 | 1,3 |

Розглядаючи окремі ділянки магнітної системи при обертальному перемагнічуванні, слід зазначити, що існують ділянки, де є радіальна і тангенціальна складові індукції, і можна представити перемагнічування як еліптичне [16]. Еліптичне перемагнічування називають змішаним, оскільки його можна уявити як накладення обертального й пульсаційного перемагнічування.

При проєктуванні електричних машин користуються таблицями питомих втрат, отриманих на апараті Епштейна при пульсаційному перемагнічуванні 1 кг маси листової сталі при частоті 50 *Гц* і індукції 1 *Тл*. Питомі втрати для різних марок сталі наведені в роботах [5; 16].

Через наявність у формулах для визначення втрат у сталі значних емпіричних коефіцієнтів, що враховують обробку сталі, уточнення питомих втрат залежно від характеру перемагнічування окремих ділянок магнітопроводу має сенс лише в особливих випадках.

Для розрахунку втрат в роботі Вольдека А.І. [10] наведені співвідношення, аналогічні тим, які розглянуті у виразах (12) і (13), але з іншими значеннями коефіцієнтів:

- магнітні втрати в ярмі, Вт:

$$\Delta P_a = k_{да} \cdot \rho_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1.3} \cdot B_a^2 \cdot G_{са}, \quad (23)$$

- магнітні втрати в зубцях, Вт:

$$\Delta P_z = k_{дz} \cdot \rho_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1.3} \cdot B_z^2 \cdot G_{cz}, \quad (24)$$

де $\rho_{1,0/50}$, Вт/кг, – питомі втрати в сталі при частоті f = 50 Гц і індукції В = 1,0Тл;

$B_a$ и $B_z$ – середнє значення індукції в спинці якоря і зубцях, Тл;

$G_a$ та $G_z$ – маси сталі спинки якоря і зубців, кг;

$k_{да}$, та $k_{дz}$ – коефіцієнти, що враховують збільшення втрат внаслідок обробки. В машинах постійного струму можна прийняти $k_{да}$,=3,6 і $k_{дz}$ =4,0.

Як видно з проведеного аналізу, ряд співвідношень для розрахунку основних втрат в якорі мають схожий вигляд, але відрізняються коефіцієнтами.

До основних втрат у стали відносять також і втрати в бандажах (якщо вони є) $\Delta P_б$, які рекомендовані до обліку багатьма авторами [1; 3; 8]. Тоді

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст.а} + \Delta P_б. \quad (25)$$

Бандажі в двигунах типу НБ-418К6 намотують зі спеціального сталевого дроту, що має високу механічну міцність ($180\ кг/мм^2$) з контрольованою величиною натягу. Натяг забезпечує притискання провідників до дна пазу з більшою силою, ніж центробіжна сила при обертанні якоря, що забезпечує фіксоване положення обмотки в пазах. Розрахунок бандажа зводиться до визначення загального числа витків бандажного проводу $w_б$, кількості бандажів $m$ по довжині якоря і довжини бандажної канавки $l_б$, які знаходять, попередньо визначаючи діаметр бандажного проводу $d_б$. Діаметр бандажного проводу вибирається за табл. 4 залежно від діаметра якоря, що враховує зростання окружної швидкості, забезпечуючи необхідну міцність [25].

Таблиця 4

*Діаметр бандажного дроту якорів тягових двигунів*

| Діаметр якоря, мм | 100-200 | 201-400 | 401-600 | 601-1000 | Більше 1000 |
|---|---|---|---|---|---|
| Діаметр дроту бандажа, мм | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,5 | 2,0 |

Для розрахунку втрат у бандажі попередньо необхідно розрахувати число витків бандажного проводу, використовуючи вагу обмотки, що лежить в пазах якоря за співвідношенням:

$$G_{об} = \rho \cdot a \cdot b \cdot N \cdot l_\delta, \quad (26)$$

де $\rho$ – щільність міді 8800 кг/м$^3$;

$a$, $b$ – розміри сторін міді провідника, м;

$N$ – число провідників обмотки якоря;

$l_б$ – довжина сердечника якоря, м.

Для двигуна, що розглядається, маса обмотки становить $G_{об}$ = 60,28 кг. З огляду на незначну величину поля розсіювання в бандажах лобових частин, втратами на цих ді-

лянках можна знехтувати, тому далі розраховується тільки число витків бандажного проводу по довжині поверхні якоря.

Для розрахунку загального числа витків бандажного проводу якоря використовується співвідношення:

$$w_б = 1,2 \cdot \left( G_{об} \cdot \frac{D_a - h_n}{d_б^2 \cdot 3000} \right) \cdot \left( \frac{n_{\max}}{1000} \right)^2, \quad (27)$$

де $n_{\max}$, з міркувань розрахункового запасу міцності бандажа для тягових машин пульсуючого струму, приймають $(1,5-3,0) \cdot n_{ном}$;

$d_б$ – діаметр бандажного проводу згідно з табл. 2 ($d_б$ = 1,5 мм).

Для двигуна НБ-418К6, що розглядається, з урахуванням $n_{\max} = 1,5 \cdot n_{\text{ном}}$ загальне число витків бандажа, намотаних на осердя якоря згідно з (27), становило 124 витка. Практикою встановлено, що по активній довжині якоря бандажі недоцільно робити ширше за 15–20 мм і перекривати ними більш 25-35 % поверхні якоря.

Найбільш докладно розрахунок втрат у бандажах розглянуто в роботах [1; 8; 21]. Він заснований на врахуванні впливу струму, що виникає в стрічці бандажа, внаслідок виникнення електрорушійної сили (ЕРС) під час обертання якоря в магнітному полі. ЕРС, що виникає, можна визначити, В:

$$e = B_\delta \cdot l_б \cdot v_a, \quad (28)$$

де $v_a$ – окружна швидкість якоря, м/с;

$l_б$ – ширина бандажної канавки, м:

$$l_б = d_б \cdot m_б, \quad (29)$$

де $d_б$ – діаметр бандажного дроту, *м*;

$m_б$ – число витків бандажного дроту в одній канавці.

Тоді втрати в розрахованому бандажі можна визначити, *Вт*:

$$\Delta P_б = \frac{e^2}{r} \cdot 2p, \quad (30)$$

де $2p$ – число полюсів;

$r$ – опір шляху струму $i_b$ в стрічці бандажа, який приблизно можна визначити, Ом:

$$r = \frac{2 \cdot \tau \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \rho}{0,5 \cdot l_б \cdot d_б}, \quad (31)$$

де $\rho$ – питомий опір проводу бандажа. Для сталі $\rho = 1,03 \cdot 10^{-7} - 1,37 \cdot 10^{-7}$ *Ом · м*;

$\alpha$ – коефіцієнт полюсного перекриття;

$\tau$ – полюсний поділ, *м*:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p}. \quad (32)$$

Остаточно, після підстановки в (30) значення ЕРС і опору з (28) і (31) отримано вираз для, порівняно, точного обліку втрат в бандажі:

$$\Delta P_{1б} = \frac{\pi \cdot D_a \cdot p \cdot d_б \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2 \cdot B_δ^2 \cdot l_б^2}{\left(\frac{1}{p} - \frac{\alpha}{2p}\right) \cdot \rho}. \quad (33)$$

За отриманим співвідношенням (33) виконується розрахунок втрат в одній стрічці бандажа. Для отримання остаточного результату необхідно врахувати в співвідношенні (30) число бандажів $m$ і коефіцієнт, що враховує магнітні властивості дроту бандажа $C_б$. Для магнітного дроту $C_б = 0,2$, а для немагнітного $C_б = 0,1$ [8].

Тоді

$$\Delta P_б = C_б \cdot m \cdot \Delta P_{1б}. \quad (34)$$

У такому випадку втрати в бандажі для двигуна НБ-418К6 по (34), з огляду на 7 бандажних стрічок, становитимуть $\Delta P_б$ = 842,51 Вт.

Для визначення втрат у бандажі використовують також приблизну величину, що становить 10 % від основних втрат у сталі [6], Вт:

$$\Delta P_б = 0,1 \cdot \Delta P_{ст.а}. \quad (35)$$

У сучасних двигунах застосовують склобандажні стрічки, втрат в яких, практично, немає.

Електричні (основні) втрати в обмотках двигуна або втрати в міді є змінними і визначаються струмом, що протікає по ним і активним розрахунковим опором кожної обмотки. При розрахунку слід враховувати, що при визначенні ККД тягового електродвигуна втрати в міді його обмоток згідно ГОСТ 2582-81 повинні бути приведені до робочої температури $115^{\circ}C$ для обмоток з ізоляцією класу $B$ і $130^{\circ}C$ - для обмоток з ізоляцією класу $F$ і $H$. В тяговому двигуні НБ-418К6 потужністю 740 кВт, відповідно до паспортних даних, обмотка якоря і компенсаційна обмотка виконані з ізоляцією класу $B$, а обмотка збудження і додаткових полюсів класу $H$ [26]. Отриманий в розрахунку опір відповідає температурі навколишнього середовища $20^{\circ}C$. Для приведення опору до робочої температури обмоток необхідно застосувати коефіцієнти для мідних провідників, розраховані за співвідношенням, наведеним в [27]:

$$r_2 = r_1 \cdot \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1}, \quad (36)$$

де $\theta_1$ – температура навколишнього середовища (приймається $20^{\circ}C$);

$\theta_2$ – робоча температура, до якої потрібно привести опір;

$r_1$, $r_2$ – опори при температурі навколишнього середовища і при робочій температурі, відповідно, Ом.

Тоді

$$r_{(115)} = 1,37 \cdot r_{(20)}, \quad r_{(130)} = 1,43 \cdot r_{(20)}. \quad (37)$$

З урахуванням приведення до робочої температури обмоток якоря, збудження, компенсаційної та додаткових полюсів, сумарні електричні втрати в міді в загальному вигляді можна визначити, Вт:

$$\Delta P_м = I_п^2 \cdot \left(1,37 \cdot r_a + 1,43 \cdot r_{зб} + 1,37 \cdot r_{ком} + 1,43 \cdot r_{д.п}\right), \quad (38)$$

де $I_{ном}$ – номінальний струм, А;

$r_a$, $r_{зб}$, $r_{ком}$, $r_{д.п}$ – активні опори обмоток якоря, збудження, компенсаційної і додаткових полюсів відповідно, при температурі навколишнього середовища $20^{\circ}C$.

Втрати в перехідному щітковому контакті $\Delta P_{щ}$ відносяться до основних електричних втрат, Вт:

$$\Delta P_{е} = \Delta P_{м} + \Delta P_{щ}. \quad (39)$$

Втрати в перехідному щітковому контакті визначаються за падінням напруги в щітковому контакті $\Delta P_{щ}$, Вт:

$$\Delta P_{щ} = \Delta U_{щ} \cdot I_{ном}. \quad (40)$$

Падіння напруги під щітками обох полярностей $\Delta U_{щ}$ приймається залежно від марки щітки й залежить від щільності струму в перехідному контакті і матеріалу щітки. Найбільший опір мають тверді вугільно-графітні, графітні та електро-графітовані щітки; найменший – мідно-графітні щітки. Падіння напруги для конкретної марки зазначено в довідниковій літературі [6]. Для щіток ЕГ-61, які встановлені в двигуні НБ-418К6, $\Delta U_{щ}$ =3 В. В даний час в цих двигунах можуть застосовуватися й інші марки щіток, що необхідно враховувати при розрахунку втрат в щітковому контакті [28].

Додаткові втрати $\Delta P_{дод}$ виникають у машині при навантаженні від неврахованих магнітних втрат. При роботі під навантаженням розподіл індукції по полюсному поділу під впливом реакції якоря спотворюється, що підвищує значення магнітних втрат в полюсних наконечниках, однак при наявності компенсаційної обмотки частка цих втрат мінімальна. Інша частина додаткових втрат пов'язана з комутацією при зміні потоку пазового розсіювання комутованих секцій і впливу вихрових струмів [4]. Врахування цих видів втрат за допомогою математичного опису є складним і недостатньо точним, експериментальне їх визначення також є складним. Тому в практичних розрахунках додаткові втрати визначають у відсотках від втрат у сталі залежно від струму двигуна і враховують коефіцієнтом $k_{дод}$, згідно з таблицею 5 [3; 6; 8].

Таблиця 5

*Коефіцієнт $k_{дод}$ додаткових втрат від струму навантаження*

| $I_{дв}/I_{ном}$ | 0,2 | 0,6 | 0,8 | **1,0** | 1,3 | 1,6 | 2,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $k_{дод}$ | 0,22 | 0,23 | 0,26 | **0,30** | 0,38 | 0,48 | 0,65 |

$$\Delta P_{дод} = k_{дод} \cdot \Delta P_{ст}. \quad (41)$$

Для номінального режиму, що відповідає відношенню $I_{дв}/I_{ном}$ =1,0 із таблиці 2 отримуємо $k_{дод}$=0,3. Тоді $\Delta P_{дод} = 0,3 \cdot \Delta P_{ст}$.

У роботах деяких авторів [1; 3; 9] розрахунок додаткових втрат для компенсованих машин зводиться до визначення комутаційних втрат $\Delta P_{ком}$ з розрахунком коефіцієнта Фільда $k_F$, який використовується при врахуванні збільшення втрат у міді якоря при комутації:

$$\Delta P_{ком} = \left(1 - k_F\right) \cdot I_a^2 \cdot r_a, \quad (42)$$

де $k_F = 1 + 0,425 \cdot m^2 \cdot \xi^2 \cdot \psi \cdot \frac{l_a}{l_{ср}}$;

$m = 2 \cdot u_к \cdot n_y / n_x$ – число шарів провідників по висоті пазу ($u_к$ – число колекторних пластин на паз, $n_x$ – число провідників по довжині пазу, $n_y$ – число елементарних провідників в ефективному провіднику);

$\xi = h_{ел.пр.} \cdot \sqrt{\sum b_m \cdot \pi \cdot f \cdot \lambda_м \cdot \mu_0 / b_п}$ – приведена висота провідника ($h_{ел.пр.}$ – висота елементарного провідника, *м*; $\sum b_m$ – загальна ширина провідників в пазу (по ширині паза), м; $f$ – частота перемагнічування якоря, Гц; $\lambda_м$ – питома електропровідність міді

при робочій температурі, $(Ом \cdot м)^{-1}$; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}\ Гн/м$ – магнітна проникність; $b_n$ – ширина паза, м). При робочій температурі $115^{\circ}C$ можна прийняти $\xi = 12{,}8 \cdot h_{ел.пр.} \cdot \sqrt{\sum b_m \cdot f / b_n}$;

ψ – коефіцієнт, що враховує демпфірування вихрових струмів (рис. 2).

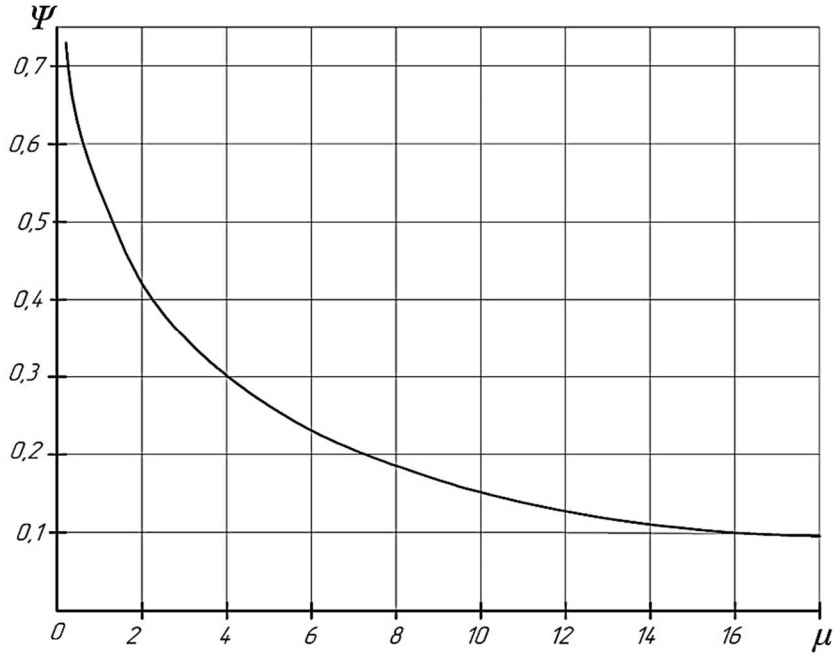



*Рис. 2. Визначення коефіцієнта демпфірування вихрових струмів*

З причини трудомісткості застосування і недостатньої точності існуючих емпіричних співвідношень комутаційних втрат, в роботах авторів [7; 10] додаткові втрати для машин постійного струму при номінальному навантаженні розраховуються наближено. При відсутності компенсаційної обмотки вони приймаються рівними 1,0 % від потужності, що підводиться, а при наявності компенсаційної обмотки – 0,5 %. Для інших навантажень ці втрати перераховуються пропорційно квадрату струму навантаження.

$$\Delta P_{дод} = (0{,}005 - 0{,}01) \cdot I_a^2 \cdot r_a. \tag{43}$$

Механічні втрати $\Delta P_{мех}$ складаються із втрат на тертя щіток об поверхню колектора $\Delta P_{тер.к}$, втрат тертя в підшипниках $\Delta P_{підш}$ і вентиляційних втрат, що визначаються тертям частин двигуна, які обертаються, об повітря або охолоджуючу рідину та інші види втрат, що пов‘язані безпосередньо з забезпеченням вентиляції $\Delta P_{вент}$, Вт:

$$\Delta P_{мех} = \Delta P_{тер.к} + \Delta P_{підш} + \Delta P_{вент}. \tag{44}$$

Втрати на тертя щіток об поверхню колектору в номінальному режимі визначаються [3; 5; 8-10]:

$$\Delta P_{тер.к} = \sum S_щ \cdot p_щ \cdot k_{тер} \cdot v_к, \tag{45}$$

де $\sum S_щ$ – сумарна контактна поверхня всіх щіток, $м^2$;

$p_щ$ – тиск на щітку в залежності від марки за довідковими даними, Па;

$k_{тер} = 0{,}15 - 0{,}30$ – коефіцієнт тертя в залежності від марки щітки;

$v_к$ – окружна швидкість колектору при номінальній частоті обертання, м/с.

Характеристики сучасних щіток марки ЕГ-61, які застосовуються в тягових двигунах НБ-418К6:

- питомий електричний опір – $36-60$ $мкОм \cdot м$;
- твердість – 25–65 Н;
- густина струму – не більше ніж $17 \cdot 10^4$ $А/м^2$;
- коефіцієнт тертя – не більше ніж 0,15;
- лінійна швидкість – 60 м/с;
- номінальний тиск (натискання) на щітку – 40 кПа.

З урахуванням характеристик щіток, що застосовуються на двигуні НБ-418К6, площа перетину щіток одного щіткотримача, $м^2$:

$$\sum S_{щ} = \frac{2 \cdot I_{ном}}{q \cdot j_{щ}} = \frac{2 \cdot 828,7}{6 \cdot 15 \cdot 10^4} = 0,001841, \quad (46)$$

де $j_{щ}$ – густина струму під щіткою, А/м$^2$;

$q = 2p = 6$ – число щіткотримачів.

Втрати на тертя щіток об поверхню колектору для двигуна НБ-418К6 із щітками ЕГ-61 згідно з (45) становлять:

$$\Delta P_{тер.к} = 6 \cdot 0,001841 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 22,5 = 1491,2 \text{ Вт}.$$

Втрати на тертя в підшипниках кочення $\Delta P_{підш}$ можуть бути розраховані для тягових двигунів за емпіричною формулою [8], $Вт$:

$$\Delta P_{підш} = 30 \cdot \sqrt[4]{1000 \cdot P_{ном}}, \quad (47)$$

де $\Delta P_{ном}$ – номінальна потужність двигуна, кВт.

Втрати в підшипниках відповідно до (47) для двигуна НБ-418К6 становили $\Delta P_{підш} = 879,87$ $Вт$.

Втрати потужності на тертя в підшипниках з врахуванням втрат тертя якоря об повітря в практичних розрахунках так само оцінюють приблизно величиною 0,2 % від підведеної потужності при номінальному режимі [3; 9; 10], Вт:

$$\Delta P_{підш} + \Delta P_{тер.об.} = 0,002 \cdot U \cdot I_{ном}. \quad (48)$$

Відповідно до емпіричного співвідношення (48) втрати на тертя в підшипниках, включаючи втрати тертя якоря об повітря для двигуна, що розглядається, становили

$$\Delta P_{підш} + \Delta P_{тер.об} = 1574,53 \text{ Вт}.$$

Втрати на вентиляцію $\Delta P_{вент}$ складаються з двох видів втрат. Це втрати на тертя об повітря частин якоря при обертанні машини $\Delta P_{тер.об}$, що має місце в кожному двигуні, і втрат, пов'язаних безпосередньо з роботою вентилятора і його аеродинамічними властивостями $\Delta P_{р.вент}$.

Втрати на тертя об повітря частин якоря при обертанні машини враховуються так само за емпіричною формулою [8]:

$$\Delta P_{тер.об} = 7 \cdot D_a^4 \cdot \left(l_a + \sum l_в\right) \cdot n_{ном}^3 \cdot 10^{-6}, \quad (49)$$

де $D_a$ – діаметр якоря, м;

$l_a$ – довжина осердя якоря, м;

$\sum l_в$ – сумарна довжина вильотів лобових частин обмотки, $м$.

Для цієї конструкції двигуна втрати на тертя об повітря обертових частин якоря

$$\Delta P_{тер.об} = 7 \cdot 0,66^2 \cdot \left(0,4 + 0,28\right) \cdot 915^3 \cdot 10^{-6} = 691,9 \text{ Вт}.$$

Втрати на тертя в підшипниках і втрати тертя якоря об повітря, що розраховані окремо за співвідношенням (47) і (49), становлять $\Delta P_{підш} + \Delta P_{тер.об} = 879,87 + 691,9 = 1571,77$ Вт.

Втрати, спричинені роботою вентилятора $\Delta P_{р.вент}$, враховуються при розрахунку втрат тягового двигуна з самовентиляцією або при змішаній системі охолодження, тобто в разі, коли вентилятор встановлюється на якорі вентильованої машини і є елементом її конструкції. При незалежній вентиляції, вентилятор встановлюється поза вентильованою машиною і приводиться в обертання спеціальним двигуном. Прийнято вважати, що незалежну вентиляцію зручно використовувати на електровозах, а самовентиляцію на електропоїздах, що зумовлюється режимами їх роботи. Враховуючи, що двигун НБ-418К6, який розглядається в роботі, не має вбудованого вентилятора, то втрати, викликані роботою вентилятора враховуватися не будуть.

Коефіцієнт корисної дії тягового електродвигуна визначають за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1}, \tag{50}$$

де $P_1$ – потужність, що підводиться до двигуна. Для колекторних тягових двигунів постійного струму послідовного збудження $P_1 = U \cdot I_{ном}$.

Для коректного встановлення співвідношень уточненого розрахунку втрат в тяговому двигуні пульсуючого струму попередньо проведено повний розрахунок розмірів і параметрів двигуна НБ-418К6 за декількома класичними методиками [3; 8; 9]. При розрахунку двигуна з методик різних авторів використовувалися розрахункові співвідношення, що виключали наближене визначення параметрів. У табл. 6 наведені основні параметри розрахованого двигуна і відомих паспортних параметрів даної машини, наведених в довідковій літературі [26].

Таблиця 6

*Розрахункові параметри і відомі паспортні дані тягового двигуна НБ-418К6*

| **Найменування параметра** | **Од. виміру** | **Розрах. значення** | **Паспортні дані** |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Номінальна потужність, $P_{ном}$ | Вт | 740 | 740 |
| Номінальна напруга, $U_{ном}$ | В | 950 | 950 |
| Номінальна частота обертання, $n_{ном}$ | *об/хв* | 915 | 915 |
| Годинний струм двигуна, $I_{ном}$ | А | 828,7 | 820 |
| Число полюсів, $2p$ | *шт* | 6 | 6 |
| Струм якоря, $I_a$ | А | 138,12 | 136,67 |
| Діаметр якоря зовнішній, $D_a$ | *м* | 0,66 | 0,66 |
| Діаметр якоря внутрішній, $D_i$ | *м* | 0,334 | 0,334 |
| Довжина осердя якоря, $l_a = l_\delta$ | *м* | 0,4 | 0,4 |
| Перетин провідника якоря, $q$ | $мм^2$ | 24,35 | 24,35 |
| Лінійне навантаження, $A$ | А/м | $4,67 \cdot 10^4$ | немає даних |
| Число пазів осердя якоря | *шт* | 87 | 87 |
| Розміри паза якоря, $b_n \times h_n$ | *мм* | 9,8х42,1 | 9,8х42,1 |

Закінчення табл. 6

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Розмір мідної проволоки провідників ПЕТВСД, $b \times h$ | *мм* | 3,53 х 6,9 | 3,53 х 6,9 |
| Номінальний момент, $M_{ном}$ | $кН \cdot м$ | 7,72 | 7,73 |
| Полюсний розподіл, $\tau$ | *м* | 0,345 | 0,345 |
| Число провідників обмотки якоря, $N$ | *шт* | 696 | 696 |
| Кількість колекторних пластин, $K$ | *шт* | 348 | 348 |
| Діаметр колектора, $D_k$ | м | 0,528 | 0,52 |
| Марка щіток | — | ЕГ-61 | ЕГ-61 |
| Марка сталі осердя якоря (товщина листів 0,5 мм) | — | 1312 (Е22) | 1312 (Е22) |
| Марка сталі осердя додаткових полюсів (товщина листів 0,5 мм) | — | 1213 (Е13) | 1213 (Е13) |
| Магнітний потік, $Ф_0$ | Вб | $8{,}59 \cdot 10^{-2}$ | немає даних |
| Індукція в повітряному зазорі, $B_\delta$ | Тл | 0,92 | немає даних |
| Індукція в зубцях якоря, $B_z$ | Тл | 1,82 | немає даних |
| Опір обмотки якоря, $r_a\,(20)$ | Ом | 0,0095 | 0,011 |
| Опір обмотки збудження, $r_{зб}\,(20)$ | Ом | 0,0054 | 0,00796 |
| Опір додаткових полюсів $r_{д.п}\,(20)$ | Ом | 0,0108 | немає даних |
| Опір компенсаційної обмотки $r_{ком}\,(20)$ | Ом | 0,0077 | немає даних |
| Опір додаткових полюсів і компенсаційної обмотки $r_{д.п+ком}\,(20)$ | Ом | не розрахов. | 0,0119 |

В осерді якоря двигуна НБ-418К6 передбачено 44 вентиляційних каналу діаметром 30 мм, розташованих в два ряди. Система вентиляції двигуна незалежна. Коефіцієнт корисної дії (ККД) базового двигуна, згідно паспортних даних, становить 94%. Двигун даної модифікації має ізоляцію котушок головних і додаткових полюсів класу нагрівостійкості *Н*, а якоря і компенсаційної обмотки - класу *В* [26].

За значеннями параметрів двигуна, розрахованим за класичною методикою з табл.6 проведено розрахунок втрат в декількох варіантах по методикам різних авторів [1; 3; 4; 8; 9; 10; 21]. Дані розрахунку втрат за кожним видом і ККД наведені в табл. 7.

На підставі проведеного аналізу використовуваних співвідношень і проведених розрахунків отримані значення сумарних втрат в тяговому двигуні пульсуючого струму і втрати по кожному виду, виконані з врахуванням реальної конструкції і властивостей використовуваних матеріалів двигуна НБ-418К6 потужністю 740 кВт. Встановлено, що найбільш значущі відмінності мають співвідношення розрахунку магнітних втрат з врахуванням вихрових струмів в сталі. Отримані значення основних втрат в сталі в залежності від способу розрахунку і застосовуваних коефіцієнтів, що враховують зміну властивостей матеріалів, знаходяться в діапазоні 5768,12 – 9270,43 Вт. Для подальших розрахунків при визначенні основних втрат в сталі в запропонованій (комбінованій) методиці, рекомендується використовувати співвідношення (22) з розрахунком магнітних втрат в сталі якоря і зубців (21) і (20) з врахуванням застосовуваної марки сталі, що найбільш точно відповідає, сучасним дослідженням і, отже, має більш високу точність [4; 19; 22].

Таблиця 7

*Дані розрахунку втрат і коефіцієнту корисної дії за різними методиками*

| Найменування параметра | Розрахункові значення по методикам авторів | | | | | | | Розрахункові значення за пропоно-ваною методикою |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Находкін М.Д. | Іоффе А.Б. | Бочаров В. І. | Курбасов А.С. | Алексєєв А.Є. | Копилов І.П. | Вольдек А. І. | |
| Електричні втрати в міді обмотки якоря $\Delta P_{ел.а(115)}$, Вт | 8927,67 | | | | | | | 8927,67 |
| Електричні втрати в міді обмотки збудження $\Delta P_{ел.зб(130)}$, Вт | 5287,92 | | | | | | | 5287,92 |
| Електричні втрати в міді комп. обмотки $\Delta P_{ел.ком(115)}$, Вт | 7279,48 | | | | | | | 7279,48 |
| Електричні втрати в міді обмоток дод. полюсів $\Delta P_{ел.д.п(130)}$, Вт | 10575,85 | | | | | | | 10575,85 |
| Електричні втрати в перехідному щітковому контакті, $\Delta P_{щ}$, Вт | 2486,1 | | | | | | | 2486,1 |
| Основні (електричні) втрати в міді, $\Delta P_{ел}$, Вт | 34557,02 | | | | | | | 34557,02 |
| Магнітні втрати в сталі осердя якоря в режимі холостого ходу, $\Delta P_{ст.а}$, Вт | 7358,58 | 8427,92 | 6898,65 | 5641,56 | 6387,8 | 5243,75 | 8707,58 | 5243,75 |
| Втрати в бандажах, $\Delta P_{б}$, Вт | 842,51 | | | 846,23 | 842,51 | 524,37 | не розрах. | 524,37 |
| Основні (магнітні) втрати в сталі, $\Delta P_{ст}$, Вт | 8201,09 | 9270,43 | 7741,16 | 6487,79 | 7230,31 | 5768,12 | 8707,58 | 5768,12 |
| Додаткові втрати в машині при навантаженні, $\Delta P_{дод}$, Вт | 2460,32 | 2781,13 | 2322,35 | 1946,33 | 2169,1 | 3936,32 | 3936,32 | 1730,44 |
| Механічні втрати на тертя щіток об поверхню колектора $\Delta P_{тер.к}$, Вт | 1491,2 | | | | | | | 1491,2 |
| Механічні втрати на тертя в підшипниках з врахуванням втрат тертя якоря об повітря, $\Delta P_{підш} + \Delta P_{тер.об}$ Вт | 1574,53 | 1574,53 | 1574,53 | 1574,53 | 1571,77 | 1574,53 | 1574,53 | 1571,77 |
| Сумарні механічні втрати, $\Delta P_{мех}$, Вт | 3065,73 | 3065,73 | 3065,73 | 3065,73 | 3062,97 | 3065,73 | 3065,73 | 3062,97 |
| Сумарні втрати в двигуні $\sum \Delta P, Вт$ | 48284,16 | 49674,31 | 47686,26 | 46056,87 | 47020,95 | 47327,19 | 50266,65 | 45120,10 |
| Коефіцієнт корисної дії, η,% | 93,87 | 93,71 | 93,95 | 94,14 | 94,02 | 93,99 | 93,64 | 94,25 |

При розрахунку електричних втрат розбіжності в розрахунках можуть бути пов'язані з некоректним врахуванням робочої температури кожної обмотки, що позначається на точності визначення їх опорів.

Додаткові втрати доцільно визначати за співвідношенням (41) з вибором коефіцієнту в залежності від навантаження машини згідно табл. 5. Застосування для розрахунку цього виду втрат наближеного способу (43) має значно завищений результат.

При визначенні механічних втрат, а саме втрат на тертя в підшипнику і втрат тертя якоря об повітря, по наближеному співвідношенню (48) ($\Delta P_{підш} + \Delta P_{тер.об}$ = 1574,53 Вт) і при визначенні окремо втрат на тертя в підшипниках і окремо аеродинамічних втрат при обертанні конструкції якоря всередині машини, використовуючи співвідношення (47) и (49) ($\Delta P_{підш} + \Delta P_{тер.об}$ = 1571,77 Вт) отримано практично однаковий результат. Це свідчить про можливість використання будь-якого варіанту розрахунку механічних втрат.

Отримані значення ККД для розглянутого тягового двигуна знаходяться в межах 93,64–94,14 % (табл.7).

У табл. 7 наведено розрахунок втрат і ККД ($\eta$ = 94,25 %) за комбінованою (уточненою) методикою з врахуванням рекомендованих вище співвідношень, що забезпечують, на думку авторів, більшу точність, яка і буде взята за основу при проведенні подальших досліджень тягових двигунів пульсуючого струму.

**Висновки відповідно до статті.** У роботі проведено аналіз існуючих основних методик по розрахунку всіх видів втрат у тяговому двигуні пульсуючого струму НБ-418К6. Проведено повний розрахунок параметрів і характеристик тягового двигуна НБ-418К6 на підставі якого визначено фактичні значення втрат по співвідношенням, запропонованими різними авторами. Втрати в сталі без урахування втрат у сталевих конструкціях бандажів знаходяться в діапазоні 5243,75–8427,92 Вт. Додаткові втрати знаходяться в залежності від основних втрат в сталі і діапазон їх значень 2169,1–3936,32 Вт. Механічні втрати, не залежно від порядку їх розрахунку, мають близькі значення 3062,97–3065,73 Вт.

З урахуванням отриманих розбіжностей розрахунку втрат різними методиками діапазон змін ККД склав 93,64–94,14 %.

Встановлено, що найбільша розбіжність отриманих результатів мають основні (магнітні) втрати в сталі, що пояснюється різними коефіцієнтами обліку марки використовуваної сталі і коефіцієнтами обліку втрат на гістерезис.

Отримані значення кожного виду втрат, можуть бути прийняті за основу для проведення оцінки адекватності моделі при імітаційному моделюванні тягового двигуна пульсуючого струму НБ-418К6 з використанням Simulink.

Визначено комбіновану методику для застосування в розрахунках ККД при проведенні подальших досліджень тягових двигунів. Розрахунок ККД за пропонованою комбінованою методикою склав 94,25 %.

**Список використаних джерел**

1. Иоффе А. Б. Тяговые электрические машины (Теория, конструкция, проектирование). М.-Л.: Энергия, 1965. 232 с.

2. Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. Я. Проектирование электрических машин. Москва: Энергия, 1970. 632 с.

3. Находкин М. Д., Василенко Г. В., Бочаров В. И., Козорезов М. А. Проектирование тяговых электрических машин: учебное пособие для вузов ж.-д. трансп. Москва: Транспорт, 1976. 624 с.

4. Копылов И. П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. Москва: Юрайт, 2019. 828 с.

5. Копылов И. П. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров: для студентов электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов. Москва: Юрайт, 2012. 766 с.

6. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П. Проектирование электрических машин: учебное пособие для вузов. Москва: Энергоатомиздат, 1993. 384 с.

7. Копылов И. П. Электрические машины: учеб. для электромех. и электроэнергет. специальностей вузов. Москва: Высшая школа, 2009. 606 с.

8. Алексеев А. Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. Ленинград: Энергия, 1977. 444 с.

9. Курбасов А. С. Проектирование тяговых электродвигателей: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. Москва: Транспорт, 1987. 536 с.

10. Вольдек А. И. Электрические машины: учебник для технических учебных заведений. Ленинград: Энергия, 1978. 832 с.

11. Гольдберг О. Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин: учеб. для втузов. Москва: Высш. шк. 2001. 430 с.

12. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений: в 2 ч. Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. Ленинград: Энергия, 1972. 544 с.

13. Горобченко О. М., Кривошея Ю. В., Гатченко В. О. Розробка комплексної математичної моделі силового кола електровоза з використанням програмного пакету Matlab. *Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта*. 2008. № 13.

14. Gorobchenko O., Tkachenko V. Statistical analysis of locomotives traction motors performance. *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2019. Т. 287. P. 04002.

15. Гулак С. О., Єрмоленко Е. К. Модель системи Тягова підстанція–контактна мережа–тяговий привід електровоза серії ВЛ-80 Т, К. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*. 2016. № 28. С. 99–109.

16. Афанасьев А. А. Гистерезисные явления в электротехнической стали. *Вестник Чувашского Университета И.Н. Ульянова*. 2016. № 1. С. 15–29.

17. Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А., Горчаков Е. В. Тяговые электрические машины и трансформаторы. Москва: Транспорт, 1979. 303 с.

18. Юхимчук В. Д. Технология производства электрических машин: учебное пособие: в 2 кн. Харків: Тимченко, 2006. 560 с.

19. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. Москва: Энергия, 1974. 240 с.

20. Prus V. V., Zagirnyak M. V., Kolotylo I. A., Miljavec D. Estimate and taking into account change of steel losses in induction motors in process of their aging. *In IEEE EUROCON 2009*. 2009. May. P. 777–782.

21. Магистральные электровозы. Электрические машины и трансформаторное оборудование / Бочаров В. И. и др. Москва: Машиностроение, 1968. 444 с.

22. Сутормiна А. О., Прус В. В. Дiагностика шихтованих пакетiв сталi та сердечникiв електричних машин iндукцiйним методом при змiнi амплiтуди та частоти напруги живлення. *Вісник КДПУ*: зб. наукових праць. 2006. Вип. 4. С. 39.

23. Малюк В. П., Катаев В. А., Коробейникова М. Н. Исследование влияния амплитуды магнитной индукции на удельные магнитные потери в стандартных образцах свойств электротехнической стали. *Стандартные образцы*. 2013. № 2.

24. ГОСТ 12119.1-98 Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Методы измерения магнитной индукции и коэрцитивной силы в аппарате Эпштейна и на кольцевых образцах в постоянном магнитном поле. Принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 13–98 от 28 мая 1998 г. Минск).

25. Виноградов Н. В. Обмотчик электрических машин. Москва: Высшая школа.1969. 224 с.

26. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам. Т. 1 / под ред. А. И. Тищенко. Москва: Транспорт, 1976. 432 с.

27. Губаревич О. В. Надійність і діагностика електрообладнання: підручник. Сєвєродонецьк: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. 248 с.

28. Губаревич О. В. Деякі напрямки підвищення надійності щітково-колекторного вузла машин постійного струму електрорухомого складу. *Збірник наукових праць за матеріалами VIII-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Транспорт і логістика: Проблеми та рішення»* до 100-річчя національної академії наук України, Сєвєродонецьк − Одеса − Вільнюс − Київ, 23-25 травня 2018р. / Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Одеський національний морський університет. Одеса: КУПРІЄНКО С. В., 2018. С. 27–30.

## References

1. Ioffe, A. B. (1965). *Tyagovye elektricheskie mashiny (Teoriia, konstruktsiia, proektirovanie) [Traction electric machines (Theory, construction, design)]*. Moscow: Energy [in Russian].

2. Sergeev, P. S., Vinogradov, N. V., & Goryainov, F. Ya. (1970). *Proektirovanie elektricheskih mashin [Design of electrical machines]*. Moscow: Energy [in Russian].

3. Nakhodkin, M. D., Vasilenko, G. V., Bocharov, V. I., & Kozorezov, M. A. (1976). *Proektirovanie tyagovykh elektricheskih mashin [Design of traction electric machines]*. Moscow: Transport [in Russian].

4. Kopylov, I. P. (2019). *Proektirovanie elektricheskih mashin [Designing electrical machines]*. Moscow: Yurait [in Russian].

5. Kopylov, I. P. (2012). *Proektirovanie elektricheskih mashin [Designing electrical machines]*. Moscow: Yurait [in Russian].

6. Kopylov, I. P., Klokov, B. K., Morozkin, V. P. (1993). *Proektirovanie elektricheskih mashin [Designing electrical machines]*. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].

7. Kopylov, I. P. (2009). *Elektricheskie mashiny [Electric machines]*. Moscow: Higher School [in Russian].

8. Alekseev, A. E. (1977). *Tyagovyie elektricheskie mashinyi i preobrazovateli [Electric traction machines and converters]*. Leningrad: Energy [in Russian].

9. Kurbasov, A. S. (1987). *Proektirovanie tyagovyih elektrodvigateley [Design of traction electric motors]*. Moscow: Transport [in Russian].

10. Voldek, A. I. (1978). *Elektricheskie mashinyi [Electric machines]*. Leningrad: Energy [in Russian].

11. Goldberg, O. D., Gurin, Y. S., & Sviridenko, I. S. (2001). *Proektirovanie elektricheskih mashin [Design of electrical machines]*. Moscow: Higher school [in Russian].

12. Kostenko, M. P., Piotrovsky, L. M. (1972). *Elektricheskie mashiny [Electric machines]*. Part 1. DC machines. Transformers. Textbook for students. tech. institutions. Leningrad: Energy [in Russian].

13. Gorobchenko, O. M, Krivosheya, Yu. V., & Gatchenko, V. A. (2008). Rozrobka kompleksnoi matematychnoi modeli sylovoho kola elektrovoza z vykorystanniam prohramnoho paketu Matlab [Development of a comprehensive mathematical model of the electric locomotive power circle using the Matlab software package]. *Sbornik nauchnykh trudov Donetskoho instituta zheleznodorozhnogo transporta – Collection of scientific works of the Donetsk Institute of Railway Transport*, 13 [in Ukrainian].

14. Gorobchenko, O., & Tkachenko, V. (2019). Statistical analysis of locomotives traction motors performance. *In MATEC Web of Conferences* (Vol. 287, p. 04002). EDP Sciences.

15. Goolak, S. O., Yermolenko, E. K. (2016). Model systemy Tiahova pidstantsiia–kontaktna merezha–tiahovyi pryvid elektrovoza serii VL-80 T, K [System model Traction substation-contact network-traction drive of the electric locomotive of series VL-80 T, K]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnolohichnoho universytetu transportu. Seriia: Transportni systemy i tekhnolohii – Collection of scientific works of the State economic-technological university of transport. Series: Transport Systems and Technologies*, 28, 99–109 [in Ukrainian].

16. Afanasyev, A. A. (2016). Gisterezisnyie yavleniya v elektrotehnicheskoy stali [Hysteresis phenomena in electrical steel]. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta I.N. Ulyanova – Bulletin of the Chuvash University I.N. Ulianova*, 1, 15-29 [in Russian].

17. Zakharchenko, D. D., Rotanov, H. A., & Gorchakov, E. V. (1979). Tyagovye elektricheskie mashiny i transformatoryi [Electric traction machines and transformers]. Moscow: Transport [in Russian].

18. Yukhimchuk, V. D. (2006). Tehnologiya proizvodstva elektricheskih mashin [Technology for the production of electrical machines]. Kharkiv: Timchenko [in Russian].

19. Druzhinin, V.V. (1974). *Magnitnyie svoystva elektrotehnicheskoy stali [Magnetic properties of electrical steel]*. Moscow: Energy [in Russian].

20. Prus, V. V., Zagirnyak, M. V., Kolotylo, I. A., & Miljavec, D. (2009, May). Estimate and taking into account change of steel losses in induction motors in process of their aging. *In IEEE EUROCON 2009* (pp. 777-782).

21. Bocharov, V. I., Zolotarev, P. A., Kozorezov, M. A., Kuprianov, Yu. V., Kurochka, A. L., & et. al. (1968). *Magistralnyie elektrovozyi. Elektricheskie mashinyi i transformatornoe oborudovanie [Trunk electric locomotives. Electric machines and transformer equipment]*. Moscow: Mechanical Engineering [in Russian].

22. Sutormina, A. O., & Prus, V. V. (2006). Diahnostyka shykhtovanykh paketiv stali ta serdechnykiv elek-trychnykh mashyn induktsiinym metodom pry zmini amplitudy ta chastoty napruhy zhyvlennia [Diagnostics of batch packages of steel and core of electrical machines using the induction method with varying amplitudes and frequencies of life]. Visnyk KDPU – Visnyk KDPU, 4, 39 [in Ukrainian].

23. Malyuk, V. P., Kataev, V. A., & Korobeynikova, M. N. (2013). Issledovanie vliyaniya amplitudyi magnitnoy induktsii na udelnyie magnitnyie poteri v standartnyih obraztsah svoystv elektrotehnicheskoy stali [Investigation of the effect of magnetic induction amplitude on specific magnetic losses in standard samples of the properties of electrical steel]. *Standard samples – Standartnyie obraztsy*, 2 [in Russian].

24. GOST 12119.1-98 Stal elektrotehnicheskaya. Metodyi opredeleniya magnitnyih i elektricheskih svoystv. Metodyi izmereniya magnitnoy induktsii i koertsitivnoy silyi v apparate Epshteyna i na koltsevyih obraztsah v postoyannom magnitnom pole. Prinyat Mezhgosudarstvennyim Sovetom po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii [GOST 12119.1-98 Steel, electrical. Methods for determining magnetic and electrical properties. Methods for measuring magnetic induction and coercive force in an Epstein apparatus and on ring samples in a constant magnetic field. Adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification] (1998). Minsk, Belarussia [in Russian].

25. Vinogradov, N. V. (1969). *Obmotchik elektricheskih mashin [The wrapper of electrical machines]*. Moscow: Higher School [in Russian].

26. Tishchenko A. I. (Ed.). (1976). *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozam i dizelpoezdam [Handbook of electric rolling stock, diesel locomotives and diesel trains]*. (Vol. 1). Moscow: Transport [in Russian].

27. Gubarevych, O. V. (2016). *Nadiinist i diahnostyka elektroobladnannia [Reliability and diagnostics of electrical equipment]*. Severodonetsk: Publishing House of SNU them. V. Dahl [in Ukrainian].

28. Gubarevych, O. V. (2018). Deiaki napriamky pidvyshchennia nadiinosti shchitkovo-kolektornoho vuzla mashyn postiinoho strumu elektrorukhomoho skladu [Some directions of increasing the reliability of the brush-collector unit of DC machines of electric rolling stock]. *Zbirnyk naukovykh prats za materialamy VIII-yi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Transport i lohistyka: Problemy ta rishennia» do 100-richchia natsionalnoi akademii nauk Ukrainy, Sievierodonetsk − Odesa − Vilnius – Kyiv – Collection of scientific works on the materials of the VII International Scientific-Practical Conference "Transport and Logistics: Problems and Solutions" To the 100th anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine, Severodonetsk - Odessa - Kyiv*, (May 23-25, 2018). (pp. 27–30). Odessa: Kupriyenko S. V. [in Ukrainian].

*UDC 629.429.3:621.313*

*Oleg Gubarevych, Sergey Goolak, Oleksandr Gorobchenko, Inna Skliarenko*

## REFINED APPROACH TO THE LOSSES CALCULATION OF PULSATING CURRENT TRACTION ENGINE

***Relevance of the research.*** *To determine the efficiency and the losses of the pulsating current traction engine there are a number of calculating methods recommended by various authors. The ratios given in various methods for calculating losses have some discrepancies, moreover, it is recommended to apply different ranges of normalization coefficients that are accepted in the same calculation formulas, which however, leads to significant variations in the final results. Nevertheless, for preliminary, qualitative assessment, any of these methods fully correspond to requirements. However, in order to make technical decisions at the engineering and upgrading stage of construction, mostly, while analyzing the impact of power, operating modes and control on engine parameters, it is advisable to adhere to a unified approach when calculating losses in order to relevantly compare the results obtained by various researchers that are applying various mathematical models.*

***Problem setting.*** *Issues of analysis and refinement of calculation of losses in traction engines in a single methodological order, as well as representation of the discrepancies level of the results obtained by applying different ratios, especially given the constant modernization during research and modeling of pulsating current traction engine in railway transportation.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *A group of leading authors who dealt with the design and calculation of DC traction motors provide the ratio for calculating the most significant type of loss - the main loss in steel. In the general form of relations or in some coefficients there are differences, and most importantly, they differ in the final result.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *Accurate determination of power losses in engines, given the current state of affairs, is a task in which it is impossible to determine the only correct result. This is due to the fact that manufacturers do not provide the necessary information in the reference literature on the calculation method, and indicate the measured parameters in the passport data.*

***Purpose of the research.*** *The purpose of this study is to analyze existing methods of calculations of all types of losses of pulsating current traction engine. That will clarify and put in order the procedure for calculation and obtain the values of the engine loss parameters for use in further researches.*

***Presentation of the main material.*** *The analysis of ratios for the calculation of all types of losses, considered in various methods, on example of the traction engine NB-418K6 with capacity of 740 kW.*

***Conclusions and suggestions.*** *Based on the analysis of ratios and calculations applied, the values of the total losses in the pulsating current traction engine and the losses for each component type are obtained, considering the real construction and properties of the materials used in the NB-418K6 engine. It has been established that the most significant differences are in the calculation of magnetic losses ratios with different allowances for eddy currents in steel. When calculating the electric losses, the discrepancies in the calculations may be due to incorrect consideration of the actual operating temperature of each winding, which affects the accuracy of determination of their resistances.*

*Also, was conducted an analysis of the calculation of incremental and mechanical losses based on the specified engine applying various ratios. The obtained values of the considered efficiency of the traction engine calculated using various methods, are varying in the range of 93.64-94.14 %. Based on the calculations and loss analysis, a combined technique is recommended for subsequent application and efficiency assessment in further researches of traction engines. The values of efficiency calculation, by combination method, for tested engine was 94.25 %. The obtained values of each type of loss can be taken as the basis for assessing the adequacy of the model during simulation of the pulsating current traction engine NB-418K6 using Simulink.*

***Keywords****: traction engine, pulsating current, magnetic losses, electrical losses, additional losses of the armature core, specific magnetic losses*

*Fig.: 2. Table:7. References: 28.*

**Губаревич Олег Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електрообладнання та автоматики водного транспорту», Державний університет інфраструктури та технологій (вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна).
**Gubarevych Oleg –** PhD in Technical Sciences, Associate Professor in Department of Electrical Equipment and Automation of Water Transport State University of Infrastructure and Technology (9 Kyrylivska Str., 04071 Kyiv, Ukraine).
**E-mail:** oleg.gbr @ukr.net
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7864-0831
**ResearchGate**: https://www.researchgate.net/profile/Oleg_Gubarevych

**Гулак Сергій Олександрович –** старший викладач, кафедра «Тяговий рухомий склад залізниць» Державний університет інфраструктури та технологій (вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна).
**Goolak Sergey –** Senior Lecturer, Department of traction rolling stock of railways State University of Infrastructure and Technology (9 Kyrylivska Str., 04071 Kyiv, Ukraine).
**E-mail:** sgoolak@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-2294-5676

**Горобченко Олександр Миколайович –** доктор технічних наук, доцент кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій (вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна).
**Gorobchenko Oleksandr –** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of traction rolling stock of railways, State University of Infrastructure and Technology (9 Kyrylivska Str., 04071 Kyiv, Ukraine).
**E-mail:** gorobchenko.a.n@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9868-3852
**ResearchGate**: https://www.researchgate.net/profile/O_Gorobchenko

**Скляренко Інна Юріївна –** кандидат педагогічних наук, доцент, старший науковий співробітник науково-дослідного сектору, Державний університет інфраструктури та технологій (вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна).
**Skliarenko Inna –** PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Research Sector, State University of Infrastructure and Technologies (9 Kyrylivska Str., 04071 Kyiv, Ukraine).
**E-mail:** innakdavt@ukr.net
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1428-1793
**ResearchGate**: https://www.researchgate.net/profile/Inna_Skliarenko

# РОЗДІЛ IV. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

*УДК 664.681.1*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-228-240*

*Світлана Миколенко, Андрій Захаренко*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АМАРАНТОВОГО ТА ЛЬНЯНОГО БОРОШНА НА ЯКІСТЬ ПЕЧИВА

***Актуальність теми дослідження.*** *Печиво є популярним харчовим продуктом, проте більшість затяжного, цукрового, здобного печива має знижену біологічну цінність, тому актуальною є розробка печива з використанням біологічно цінної сировини.*

***Постановка проблеми.*** *Борошно є основою рецептури печива, тому застосування амарантового і льняного борошна, багатого на біологічно активні речовини, буде позначатися на споживчих якостях виробів.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Застосування амарантового і льняного борошна для виробництва хлібних, борошняних кондитерських виробів, зокрема печива, досить обмежене через погіршення якості продукції. Це унеможливлює достатнє збагачення виробів біологічно активними речовинами, поліпшення їх амінокислотного складу.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Відсутні дослідження сумісного використання амарантового і льняного борошна у виробництві печива з урахуванням особливостей її хімічного складу й технології отримання.*

***Метою роботи*** *є дослідження впливу амарантового і льняного борошна різної якості на споживчі характеристики й біологічну цінність затяжного, цукрового і здобного печива.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Амарантове і льняне борошно відрізняються від пшеничного зниженою вологістю, вищою водопоглинальною здатністю і вмістом поживних речовин. Технологія переробки зерна суттєво позначається на вмісті білку, жиру, білості й запаху борошна. Незначне зниження намочуваності печива і поліпшення органолептичних властивостей, амінокислотного складу вказують на доцільність застосування амарантового борошна, особливо тонкодисперсного помелу, для виробництва цукрового і здобного печива при співвідношенні амарантового борошна до пшеничного як 1:1 і 3:5 відповідно. Використання 5 % попередньо гідратованого льняного борошна до маси пшеничного борошна поліпшує якість цукрового і здобного печива на амарантово-пшеничному борошні.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Використання амарантового та льняного борошна з прийнятними функціонально-технологічними властивостями позитивно впливає на якість цукрового і здобного печива на розробленій композиційній суміші, підвищує його біологічну цінність.*

***Ключові слова:*** *амарантове борошно; льняне борошно; затяжне, цукрове, здобне печиво; якість; амінокислотний склад.*

*Рис.: 1. Табл.: 5. Бібл.: 30.*

**Актуальність теми дослідження.** Одним із перспективних напрямів у харчовій промисловості є розробка функціональних продуктів харчування. Споживання таких харчових продуктів сприяє надходженню в організм людини біологічно активних речовин, здатних позитивно впливати на роботу органів чи систему організму людини загалом [1]. На сьогодні одними з найуживаніших кондитерських виробів є борошняні, зокрема, печиво, яке є популярним продуктом серед людей різної вікової категорії [2]. Асортимент печива в Україні досить різноманітний і здебільшого представлений цукровим, здобним і затяжним печивом [3]. Проте більшість продукції, що випускається, виготовляється на основі пшеничного борошна вищого сорту, збідненого на біологічно активні речовини. Тому актуальними є дослідження впливу нетрадиційної борошняної сировини на якість печива і розроблення біологічно цінної продукції.

**Постановка проблеми.** Нетрадиційна борошняна сировина має специфічні технологічні властивості [4]: з іншими компонентами традиційної рецептури утворюються складні системи, здатні впливати на біохімічні процеси в тісті та його структурно-механічні властивості. Амарантове та льняне борошно не містять глютену й характеризується високим вмістом фізіологічно повноцінних білків, харчових волокон, вітамінів, макро- і мікроелементів, поліпшеним жирнокислотним та амінокислотним складом [5–7]. Амарантове борошно містить білок близький до складу ідеального [8], а також сквален, який володіє імуностимулюючими, антиокислювальними властивостями, багато токоферолів і незначну кількість антипоживних речовин [9]. На відміну від зерна амаранту, насіння льону містить незначну кількість токоферолів і потребує температурної обробки для інактивації лінамарину [10]. Проте льняне борошно збагачене білком, слизами, целюлозою, лігнінами, які, зокрема, виступають як ефективні ентеросорбенти [11].

© Миколенко С. Ю., Захаренко А. А., 2020

Борошняна сировина є основою рецептури печива, тому її технологічні показники і хімічний склад напряму впливають на споживчі якості харчових продуктів [8]. Амарантове і льняне борошно мають більш високий вміст біологічно активних речовин, характеризуються відмінним від пшеничного борошна білковим і вуглеводним складом, що буде позначатися на формуванні якості харчових продуктів з їх використанням. Проблематичною для створення печива стабільно високої якості є різнорідність якості представленого на українському ринку амарантового і льняного борошна, що зумовлено відсутністю затверджених на національному рівні вимог до такої продукції, особливостями використаної сировини і застосованої виробниками технології переробки. Тому розробка технології виробництва печива на основі амарантового і льняного борошна має базуватися на дослідженні впливу якості застосовуваної сировини на споживчі характеристики печива за умови визначення оптимального рецептурного складу продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Амарантове борошно є продуктом переробки зерна амаранту, що використовується для виробництва борошняних кондитерських, хлібних і макаронних виробів [9]. У роботі [12] доведено доцільність внесення амарантового борошна в кількості 25–27 % для приготування бісквітного напівфабрикату, що дозволяє отримати кінцевий продукт із більш рівномірним, тонкостінним, еластичним м'якушем. Досліджено використання подрібненого зерна амаранту багряного і білого, попередньо замоченого при (20±1) ºС [8] у хлібопеченні, яке вводили в рецептуру від 5 до 30 % до маси пшеничного борошна. Збільшення дозування добавки понад 15 % призводило до нерівномірної пористості, заминання м'якушки і появи стороннього запаху. У роботі [13] показано можливість введення 5–10 % амарантового борошна до складу пшеничного хліба для підвищення його біологічної цінності. Визначено оптимальну концентрацію амарантового борошна в рецептурі здобного печива та дріжджового кексу [5], що становить для печива 8 %, а для кексу – 15 %. У роботі [14] доведено, що додавання повножирового амарантового борошна до складу пшеничного доцільне в кількості до 60 %, що зменшує твердість печива і поліпшує його органолептичні властивості, у той час як вищі дозування (60–100 % до маси пшеничного) борошна погіршують споживчі якості печива. Використання амарантового борошна для приготування печива значно поліпшувало колір виробів до золотаво-коричневого і з огляду на показники якості оптимальною була визначена 25 % заміна пшеничного борошна на амарантове [15]. Для виробництва безглютенових кексів у роботі [16] встановлене оптимальне співвідношення кукурудзяного та амарантового борошна в рецептурі, що становить 10–12,5:90–87,5, рисового й амарантового борошна – 17,5:85–82,5. Проте в більшості випадків для виробництва печива застосування амарантового борошна в рецептурах досить обмежене, що не дозволяє суттєво підвищити біологічну цінність продуктів.

Льняне борошно або здрібнений знежирений шрот насіння льону застосовують у складі дієтичного харчування для виробництва борошняних кондитерських і хлібних виробів. У роботі [17] встановлено, що для виробництва хліба можливо вводити в рецептуру 15 % льняного борошна до борошна пшеничного вищого сорту, а для першого сорту – 10 % відповідно, що поліпшує амінокислотний склад виробів. Проте в іншій роботі [18] доведено, що для хлібобулочних виробів раціонально використовувати льняний шрот у кількості до 6 %, адже більша його кількість негативно впливає на газоутворювальну здатність тіста. Використання урбечу з насіння льону в технології пшеничного хліба доцільно в кількості до 10 %, що дозволяє подовжити свіжість виробів за умови незначного зниження питомого об'єму та пористості виробів [11]. Досліджене [19] використання льняного повножирового борошна з різних олійних сортів льону для збагачення рецептурного складу кексів. Встановлено, що дозування такого борошна має становити 5–30 % залежно від сорту льону. Ціле і подрібнене насіння льону також застосовували для виробництва пісочного печива [7], що покращувало йо-

го органолептичні показники при введенні цілого і здрібненого насіння льону в кількості 10 і 5 % до маси пшеничного борошна відповідно. Проведений аналіз літературних джерел свідчить про відсутність досліджень, спрямованих на визначення впливу сумісного використання льняного й амарантового борошна на якість борошняних кондитерських виробів, зокрема печива різного рецептурного складу.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** На сьогодні недостатньо дослідженим є питання використання амарантового і льняного борошна для виробництва борошняних кондитерських виробів, зокрема, печива, з урахуванням вихідної якості сировини, зумовленої особливостями її хімічного складу і технології переробки зерна на борошно. Печиво, збагачене біологічно активними речовинами, які містяться в амарантовому й льняному борошні, здатне сприяти не лише поліпшенню споживчих якостей продукту, але і зміцненню здоров'я людини. Тому дослідження впливу амарантового й льняного борошна різної якості на споживчі властивості печива різних видів дозволить отримувати борошняні кондитерські вироби високої якості та біологічно цінні для людини.

**Постановка завдання.** Аналіз літературних джерел свідчить про відсутність досліджень впливу амарантового і льняного борошна різної якості на споживчі характеристики печива з урахуванням особливостей його рецептури, а саме затяжного, цукрового, здобного, що обмежує використання біологічно цінних видів нетрадиційної борошняної сировини в кондитерському виробництві. Тому метою роботи є дослідження впливу амарантового і льняного борошна різної якості на споживчі характеристики і біологічну цінність затяжного, цукрового і здобного печива. Для досягнення мети потрібно: визначити хімічний склад і технологічні показники якості амарантового і льняного борошна; встановити вплив амарантового і льняного борошна на показники якості затяжного, цукрового та здобного печива; визначити біологічну цінність печива з огляду на білковий склад виробів.

**Виклад основного матеріалу.** Для розроблення печива використовували базові рецептури печива затяжного «Зоологічне», цукрового «Привіт» і здобного «До чаю» [20]. Як сировину було використано: борошно пшеничне вищого сорту ТМ «Дніпромлин» (ГСТУ 46.004-99); борошно амарантове ТМ «Ms Tally» (ТУ У 15.8-31680679-002:2007); борошно амарантове ТМ «Shvedov» (ТУ 10.4-39481629-002:2015); льняне борошно ТОВ «Агросільпром» (ТУ У 15.8-24239651-007:2007); крохмаль кукурудзяний (ДСТУ 3976-2000); цукор (ДСТУ 4623-2006); інвертний сироп (ДСТУ 7126:2009); маргарин (ДСТУ 4465-2005); меланж (ГОСТ 30363-96); цукор ванільний (ДСТУ 1009:2005); сіль кухонна (ДСТУ 3583:2015); гідрокарбонат натрію (ГОСТ 2156-76); карбонат амонію (ТУ У 6-04687873.025-95); емульгатор Естер М01 (ТУ У 15.4-22942814.021-2003).

Вологість, зольність, білість, колір, запах борошна визначали за стандартними методиками, водопоглинальну здатність – за кількістю води, яку здатне поглинути 100 г борошна [21], масову частку сирого білка – за методом К'єльдаля, масову частку сирого жиру – гравіметричним методом, масову частку сирої клітковини – як маси залишку після видалення з продукту речовин, що розчиняються в кислотах і лугах, вуглеводи – розрахунковим методом.

Для дослідження впливу амарантового борошна на якість печива з урахуванням аналізу результатів наукових літературних джерел було прийнято використовувати композитну борошняну суміш зі співвідношенням амарантового борошна (АБ) до пшеничного (ПБ) як 1:1, 3:5, 1:3 та 1:7. Процес виробництва затяжного, цукрового та здобного печива складався з таких стадій: підготовка сировини; приготування емульсії; замішування тіста; прокатування тіста; формування тістових заготовок; випікання – сушіння; охолодження; пакування готових виробів. Підготовка сировини передбачала розчинення водорозчинних компонентів та їх перемішування, потім для приготування емульсії для затяжного, цукрового і здобного печива в приготований розчин додавали жирові компоненти й емульгатор і збивали. Приготована емульсія для цукрового та за-

тяжного печива мала однорідну консистенцію високої текучості, для здобного печива емульсія готувалась з утворенням густої піни. Емульсію змішували з борошняною сировиною і замішували тісто. Перед введенням льняного борошна в тісто проводили його гідратацію при гідромодулі 1:1 з водою температури 30 ºС протягом 60 хв. Тісто прокочували з кількаразовим обминанням та відлежуванням для затяжного печива протягом однієї години. Тістові заготовки формували виштамповуванням із розкатаного шару тіста товщиною 4 мм. Випікання – сушіння проводили протягом 6 і 5,5 хв при температурі 255 ºС і 240 ºС для затяжного і цукрового, здобного печива відповідно. Вироби охолоджували 10 хв при температурі 25 ºС і упаковували.

Вологість печива (В, %) визначали прискореним термогравіметричним методом, намочуваність (Н, %) – за стандартною методикою [20] у трьох повтореннях. Органолептичні показники (О, балів) оцінювали баловим методом за п'ятибальною шкалою за критеріями форми, поверхні, кольору, запаху, вигляді у зламі та смаку з врахуванням коефіцієнтів вагомості. Амінокислотний склад визначали методом рідинної хроматографії та розраховували амінокислотний скор, коефіцієнт різниці амінокислотного скору (КРАС), біологічну цінність і коефіцієнт утилітарності амінокислотного складу [9] у середовищі MS Excel.

З табл. 1 видно, що нетрадиційна борошняна сировина, яка використовувалась у роботі, мала суттєві відмінності, зумовлені технологією її виробництва. Амарантове борошно ТМ «Ms Tally» (АБ-1), вироблене із цілого зерна амаранту, за крупністю не менше ніж 60 % борошна проходило крізь сито з розмірами чарунок 160 мкм, 100 % – 220 мкм. Таке борошно мало ледве відчутний запах амарантового зерна. Амарантове борошно ТМ «Shvedov» (АБ-2), вироблене зі знежиреного зерна амаранту, мало розмір частинок 220–235 мкм та більш виражений, характерний для амарантового зерна, запах і смак.

Таблиця 1

*Показники якості борошняної сировини*

| Показник | Вид борошна | | |
|---|---|---|---|
| | **АБ – 1** | **АБ – 2** | **Льняне** |
| Вологість, % | 9,0 | 10,3 | 7,5 |
| Зольність, % | 1,95 | 3,09 | 4,65 |
| Колір | Світло-кремовий | Кремовий | Коричневий |
| Запах | Ледь відчутний | Насичений | Ледь відчутний |
| Водопоглинальна здатність, % | 69 | 65 | 110 |
| Білість, умовних одиниць | 66 | 44 | 21 |
| Масова частка сирого білку, % на СР | 9,0 | 26,2 | 36,2 |
| Масова частка сирого жиру, % на СР | 3,5 | 7,5 | 10,3 |
| Масова частка сирої клітковини, % | 1,7 | 4,6 | 4,0 |
| Вуглеводи, % | 74,9 | 48,3 | 38,9 |

Нетрадиційна борошняна сировина порівняно з пшеничним борошном характеризувалась зниженою до 7,5–10,3 % вологістю, при цьому мінімальний вміст вологи характерний для льняного борошна. Своєю чергою, таке борошно мало й найвищу водопоглинальну здатність (+65–69 %), що також зумовлюється наявністю у насінні льону некрохмальних полісахаридів, здатних поглинати велику кількість вологи. Проте водопоглинальна здатність усіх досліджуваних видів нетрадиційної борошняної сировини була вищою за аналогічну для пшеничного борошна. Відомо, що основну частку амарантового борошна займають вуглеводи, насамперед крохмаль у кількості 60–65 %, полігональні гранули якого надзвичайно малі (0,75–3 мкм). Гранули амарантового крохмалю утворюються розгалуженим амілопектином і лінійною нерозгалуженою амілозою при співвідношенні від 20:1 до 10:1 [22]. Це значно відрізняється від пшеничного борошна, розміри крохмальних гранул якого варіюють у межах 5–30 мкм, а амілопектин і

амілоза співвідносяться між собою від 4:1 до 3:5. Розмір крохмальних гранул негативно корелює з температурою клейстеризації крохмалю, яка становить 66,5–78,4 ºС і 54–62 ºС для амарантового і пшеничного борошна відповідно [23; 24]. Основною властивістю крохмалю амарантового борошна є високий ступінь адсорбції [9; 23] з утворенням стійкого гідроколоїдного розчину та низькою здатністю до розчинення та ретрогідратації. Вказані показники перевершують аналогічні для пшеничного крохмалю внаслідок більш високого вмісту амілози, здатної розчинятися у воді з утворенням в'язкого розчину та податливості до ретроградації. Амарантове борошно суттєво відрізнялося за вмістом вуглеводів, який для АБ-1 у півтора рази вищий, ніж в АБ-2. Найменше вуглеводів містилось у льняному борошні. За білістю АБ-1 було близьким для пшеничного борошна вищого сорту, що надає йому певних переваг щодо використання в рецептурах хлібобулочних, борошняних кондитерських виробів.

У білку амарантового борошна вміст проламінів, спирторозчинних білків, становить до 2 % [24], що у 23–25 разів менше, ніж у пшеничному борошні. Основна частка білків належить до глобулінів, передусім у зерні амаранту міститься багатий на лізин глобулін 11 S – амарантин. Відсутність клейковинних білків дозволяє використовувати амарантове борошно в харчуванні людей, які мають чутливість до глютену [25]. Як видно з табл. 1, за вмістом білка і жиру АБ-1 суттєво поступається АБ-2 і льняному борошну, які у 3–4 і 2–3 рази нижчі відповідно. Знижений вміст білка, клітковини, жиру, підвищений – вуглеводів, висока водопоглинальна здатність АБ-1 вказує на відмінності в технології його отримання й очевидне вилучення периферійних шарів зернівки і зародку в технологічному процесі.

У табл. 2 наведені показники якості печива на основі композитного борошна. Визначена вологість досліджуваних зразків була на рівні допустимої і задовольняла державним вимогам до якості такої продукції (ДСТУ 3781-98): для затяжного печива вологість повинна становити 5–8 %, для цукрового – 3–8,5 %, для здобного – не більше ніж 15,5 %. Тобто внесення амарантового борошна не позначалося на процесі вивільнення вологи при термообробленні тістових заготовок.

Слід відзначити, що намочуваність затяжного печива є зниженою, і відповідає встановленим державним вимогам – понад 130 % – лише для пшеничного печива (контроль). При заміні пшеничного борошна на будь-яке амарантове відбувається суттєве погіршення показника, що не задовольняє встановлені вимоги до виробів. Таке печиво характеризувалось значною твердістю, неприйнятною для споживача. Очевидно, що негативний вплив амарантового борошна на намочуваність пов'язаний з ущільненням печива, зумовленим зниженням частки клейковинних білків у харчових системах з амарантовим борошном, яке не містить клейковини, і відповідним погіршенням якості виробів [26]. За показником намочуваності якість здобного і затяжного печива перебуває в регламентованих стандартом межах, проте є трохи зниженою порівняно з контролем. При зростанні частки внесеного в тісто амарантового борошна знижується і намочуваність печива. Очевидно, що підвищений вміст білків у тісті з АБ-2 позитивно позначається на намочуваності здобного печива, яка при мінімально прийнятих у дослідженнях кількостях даної нетрадиційної сировини (1:7) є однаковою зі зразками печива з АБ-1 за максимальної заміни пшеничного борошна на амарантове (1:1). Відомо, що для цукрового і здобного печива кращим є знижений вміст клейковинних білків та слабка клейковина [2], тому з урахуванням отриманих результатів досліджень використовувати амарантове борошно доцільно для виробництва саме таких видів печива.

Таблиця 2

*Фізико-хімічні показники й органолептична оцінка якості печива з різним амарантовим борошном*

| Вид амарантового борошна | Співвідношення АБ:ПБ | Вид печива: | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | затяжне | | | цукрове | | | здобне | | |
| | | В, % | Н, % | О, бал | В, % | Н, % | О, бал | В, % | Н, % | О, бал |
| | контроль | 6 | 139 | 47 | 5 | 233 | 45 | 6 | 226 | 46 |
| АБ – 1 | 1:1 | 7 | 108 | 46 | 6 | 215 | 47 | 6 | 178 | 46 |
| | 3:5 | 6 | 112 | 47 | 8 | 212 | 46 | 6 | 193 | 47 |
| | 1:3 | 7 | 113 | 46 | 7 | 214 | 45 | 5 | 180 | 46 |
| | 1:7 | 7 | 114 | 45 | 8 | 206 | 45 | 6 | 182 | 45 |
| АБ – 2 | 1:1 | 7 | 108 | 42 | 7 | 230 | 39 | 6 | 190 | 43 |
| | 3:5 | 7 | 110 | 44 | 6 | 230 | 42 | 6 | 181 | 43 |
| | 1:3 | 7 | 112 | 47 | 7 | 211 | 42 | 6 | 181 | 46 |
| | 1:7 | 7 | 118 | 47 | 6 | 215 | 41 | 5 | 179 | 46 |

В основі формування смаку й аромату борошняних виробів лежить температурна обробка тістових заготовок, у результаті чого борошняні вироби набувають приємного кольору, аромату і смаку. Ці процеси зумовлені каталітичними неферментативними реакціями меланоїдиноутворення, карамелізації моно- і дисахаридів із перетворенням їх кристалічної ґратки в аморфну форму, що є наслідком збільшення крихкості та гігроскопічності виробів, утворення альдегідних, кетонових речовин [27; 28].

На рис. 1, табл. 2 наведено результати органолептичної оцінки досліджуваних зразків. Для затяжного печива з АБ-1 органолептична оцінка перебуває на рівні контролю при співвідношенні АБ: ПБ як 1:1, 3:5, 1:3, у той час як використання АБ-2 доцільне при зниженні вмісту амарантового борошна до 1:3, 1:7 до маси пшеничного борошна. Вищі дозування амарантового борошна є недоцільними з огляду на зміну органолептичних якостей виробів. Цукрове печиво з АБ-1 характеризувалось кращими смаковими якостями та зовнішнім виглядом, ніж з АБ-2. Зразки цукрового печива з АБ-1 мали горіховий присмак, при 50 % заміні пшеничного борошна на амарантове смак був більш вираженим із приємним, ледь відчутним запахом. Збільшення дозування амарантового борошна сприяло формуванню більш насиченого золотаво-коричневого кольору виробів. Цукрове печиво з АБ-2 відзначались нижчими органолептичними якостями, що погіршувалися при збільшенні заміни пшеничного борошна на третину. На поверхні виробів при вказаних дозуваннях були помітні частинки амарантового борошна. Зразки здобного печива з АБ-1 при дозуванні АБ:ПБ як 3:5 характеризувались найкращими смаковими якостями та запахом. Для всіх варіантів цукрового печива з АБ-1 відмічалось поліпшення внутрішньої структури та зовнішньої форми виробів. Для здобного печива з АБ-2 збільшення вмісту амарантового борошна надавало виробам специфічного запаху, більш насиченого кольору з помітним вкрапленням частинок борошна, які відчувались при розжовуванні. Тому найвищою оцінкою володіли вироби з мінімальним внесенням вказаного борошна в рецептуру.

Відмінності в органолептичній оцінці зразків печива з різним амарантовим борошном зумовлені як хімічним складом такого борошна, так і технологією його отримання. Очевидно, що зниження вмісту білків, жирів і зростання частки крохмалю в амарантовому борошні поряд із низькою дисперсністю частинок позитивно позначається на якості цукрового і здобного печива. Враховуючи результати досліджень якості печива різних видів, для збагачення традиційних рецептур здобного та цукрового печива більш доцільним є використання АБ-1:ПБ як 1:1 і 3:5 для цукрового і здобного печива відповідно.

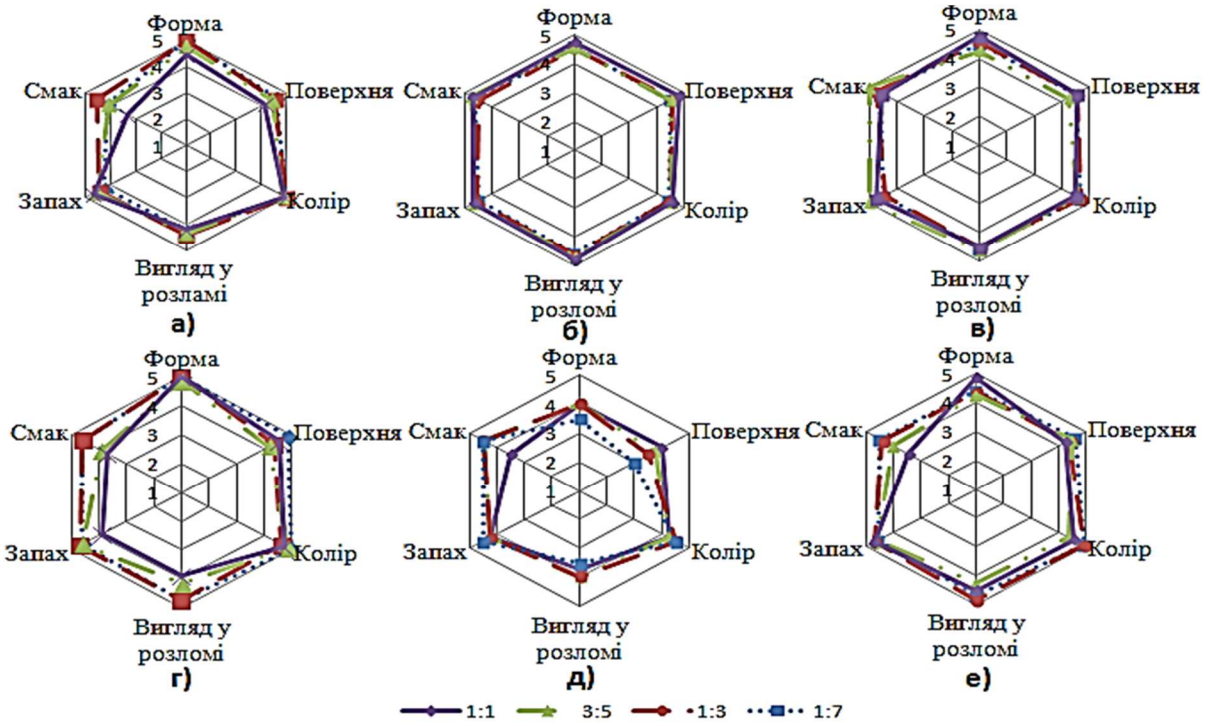



*Рис. 1. Органолептичні профілі печива з АБ:*
*а–в – 1; г–е – 2; а, г – затяжне; б, д – цукрове; в, е – здобне*

Для підвищення біологічної цінності печива перспективною сировиною є льняне борошно зі знежиреного шроту, яке, на відміну від насіння, містить залишкову кількість жиру, що включає поліненасичені жирні кислоти, схильні до швидкого окислення. Відповідно, це призводить до скорочення термінів зберігання борошняних виробів за їх включення в рецептуру. У льняному борошні містяться технологічно важливі слизі, які являють собою гетерогенну систему, що включає нейтральні арабіноксилани і кислі рамнозу, фукозу, галактозу та галактуронову кислоту [29]. Нерозчинні полісахариди льняного борошна представлені целюлозою і лігнінами. Полісахариди льону здатні позитивно впливати на слизову оболонку шлунку, поліпшувати перистальтику кишечника та виводити токсини [17].

Перед введенням льняного борошна в тісто проводили його гідратацію для активації моноз, які проявляють гелеутворюючі, стабілізуючі й емульгуючі властивості [29]. З табл. 3 видно, що при додаванні льняного борошна в кількості 5 % до маси пшеничного борошна в амарантовому цукровому та здобному печиві вологість виробів залишається на рівні 5–6 %, а намочуваність зростає на 2 і 6 % відповідно в порівнянні зі зразками без льняного борошна. Збільшення дозування льняного борошна до 10 % викликало суттєве зниження намочуваності цукрового печива.

Таблиця 3

*Якість амарантового печива з льняним борошном*

| Вид печива | АБ-1:ПБ | Вміст льняного борошна, % | Намочуваність, % | Вологість, % | Балова оцінка печива |
|---|---|---|---|---|---|
| Цукрове | 1:1 | 5 | 220 | 6 | 47 |
| | 1:1 | 10 | 136 | 5 | 43 |
| Здобне | 3:5 | 5 | 205 | 5 | 47 |
| | 3:5 | 10 | 200 | 5 | 42 |

Амарантове печиво з додаванням льняного борошна в кількості 5 % до маси пшеничного борошна характеризувалось приємним запахом і присмаком, тонкою внутрішньою розвинутою пористістю з незначною хрупкістю та твердістю. Зразки мали поліп-

шену порівняно з печивом на амарантовому борошні форму та рівномірну поверхню із вкрапленнями частинок льняного борошна, які, проте, не відчувались при розжовуванні. Збільшення дозування льняного борошна до 10 % призводило до появи сірого кольору виробів, для цукрового печива – ущільнення структури, зростання хрупкості і твердості печива. Очевидно, це зумовлено недостатнім набуханням нерозчинних полісахаридів льняного борошна у системі з обмеженою кількістю води й підвищеним вмістом цукру. Також можливе уповільнення набухання слизей за високого вмісту сахарози, що зменшує ланцюговий зв'язок моноз, які утворюють гелі, і спричиняє пластифікацію [30]. Тому збільшення дозування льняного борошна до 10 % у амарантовому цукровому і здобному печиві недоцільне.

Амінокислотний аналіз (табл. 4) і результати розрахунків, представлені в табл. 5, свідчать, що печиво, збагачене амарантовим і льняним борошном, володіє більш збалансованим компліментарним складом білка. У порівнянні з контрольним зразком пшеничного печива, приготованого за традиційною рецептурою, в печиві з амарантовим борошном значно збільшився амінокислотний скор лізину з 38 до 74 %, треоніну – з 78 до 94 %, а метеоніну і цистину – з 77 до 80 % відповідно. При додатковому введенні в рецептуру печива льняного борошна відбувається зростання скору треоніну до 101 %.

Таблиця 4

*Вміст амінокислот у печиві*

| **Амінокислота** | **Склад ідеального білку, г/100 г** | **Контроль** | | **АБ-1:ПБ 1:1** | | **АБ-1:ПБ 1:1 та ЛБ 5 %** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | білок г/100 г | скор, % | білок г/100 г | скор, % | білок г/100 г | скор, % |
| Лізин | 5,5 | 2,10 | 38 | 4,05 | 74 | 3,34 | 61 |
| Гистидин | - | 1,78 | - | 1,75 | - | 2,06 | - |
| Аргінін | - | 3,49 | - | 5,04 | - | 4,27 | - |
| Аспарагінова кислота | - | 5,41 | - | 7,97 | - | 9,07 | - |
| Треонін | 4 | 3,13 | 78 | 3,76 | 94 | 4,05 | 101 |
| Серин | - | 5,93 | - | 6,8 | - | 7,31 | - |
| Глутамінова кислота | - | 30,4 | - | 30,51 | - | 30,19 | - |
| Пролін | - | 16,3 | - | 8,67 | - | 5,62 | - |
| Гліцин | - | 4,13 | - | 6,04 | - | 7,30 | - |
| Аланін | - | 4,03 | - | 4,58 | - | 5,14 | - |
| Валін | 5 | 3,44 | 69 | 2,98 | 60 | 3,28 | 66 |
| Метеонін+ цистин | 3,5 | 2,71 | 77 | 2,8 | 80 | 2,79 | 80 |
| Ізолейцин | 4 | 2,77 | 69 | 2,22 | 55 | 2,36 | 59 |
| Лейцин | 7 | 7,57 | 108 | 6,6 | 94 | 6,66 | 95 |
| Фенілаланін+ тирозин | 6 | 6,83 | 114 | 6,22 | 104 | 6,58 | 110 |

Таблиця 5

*Показники біологічної цінності білка печива*

| **Показник** | **Контроль** | **АБ:ПБ як 1:1** | **АБ:ПБ як 1:1 + ЛБ** |
|---|---|---|---|
| КРАС, % | 35,88 | 22,00 | 19,88 |
| БЦ, % | 64,13 | 78,00 | 80,13 |
| U, % | 46,58 | 67,24 | 71,06 |

Лімітуючою амінокислотою для пшеничного цукрового печива (контроль) є лізин, тоді як для амарантового печива й амарантово-льняного – ізолейцин. Коефіцієнт різниці амінокислотного скору печива (КРАС) з амарантовим та льняним борошном на 17 % зменшився проти контролю, що вказує на кількість незамінних амінокислот, які

не використовуються на пластичні потреби. Показник біологічної цінності (БЦ) цукрового печива при 50 % заміні пшеничного борошна на амарантове зростає на 14 %, при додаванні льняного борошна – на 16 %. Збільшення уполовину коефіцієнту утилітарності (U) амінокислотного складу печива з нетрадиційною сировиною свідчить про підвищення збалансованості незамінних амінокислот у печиві за рахунок використання амарантового і льняного борошна в рецептурі виробів.

**Висновки відповідно до статті.** Амарантове і льняне борошно мають знижену порівняно з пшеничним борошном вологість і підвищену водопоглинальну здатність, зумовлену високою адсорбційною здатністю амарантового крохмалю і наявністю льняних некрохмальних полісахаридів, здатних поглинати велику кількість води. Вміст поживних речовин у амарантовому борошні суттєво варіюється та залежить в першу чергу від технології переробки зерна. Для виробництва печива більш прийнятним є тонкодисперсне борошно, що дозволяє сформувати необхідну структуру тіста та забезпечити текстурні характеристики готової продукції. Використання амарантового борошна доцільне для приготування пластично-в'язкого тіста і виробництва цукрового і здобного печива. Цукрове і здобне печиво, виготовлене на амарантовому і пшеничному борошні при співвідношенні 1:1 і 3:5 відповідно, характеризуються золотаво-коричневим кольором, приємним ароматом і горіховим присмаком та перевершують традиційне пшеничне печиво незважаючи на незначне зниження намочуваності виробів. Доцільне введення в рецептуру цукрового та здобного печива з амарантовим борошном попередньо гідратованого льняного борошна в кількості 5 %, що додатково поліпшує форму виробів, підвищує їх намочуваність. Біологічна цінність розробленого печива зростає на 14–16 %, коефіцієнт утилітарності амінокислотного складу печива – уполовину, зокрема, за рахунок збагачення виробів лізином, треоніном, метіоніном, цистином. Надалі перспективним є подальше удосконалення рецептур розробленого печива й розширення асортименту продукції оздоровчого призначення, дослідження процесів, що відбуваються у виробах під час зберігання.

**Список використаних джерел**

1. Сирохман І. В., Завгородня В. М. Товарознавство харчових продуктів функціонального призначення: навч. пос. для студ. вищ. навч. закл. Київ: Центр учбової літератури, 2009. 544 с.

2. Обґрунтування вибору груп борошняних кондитерських виробів для використання борошна з м'якозерної пшениці / К. Г. Іоргачова та ін. *Зернові продукти і комбікорма*. 2012. Т. 47. № 3. С. 25–30.

3. Чуйко М. М. Товарознавча характеристика печива різних вітчизняних виробників. *Молодий вчений*. 2017. Т. 41. № 1. С. 67–70.

4. Давидович О. Я., Лозова Т. М. Нетрадиційні види борошна у кондитерському виробництві. *Товарозавство та інновації*. 2011. № 3. С. 229–234.

5. Використання вторинних продуктів виноробного та пивоварного виробництв у технології здобного печива / К. Р. Касабова та ін. *Обладнання та технології харчових виробництв*. 2017. Т. 35. С. 5–11.

6. Фахретдинова Д. Р., Нигматьянов А. А., Миронова И. В. Использование амарантовой муки и молочной сыворотки для обогащения мучных кондитерских изделий. *Биологические науки.* 2017. № 6. С. 260–262.

7. Шидакова-Каменюка О. Г., Лисюк Г. М. Визначення раціонального дозування насіння льону до пісочного печива. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. ХДУХТ*. 2009. Вип. 1. С. 347–353.

8. Ружило Н. С. Использование семян амаранта в хлебобулочных изделиях. *Пищевая промышленность*. 2015. № 12. С. 56–58.

9. Амарантовая мука: характеристика, сравнительный анализ, возможности применения / И. М. Жаркова и др. *Вопросы питания*. 2014. Т. 83, № 1. С. 67–73.

10. Ксандопуло С. Ю., Барбашов А. В Линамарин и продукты его гидролиза в семенах масличного льна современной селекции. *Пищевая технология*. 2005. № 5. С. 51–53.

11. Використання урбечу з насіння льону у виробництві пшеничного хліба / Ю. В. Бондаренко та ін. *Харчові технології: зб. наук. пр. НУХТ*. 2017. Вип. 23, № 3. С. 228–237.

12. Матиящук О. В., Фурманова Ю. П., П'яних С. К. Використання амарантового борошна в технології виробництва бісквітних напівфабрикатів. *Науковий погляд в майбутнє.* 2017. Вип. 6. Т. 2. С. 52–58.

13. Миколенко С. Ю., Царук Л. Ю., Чурсінов Ю. О. Вплив продуктів переробки амаранту і чіа на якість хліба. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ».* 2019. № 5 (1330). С. 145–151. DOI: 10.20998/2413 - 4295.2019.05.19.

14. Chauhan A., Saxena DC., Singh S. Physical, textural, and sensory characteristics of wheat and amaranth flour blend cookies. *Cogent Food and Agriculture*. 2016. Vol. 2. № 1. P. 1–8. https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1125773.

15. Sindhuja A., Sudha M. L., Rahim A. Effect of incorporation of amaranth flour on the quality of cookies. *European Food Research and Technology.* 2005. Vol. 221, № 5. P. 597–601. https://doi.org/10.1007/s00217-005-0039-5.

16. Егорова Е. Ю., Резниченко И. Ю. Разработка пищевого концентрата – полуфабриката безглютеновых кексов с амарантовой мукой. *Техника и технология пищевых производств*. 2018. Т. 48, № 2. С. 36–45.

17. Супрунова И. А., Чижикова О. Г., Самченко О. Н. Мука льняная – перспективный источник пищевых волокон для разработки функциональных продуктов. *Техника и технология пищевых производств*. 2010. № 4. С. 50–54.

18. Бегеулов М. Ш., Сычева Е. О. Технология хлебопечения с использованием льняного жмыха. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии.* 2017. Вып. 3. С. 116–126.

19. Меренкова С. П., Колотов П. А. Разработка технологии обогащенных мучных кондитерских изделий на основе использования продуктов переработки семян льна масличного. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии».* 2017. Т. 5, № 2. С. 49–59.

20. Технологія та лабораторний практикум кондитерських виробів і харчових концентратів: навч. посіб. / за ред. Дорохович А. М., Ковбаси В. М. Київ: Інкос, 2015. 632 с.

21. Технохімічний контроль сировини та хлібобулочних і макаронних виробів: навч. посіб. / за ред. Дробот В. І. Київ: Кондор. 2015. 972 с.

22. Sindhu R. I., Khatkar B. S. Characterization of Amaranth (Amaranthus Hypocondriacus) Starch. *Engineering Research & Technology*. 2016. Vol. 5. P. 463–469.

23. Рибалка О. І., Щербина З. В. Пшениця з високим вмістом амілози - нове слово в селекції культури. *Збірник наукових праць СГІ – НЦНС*. 2015. Вип. 25. № 65. С. 246–265.

24. Characterisation of pseudocereal and cereal proteins by protein and amino acid analyses / S. Gorinstein et al. *Journal of the Science of Food and Agriculture.* 2002. Vol. 82, № 8. P. 886–891. DOI: 10.1002/jsfa.1120.

25. Chromatographic and mass spectrometry analysis of wheat flour prolamins, the causative compounds of celiac disease / M. R. Perez-Gregorio et al. *Food & function*. 2017. Vol. 8, № 8. P. 2712–2721. DOI: https://doi.org/10.1039/C7FO00266A.

26. Миколенко С. Ю., Крикун Л. Ю. Розробка технології зернових галет із диспергованої кукурудзи. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2018. Т. 29(68), № 6(2). С. 111–115.

27. Крахмалева Т. М., Манеева Ш. Э. Пищевая химия: учеб. пособие. Оренгбурский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2012. 154 с.

28. Румянцева В. В. Технология кондитерского производства: конспект лекций для вузов. Орел: ОрелГТУ, 2009. 141 с.

29. Углеводный состав слизи из семян льна и его связь с морфологическими признаками / Е. А. Пороховинова и др. *Сельскохозяйственная биология.* 2017. Вып. 52, № 1. С. 161–171.

30. Конева С. И. Особенности использования продуктов переработки семян льна при производстве хлебобулочных изделий. *Ползуновский вестник.* 2016. № 3. С. 35–38.

## Reference

1. Syrokhman, I. V., Zavhorodnia, V. M. (2009). *Tovaroznavstvo kharchovykh produktiv funktsionalnoho pryznachennia [Commodity knowledge of wholesome foods]*. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].

2. Iorhachova, K. H., Makarova, O. V., Khvostenko, K. V., Vovchenko, O. M. (2012). Obgruntuvannia vyboru hrup boroshnianykh kondyterskykh vyrobiv dlia vykorystannia boroshna z m´iakozernoi pshenytsi [Substantiation of choosing flour confectionery products types for incorporation of soft wheat flour]. *Zernovi produkty i kombikorma – Cereal products and feed,* 3, 25–30 [in Ukrainian].

3. Chuiko, M. M. (2017). Tovaroznavcha kharakterystyka pechyva riznykh vitchyznianykh vyrobnykiv [Commodity characteristics of cookies of different domestic producers]. *Molodyi vchenyi – Young scientist*, 1, 67–70 [in Ukrainian].

4. Davydovych, O. Ya., Lozova, T. M. (2011). Netradytsiini vydy boroshna u kondyterskomu vyrobnytstvi [Non-traditional types of flour in confectionery industry]. *Tovarozavstvo ta innovatsii – Commodity and innovation,* 3, 229–234 [in Ukrainian].

5. Kasabova, K. R., Hrevtseva, N. V., Shydakova-Kamenyuka, O. H., Omelchenko, O. V. (2017). Vykorystannia vtorynnykh produktiv vynorobnoho ta pyvovarnoho vyrobnytstv u tekhnolohii zdobnoho pechyva [Use of by-products of winemaking and brewery in technology of cookies]. *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv – Food production facilities and technologies,* 35, 5–11 [in Ukrainian].

6. Fakhretdinova, D. R., Nigmatianov, A. A., Mironova, I. V. (2017). Ispolzovanie amarantovoi muki i molochnoi syvorotki dlia obogashcheniia muchnykh konditerskikh izdelii [Use of amaranth flour and whey for fortification of flour confectionery products]. *Biologicheskie nauki – Biological sciences,* 6, 260–262 [in Russian].

7. Shydakova-Kameniuka, O. H., Lysiuk, H. M. (2009). Vyznachennia ratsionalnoho dozuvannia nasinnia lonu do pisochnoho pechyva [Determination of rational dosage of flax seeds to shortbread]. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli: zb. nauk. pr. KhDUKhT – Innovative equipment and technology of food production, catering and trade industry: coll. scient. papers of KCFT*, 1, 347–353 [in Ukrainian].

8. Ruzhilo, N. S. (2015). Ispolzovanie semian amaranta v khlebobulochnykh izdeliiakh [Use of amaranth seeds in bakery products]. *Pishchevaia promyshlennost – Food industry*, 12, 56–58 [in Russian].

9. Zharkova, I. M., Miroshnichenko, L. A., Zvyagin, A. A, Bavykina, I. A. (2014). Amarantovaia muka: kharakteristika, sravnitelnyi analiz, vozmozhnosti primeneniia [Amaranth flour: characteristics, comparative analysis, possibilities for application]. *Voprosy pitaniia – Nutrition issues*, 1, 67–73 [in Russian].

10. Ksandopulo, S. Iu., Barbashov, A. V. (2015). Linamarin i produkty ego gidroliza v semenakh maslichnogo lna sovremennoi selektcii [Linamarin and products of its hydrolysis in oilseeds of modern selection]. *Pishchevaia tekhnologiia – Food technology*, 5, 51–53 [in Russian].

11. Bondarenko, Yu. V., Drobot, V. I., Bilyk, O. A., Bilas, Yu. I. (2017). Vykorystannia urbechu z nasinnia lonu u vyrobnytstvi pshenychnoho khliba [The use of flax seed urbec in the production of wheat bread]. *Kharchovi tekhnolohii: zb. nauk. pr. NUKhT – Food Technology: coll. scient. papers. of NUFT,* 3, 228–237 [in Ukrainian].

12. Matyiashchuk, O. V., Furmanova, Yu. P., Pianykh, S. K. (2017). Vykorystannia amarantovoho boroshna v tekhnolohii vyrobnytstva biskvitnykh napivfabrykativ [Use of amaranth flour in biscuit semi-finished products technology]. *Naukovyi pohliad v maibutnie – Scientific approach and future,* 6, 52–58 [in Ukrainian].

13. Mykolenko, S. Yu., Tsaruk, L. Yu., Chursinov, Yu. O. (2019). Vplyv produktiv pererobky amarantu i chia na yakist khliba [Influence of amaranth and chia processing products on bread quality]. *Visnyk NTU «KHPI», Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh – New solutions in modern technologies. Kharkiv: NTU «KHPI»,* 5 (1330), 145–151. DOI: 10.20998/2413 - 4295.2019.05.19.

13. Mykolenko, S. Yu., Tsaruk, L. Yu., Chursinov, Yu. O. (2019). Vplyv produktiv pererobky amarantu i chia na yakist khliba [Influence of amaranth and chia processing products on bread quality]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriia: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. Kharkiv: NTU «KhPI» – New solutions in modern technologies. Kharkiv: NTU «KHPI»,* 5, 145–151. DOI: 10.20998/2413-4295.2019.05.19.

14. Chauhan, A., Saxena, DC., Singh, S. (2016). Physical, textural, and sensory characteristics of wheat and amaranth flour blend cookies. *Cogent Food and Agriculture*, 1, 1–8. DOI: https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1125773.

15. Sindhuja, A., Sudha, M. L., Rahim, A. (2005). Effect of incorporation of amaranth flour on the quality of cookies. *European Food Research and Technology*, 5, 597–601. DOI: https://doi.org/10.1007/s00217-005-0039-5.

16. Egorova, E. Iu., Reznichenko, I. Iu. (2018). Razrabotka pishchevogo kontcentrata – polufabrikata bezgliutenovykh keksov s amarantovoi mukoi [Development of food concentrate as a semi-finished product of gluten-free muffins with amaranth flour]. *Tekhnika i tekhnologiia pishchevykh proizvodstv – Equipment and technology for food production,* 2, 36–45 [in Russian].

17. Suprunova, I. A., Chizhikova, O. G., Samchenko, O. N. (2010). Muka lnianaia – perspektivnyi istochnik pishchevykh volokon dlia razrabotki funktcionalnykh produktov [Flaxseed flour is a promising source of dietary fiber for functional products development]. *Tekhnika i tekhnologiia pishchevykh proizvodstv – Equipment and technology for food production,* 4, 50–54 [in Russian].

18. Begeulov, M. Sh., Sycheva, E. O. (2017). Tekhnologiia khlebopecheniia s ispolzovaniem lnianogo zhmykha [Baking technology with using flaxseed cake]. *Izvestiia Timiriazevskoi selskokhoziaistvennoi akademii – News of Timiryazev agricultural academy*, 3, 116–126 [in Russian].

19. Merenkova, S. P., Kolotov, P. A. (2017). Razrabotka tekhnologii obogashchennykh muchnykh konditerskikh izdelii na osnove ispolzovaniia produktov pererabotki semian lna maslichnogo [Development of technology for fortified flour confectionery based on the use of oilseed processing products]. *Vestnik IuUrGU. Seriia «Pishchevye i biotekhnologii» – Bulletin of SUSU. Series "Food and Biotechnology"*, 2, 49–59 [in Russian].

20. Dorokhovych, A. M., Kovbasa, V. M. (2015). *Tekhnolohiia ta laboratornyi praktykum kondyterskykh vyrobiv i kharchovykh kontsentrativ [Technology and laboratory workshop of confectionery and food concentrates: textbook]*. Kyiv: Inkos [in Ukrainian].

21. Drobot, V. I. (Ed.). (2015). *Tekhnokhimichnyi kontrol syrovyny ta khlibobulochnykh i makaronnykh vyrobiv: navch. posib. [Technochemical control of raw materials and bakery and pasta]*. K.: Kondor [in Ukrainian].

22. Sindhu, R. I., Khatkar, B. S. (2016). Characterization of Amaranth (Amaranthus Hypocondriacus) Starch. *Engineering Research & Technology,* 5, 463–469.

23. Rybalka, O. I., Shcherbyna, Z. V. (2015). Pshenytsia z vysokym vmistom amilozy - nove slovo v selektsii kultury [High amylose wheat as new word in crop breeding]. *Zbirnyk naukovykh prats SHI – NTsNS – Proceedings of the Institute of Scientific Research – NCS,* 65, 246–265 [in Ukrainian].

24. Gorinstein, S. et al. (2002). Characterisation of pseudocereal and cereal proteins by protein and amino acid analyses. *Journal of the Science of Food and Agriculture,* 8, 886–891. DOI: 10.1002/jsfa.1120.

25. Perez-Gregorio, M. R. et al. (2017). Chromatographic and mass spectrometry analysis of wheat flour prolamins, the causative compounds of celiac disease. *Food & function,* 8, 2712–2721. DOI: https://doi.org/10.1039/C7FO00266A.

24. Gorinstein, Shela, et al. (2002). Characterisation of pseudocereal and cereal proteins by protein and amino acid analyses. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 8, 886–891. DOI: 10.1002/jsfa.1120.

25. Perez-Gregorio, M. R., et al. (2017). Chromatographic and mass spectrometry analysis of wheat flour prolamins, the causative compounds of celiac disease. *Food & function,* 8, 2712–2721. DOI: https://doi.org/10.1039/C7FO00266A.

26. Mykolenko, S. Yu., Krykun, L. Yu. (2018). Rozrobka tekhnolohii zernovykh halet iz dysperhovanoi kukurudzy [Development of technology of grain crackers from desintegrated corn]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky – Notes of the Taurida V. I. Vernadsky National University. Series: Technical Sciences,* 6, 111–115 [in Ukrainian].

27. Krakhmaleva, T. M., Maneeva, Sh. E. (2012). *Pishchevaya khimiya [Food chemistry*]. Orenburg: OGU [in Russian].

28. Rumiantseva, V. V. (2009). *Tekhnologiia konditerskogo proizvodstva [Confectionery technology]*: Orel: OrelGTU [in Russian].

29. Porokhovinova, E. A., Pavlov A. V., Brach N. B., Morvan K. G. (2017). Uglevodnyi sostav slizi iz semian lna i ego sviaz s morfologicheskimi priznakami [Carbohydrate composition of mucus from flax seeds and its relationship with morphological characters]. *Selskokhoziaistvennaia biologiia – Agricultural biology,* 1, 161–171 [in Russian].

30. Koneva, S. I. (2016). Osobennosti ispolzovaniia produktov pererabotki semian lna pri proizvodstve khlebobulochnykh izdelii [Characteristics of incorporation of flax seed processing products in the production of bakery products]. *Polzunovskii vestnik – Polzunovskiy bulletin,* 3, 35–38 [in Russian].

*UDC 664.681.1*

*Svitlana Mykolenko, Andrey Zaharenko*

## EFFECT OF AMARANTH AND FLAXSEED FLOUR ON COOKIES QUALITY

***Urgency of the research.*** *Cookies are popular food products, but in general cracker-type, sugar and butter cookies have low biological value, so the development of cookies using biologically valuable raw materials is essential.*

***Target setting.*** *Flour is the key ingredient in cookie recipe, so incorporation of amaranth and flaxseed flour, enriched with biologically active substances, will affect the consumer qualities of the products.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Incorporation of amaranth and flaxseed flour in bread, flour confectionery, in particular cookies, is quite limited due to the deterioration of products quality. This makes it impossible to enrich the products with biologically active substances significantly, improving their amino acid composition.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *There is no research on incorporation of composed amaranth and flaxseed flour into wheat cookies, taking into account the peculiarities of chemical composition and grain processing.*

***The research objective.*** *The aim is to study the effect of amaranth and flaxseed flours of different quality on the consumer characteristics and biological value of cracker-type, sugar and butter cookies.*

***The statement of basic materials.*** *Amaranth and flaxseed flours have reduced humidity, higher water absorption capacity and different nutrient content in comparison to wheat flour. Grain processing technology play an important role in protein, fat, carbohydrates content, whiteness and odor of the flour. A slight decrease in the cookie water absorption capacity and improvement of the organoleptic properties, amino acid composition indicates the feasibility of using amaranth flour, especially fine grinding, for the production of sugar and butter cookies at a ratio of amaranth flour to wheat flour as 1:1 and 3:5, respectively. The use of 5% pre-hydrated flaxseed flour by weight of wheat flour improves the quality of sugar and butter cookies on composed amaranth and wheat flours.*

***Conclusions.*** *The use of amaranth and flaxseed flour with acceptable functional and technological properties has a positive effect on the quality of sugar and butter cookies on the developed composite mixture, increases the cookies biological value.*

***Keywords:*** *amaranth flour; flaxseed flour; cracker-type, sugar, butter cookies; quality; amino acid composition.*

*Fig.: 1. Tab.: 5. References: 30.*

**Миколенко Світлана Юріївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції, Дніпровський державний аграрно-економічний університет (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, 49600, Україна).
**Mykolenko Svitlana** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Storage and Processing Technologies of Agricultural Products, Dnipro State Agrarian and Economic University (25 Serhiy Efremov Str., 49600 Dnipro, Ukraine).
**E-mail:** svetlana.mykolenko@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1959-1141
**ResearcherID:** N-6958-2018
**Scopus Author ID:** 57194689776

**Захаренко Андрій Анатолійович** – магістрант, Дніпровський державний аграрно-економічний університет (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, 49600, Україна).
**Zaharenko Andrey** – master student, Dnipro State Agrarian and Economic University (25 Serhiy Efremov Str., 49600 Dnipro, Ukraine).

Миколенко С., Захаренко А. Дослідження впливу амарантового та льняного борошна на якість печива. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 228-240.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 663.53.531*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-241-249*

*Наталія Процан, Любов Ткаченко*

# АКТИВАЦІЯ ФЕРМЕНТІВ ПІД ЧАС РОЗВАРЮВАННЯ ЖИТНІХ ЗАМІСІВ ПІДВИЩЕНОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ

***Актуальність теми дослідження.*** *Для спиртової галузі Україні актуальним завданням є зниження собівартості етилового спирту за рахунок більш економічного використання імпортних концентрованих ферментних препаратів, які широко застосовуються в Україні.*

***Постановка проблеми.*** *Важливою стадією виробництва етилового спирту з крохмалевмісної сировини є біоконверсія крохмалю зернової сировини у спирт за рахунок використання концентрованих ферментних препаратів. Основним видом зернової сировини, що переробляється в етиловий спирт, є жито, перероблянння якого за низькотемпературними режимами ускладнено особливостями будови та складових цієї культури, що призводить до збільшення витрат ферментних препаратів амілолітичної дії на 15–25 %.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Проаналізовано наукові розробки з проблем ферментативного гідролізу крохмалю різних культур під час виробництва етилового спирту, що відображені в працях С. Т. Олійнічука, П. Л. Шияна, В. О. Маринченка, В. В. Сосницького, Р. Г. Кириленка. Напрацювання цих науковців було реалізовано в технології низькотемпературного гідроферментативного оброблення таких видів крохмалевмісної сировини, як пшениця і кукурудза.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Нині проблема ефективного переробляння жита на спиртових заводах залишається невирішеною, особливо під час розварювання житніх замісів підвищеної концентрації.*

***Постановка завдання.*** *Метою роботи є активація амілолітичних ферментів під час низькотемпературного розварювання житніх замісів підвищеної концентрації сухих речовин за рахунок внесення фосфатів, які сприяють збереженню активності ферментів.*

***Виклад основного матеріалу.*** *У статті наведено результати досліджень впливу фосфатів на активність ферментів під час низькотемпературного розварювання житніх замісів підвищеної концентрації в умовах виробництва спирту етилового.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Встановлено, що використання фосфатів із розрахунку 0,05 г/дм$^3$ сусла на стадії приготування житнього замісу є раціональною кількістю, за якої ферментативний гідроліз проходить більш повно за рахунок активації амілолітичних ферментів. Показано, що при внесенні фосфатів в'язкість сусла знижується в 2,4 рази, що сприяє кращому формуванню ферментно-субтрактного комплексу та дії амілолітичних ферментів.*

***Ключові слова:*** *жито; заміс; фосфати; активність ферментів; в'язкість; дозріла бражка.*
*Табл.: 5. Бібл.: 19.*

**Актуальність теми дослідження.** На сьогодні практично на всіх спиртових заводах України впроваджено технології низькотемпературного гідроферментативного оброблення крохмалевмісної сировини, що стало можливим завдяки використанню імпортних концентрованих ферментних препаратів [1; 2]. Використання концентрованих ферментних препаратів потребує корегування технологічного режиму в кожному конкретному випадку, залежно від особливостей складу зернової культури, що переробляється. Для спиртової галузі актуальним завданням є зниження собівартості етилового спирту за рахунок більш економічного використання концентрованих ферментних препаратів.

**Постановка проблеми.** Важливою стадією виробництва етилового спирту з крохмалевмісної сировини є біоконверсія крохмалю зернової сировини у спирт, яка складається з таких технологічних стадій: приготування замісу, гідроферментативне оброблення замісу, оцукрювання розвареної маси, під час яких відбувається гідроліз крохмалю сировини під дією амілолітичних ферментів. За умов низькотемпературного гідроферментативного оброблення зернової сировини відбувається нагрів середовищ від 55 до 95 °С, що призводить до зниження активності ферментних препаратів [3].

Основним видом зернової сировини, що переробляється в етиловий спирт, є жито, перероблянння якого за низькотемпературними режимами ускладнено особливостями будови та складових цієї культури [4; 5]. Крохмаль жита характеризується певними фізико-хімічними властивостями, які визначають структурно-механічні характеристики водно-борошняних систем і гідролізатів. Основними властивостями крохмалю житнього борошна є температура клейстеризації та в'язкість. Важливою особливістю жита є наявність у його складі значної кількості некрохмальних полісахаридів, зокрема, геміцелюлоз та слизових гумі-речовин [6]. Крім того, що ці речовини не гідролізуються ферментами амілолітичної дії під час низькотемпературного переробляння, вони призводять до погір-

© Процан Н. В., Ткаченко Л. В., 2020

шення реологічних властивостей житнього сусла: значно підвищується в'язкість замісу. У результаті чого відбувається блокування активних центрів амілолітичних ферментів та зменшується їхня активність саме під час розварювання житніх замісів. Тому під час переробляння жита підприємства змушені збільшувати витрати ферментних препаратів амілолітичної дії: альфа-амілази до 25 % та глюкоамілази – до 15 % [7].

Оптимальні умови дії ферментів досягаються за параметрів, які гарантують найвищу їхню активність, тобто максимальну швидкість реакції і високу стабільність ферменту [3; 8]. Від активності та стабільності дії амілолітичних ферментів під час гідроферментативного оброблення зернових замісів залежить ефективність спиртового виробництва. З огляду на вищесказане розроблення ефективних технологічних прийомів, які сприяють активації дії амілолітичних ферментів у процесі розварювання і оцукрювання житніх замісів, особливо за підвищених концентрацій сухих речовин, для зниження їхньої в'язкості, є актуальним завданням у напрямку удосконалення технології спиртової бражки із жита та раціонального використовування ферментних препаратів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проаналізовано наукові розробки з проблем ферментативного гідролізу крохмалю різних культур під час виробництва етилового спирту, що відображені в працях С. Т. Олійнічука, П. Л. Шияна, В. О. Маринченка, В. В. Сосницького [1; 3]. Напрацювання цих науковців було реалізовано в технології низькотемпературного гідроферментативного оброблення таких видів крохмалевмісної сировини як пшениця і кукурудза. Дослідженнями Р. Г. Кириленка [9] встановлено технологічні особливості переробки зернової сировини на етиловий спирт за низькотемпературними режимами та наведено шляхи удосконалення технології спиртових бражок при використанні ферментних препаратів різної селективної дії залежно від виду сировини. Наукову роботу [10] присвячено питанням удосконалення технології гідроферментативного оброблення жита за рахунок раціональних режимів біоконверсії крохмалю. Дослідженнями [11] визначено негативний вплив наявних у зернівці жита похідних алкілрезорцинолів на оцукрюючу здатність сусла та проведено підбір речовин для нейтралізації алкілрезорцинолів, які зумовили збереження активності ферментних препаратів.

Каталітична дія ферментів значною мірою залежить від таких факторів, як температура, концентрація іонів водню та домішок, одні з яких діють як інгібітори, а інші – як активатори [8; 12]. До числа активаторів, що сприяють підвищенню активності ферментів та посилюють їхню дію, відносяться іони багатьох металів, які входять до складу простетичної групи ферментів.

Вміст у складі концентрованих ферментних препаратів, наприклад, іонів кальцію коливається від 1 до 30 г на 1 г/моль ферменту, причому повне видалення кальцію призводить до інактивації ферменту, повторне введення кальцію, наприклад, у кількості $5 \cdot 10^{-3}$ моля у середовище може частково відновити його активність [8]. Дослідженнями [13] доведено, що додавання $CaCl_2$ у кількості 200 мг/дм$^3$ у воду, яка використовується для розведення ферментних препаратів амілолітичної дії значно підвищує їхню термостабільність за температури 58… 65 ºС. Авторами проведено дослідження щодо позитивного впливу іонів кальцію на активність ферментів під час спиртового зброджування кукурудзяного сусла і доведено, що внесення в кукурудзяний заміс іонів кальцію в кількості 300 мг /дм$^3$ дає змогу стабілізувати активність ферментів амілолітичної дії [14].

Відомо, що солі ортофосфорної кислоти – дигідроортофосфат калію ($KH_2PO_4$) і динатрійфосфат ($Na_2HPO_4$) – входять до складу пекарських порошків [15]. Сіль $KH_2PO_4$ додають у середовище під час вирощування плісеневих грибів, які продукують пеніциліни, а також – до рідких заквасок під час приготування житнього хліба. За даними [10], саме калій ще виконує роль не тільки коферменту, але також входить у деякі клітинні структури дріжджів і бере участь у регуляції транспорту іонів крізь клітинну стінку, а також активує 40 різних ферментів і тісно пов'язаний із розмноженням дріжджів та швидкістю зброджування.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** На сьогодні проблема ефективного використання ферментних препаратів при зброджуванні жита на спиртових заводах залишається невирішеною. Переробляння жита ускладнено передусім за рахунок значної в'язкості житніх замісів, проблем перемішування та транспортування, неможливості досягнути регламентованих показників дозрілої бражки. Під час гідроферментативного оброблення житніх замісів останні нагрівають до температури 65…95 ºС на стадії розрідження та до 55…58 ºС на стадії оцукрювання [3]. За умов температурного оброблення житніх замісів відбувається значне зниження активності амілолітичних ферментів за причини високих значень в'язкості сусла, що є основною причиною недостатнього рівня оцукрювання житніх замісів. При підвищенні концентрації житніх замісів до 16 % сухих речовин та вище, в'язкість збільшується у 2,5-3,2 рази. Збільшення кількості ферментних препаратів лише частково вирішує проблему переробки жита у виробництві етилового спирту, але є економічно невигідним для виробників, тому що при цьому підвищується собівартість кінцевого продукту. З огляду на це, необхідно провести дослідження щодо активації амілолітичних ферментів під час гідроферментативного розварювання житніх замісів підвищеної концентрації для більш економічного та ефективного їх використання.

**Постановка завдання.** Метою роботи є активація амілолітичних ферментів під час низькотемпературного розварювання житніх замісів підвищеної концентрації сухих речовин за рахунок внесення фосфатів, які сприяють збереженню активності ферментів.

**Виклад основного матеріалу.** Об'єктами досліджень були ферментні препарати фірм «Новоконтакт» і «Даніско»: альфа-амілазної дії – Термаміл СЦДС, Амілекс 3Т і глюкоамілазної дії – Сан-Супер 240 Л, Діазим ССФ. Активність концентрованих ферментних препаратів визначали згідно з [16].

Під час проведення досліджень використовували жито з такими, показниками: вологість – 12,84 %, крохмалистість – 57,21 %, засміченість – 1,24 %. Зерно жита подрібнювали й одержували помели, ступінь подрібнення яких характеризувався 95 %-ним проходом крізь сито з діаметром отворів 1 мм. Розріджуючий і оцукрюючий ферментні препарати вносили з розрахунку 1 од. та 6 од. на 1 грам крохмалю, відповідно. Під час визначання активності розчини ферментних препаратів готували на дистильованій воді, а також із додаванням у воду фосфатів із розрахунку 0,1 г/дм$^3$. Солі $Na_2HPO_4$ і $KH_2PO_4$ у співвідношенні (1:19), які розчиняли в дистильованій воді. Одержаний водний розчин фосфатів використовували в дослідженнях.

Житні заміси готували таким чином: помели змішували з водою для досягнення концентрації сухих речовин у межах 16…20 %, а у дослідних варіантах, у воду вносили фосфати з розрахунку 0,05…0,40 г/дм$^3$ сусла у вигляді розчинів. Заміси витримували за температури (45±1) ºС впродовж 40 хв. Гідроферментативне оброблення замісів проводили за температури (65±1) ºС впродовж 3 год , оцукрювання – за температури (58±1) ºС впродовж 1 год. В'язкість, у сП, у житніх замісах визначали за допомогою віскозиметра Гепплера KF з падаючою кулькою. Дослідне зброджування житнього сусла проводили методом «бродильної проби» [17] за умов: температура – 30…32 ºС, тривалість процесу – 72 год. Під час зброджування використовували дріжджі *S. cerevisiae* расу XII-Т, які розмножували за режимами прийнятими у спиртовому виробництві [2]. Засівні дріжджі вносили розрахунку 10 % від об'єму зброджуваного середовища. У дозрілий бражці визначали: величину pH – потенціометрично, видиму густину та істинні сухі речовини – ареометричним методом, вміст незброджених вуглеводів (загальних і водорозчинних) – фотоколориметричним методом за реакцією з антроновим реагентом [18]. У бражних дистилятах визначали концентрацію етилового спирту ареометричним методом [19].

З метою встановлення впливу фосфатів на активність ферментних препаратів під час розварювання житніх замісів, попередньо перед визначенням альфа-амілазної активності ферментних препаратів, вихідні розчини останніх витримували за температури

65 ºС впродовж 3 год. Результати досліджень, які проводили за такими варіантами: контроль – без внесення фосфатів і без витримування за температури 65 ºС; І варіант – витримування за температури 65 ºС без внесення фосфатів; ІІ варіант – витримування за температури 65 ºС із внесенням фосфатів, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

*Вплив фосфатів на альфа-амілазну активність ферментних препаратів, %*

| Назва ферментного препарату | Альфа-амілазна активність, од./см$^3$ | | |
|---|---|---|---|
| | контроль | І варіант | ІІ варіант |
| Термаміл СЦДС | 921 ± 2 | 767 ± 2 | 919 ± 2 |
| Амілекс 4Т | 974 ± 2 | 819 ± 2 | 970 ± 2 |

З даних табл. 1 видно, що використання фосфатів в умовах витримування за температури розварювання житніх замісів сприяє збереженню активності ферментних препаратів. Так, за умови витримування розчину Термаміл СЦДС за температури 65 ºС впродовж 3 год без внесення фосфатів (І вар.), активність знижується на 16,7 % порівняно з вихідним значенням у контрольному варіанті. А внесення фосфатів за таких же умов, сприяє збереженню активності Термаміл СЦДС на рівні контролю. Застосування фосфатів під час витримування Амілекс 4Т за температури 65 ºС впродовж 3 год також позитивно впливає на альфа-амілазну активність ферментного препарату.

Для встановлення впливу фосфатів на активність ферментних препаратів глюкоамілазної дії (Сан-Супер 240 Л та Діазим ССФ) під час оцукрювання житніх замісів дослідження проводили за такими варіантами: контроль – без внесення фосфатів і без витримування за температури 58 ºС; І варіант – витримування за температури 58 ºС без внесенням фосфатів; ІІ варіант – витримування за температури 58 ºС із внесення фосфатів; ІІІ варіант – витримування за температури 65 ºС без внесення фосфатів; ІV варіант – витримування за температури 65 ºС із внесенням фосфатів (табл. 2). Тривалість витримування за визначених температур становила 1 год.

Таблиця 2

*Вплив фосфатів на глюкоамілазну активність ферментних препаратів, %*

| Назва ферментного препарату | Глюкоамілазна активність, од./см$^3$ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | контроль | І вар. | ІІ вар. | ІІІ вар. | ІV вар. |
| Діазим ССФ | 5800 ± 2 | 5394 ± 2 | 5846 ± 2 | 5055 ± 2 | 5865 ± 2 |
| Сан-Супер 240Л | 2953 ± 2 | 2613 ± 2 | 2965 ± 2 | 2510 ± 2 | 2953 ± 2 |

Результати досліджень (табл. 2), підтверджують позитивний вплив фосфатів на активність ферментних препаратів глюкоамілазної дії. За отриманими даними можна зробити висновок, що витримування ферментних препаратів глюкоамілазної дії без внесення фосфатів за температур 58 ºС (вар. І ) та 65 ºС (вар. ІІІ) призводить до зменшення глюкоамілазної активності приблизно на 7 % для Діазим ССФ і на 11,5 % для Сан-Супер 240 Л за температури 58ºС та на 12,8 % для Діазим ССФ і на 15 % для Сан-Супер 240 Л за температури 65ºС порівняно з контролем. Водночас, при внесенні фосфатів (вар. ІІ і ІV), за таких же умов, значення показника глюкоамілазної активності залишається на рівні контрольних. Таким чином, одержані результати свідчать про те, що використання фосфатів під час приготування розчинів ферментних препаратів дає можливість стабілізувати активність останніх за температур, за яких проводять гідроферментативне оброблення жита.

З метою вибору оптимальної кількості фосфатів для активації ферментних препаратів амілолітичного комплексу, за якої ферментативний гідроліз буде проходити більш повно з урахуванням реологічних властивостей сусла, було проведено наступні дослідження.

У табл. 3 наведено показники дозрілих бражок, одержаних після зброджування житнього сусла, до складу якого на стадії приготування замісу вносили фосфати в кількості від 0,05 до 0,4 г/дм$^3$ сусла (у контрольному варіанті у заміс фосфати не вносили).

Таблиця 3

*Вплив концентрації фосфатів у житньому суслі на показники сусла й дозрілих бражок*

| Показники | Контроль | Концентрація фосфатів, г/дм$^3$ сусла | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 |
| В'язкість середовища перед внесенням дріжджів, сП | 2870 | 1015 | 983 | 967 | 948 | 935 |
| pH, од. | 4,43 | 4,42 | 4,42 | 4,41 | 4,40 | 4,38 |
| Кислотність, град. | 0,62 | 0,63 | 0,63 | 0,64 | 0,64 | 0,65 |
| Видима густина, % | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Істинні сухі речовини, % | 3,8 | 3,7 | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 3,6 |
| Вміст спирту, об.% | 7,7 | 7,85 | 7,85 | 7,85 | 7,85 | 7,85 |
| Незброджені вуглеводи, г/100 см$^3$: | | | | | | |
| - загальні | 0,94 | 0,72 | 0,71 | 0,71 | 0,70 | 0,69 |
| - водорозчинні | 0,65 | 0,60 | 0,59 | 0,59 | 0,58 | 0,58 |
| - нерозчинений крохмаль | 0,25 | 0,12 | 0,11 | 0,11 | 0,10 | 0,10 |

Наведені у табл. 3 дані свідчать, що за умови внесення у заміс фосфатів, уже за концентрації останніх 0,05 г/дм$^3$ сусла, в'язкість сусла зменшується на 50,8 % проти контрольного варіанта. За умови збільшення концентрації фосфатів у суслі до 0,3 г/дм$^3$ сусла показник в'язкості зменшився на 64,6…67,4 % порівняно з контролем і за концентрації фосфатів 0,4 г/дм$^3$ сусла становив 935 сП. Одержані результати показують, що внесення фосфатів позитивно впливає на показники дозрілої бражки, зокрема, зменшується вміст нерозчиненого крохмалю та незброджених вуглеводів. Так, уже за концентрації фосфатів 0,05 г/дм$^3$ сусла вміст нерозчиненого крохмалю зменшився на 52 % і незброджених загальних вуглеводів – на 23,4 % у порівнянні з контролем. Зменшення втрат із незбродженими вуглеводами обумовлює збільшення вмісту спирту в дозрілій бражці порівняно з контрольним варіантом на 0,15 об.%.

Отже, на основі проведених досліджень, можна стверджувати, що концентрація фосфатів 0,05 г/дм$^3$ сусла є раціональною кількістю, за якої ферментативний гідроліз крохмалю жита проходить більш повно, тому що активність ферментних препаратів не знижується, що підтверджують показники дозрілої бражки, і при цьому не потрібно додаткових витрат ферментних препаратів.

Досліджено вплив визначеної кількості фосфатів (0,05 г/дм$^3$ сусла) на в'язкість житніх замісів при збільшенні концентрації сухих речовин від 16,1 до 20,2 %. У табл. 4 наведено показники в'язкості житніх замісів залежно від концентрації сухих речовин у середовищі без фосфатів і при внесенні фосфатів.

Таблиця 4

*В'язкість житніх замісів залежно від концентрації СР*

| Концентрація сухих речовин, % | В'язкість житнього замісу, сП | |
|---|---|---|
| | контроль (без фосфатів) | дослід (внесення фосфатів із розрахунку 0,05 г/дм$^3$) |
| 16,1 | 2875 | 1022 |
| 17,2 | 3189 | 1210 |
| 18,3 | 3465 | 1370 |
| 19,1 | 3846 | 1584 |
| 20,2 | 4095 | 1710 |

З даних табл. 4 видно, що в'язкість житніх замісів збільшується на 1220 сП по мірі підвищення концентрації сухих речовин від 16, 1 до 20,2 %. Водночас, за умови внесення у заміс фосфатів, показник в'язкості середовищ зменшується в порівнянні з контрольними варіантами у 2,4-2,8 рази. Це дає змогу пояснити попередньо одержані дані, щодо позитивного впливу фосфатів на активність ферментів амілолітичної дії під час гідроферментативного розварювання житніх замісів: зниження в'язкості середовища сприяє кращому утворенню фермент-субстрактного комплексу та активації і стабілізації ферментних систем.

Оскільки внесення фосфатів за нормативних витрат ферментних препаратів позитивно впливає на реологічні властивості житнього сусла, досліджено можливість приготування житнього сусла підвищеної концентрації сухих речовин (20 %) без додаткових витрат ферментних препаратів амілолітичної дії. Під час досліджень житні заміси готували за такими варіантами: контроль – нормативні витрати ФП без внесення фосфатів; І варіант – витрати ферментних препаратів Амілекс 4Т та Діазим ССФ були збільшені на 15 % щодо нормативних витрат; ІІ варіант – витрати ферментних препаратів як у контрольному варіанті та з внесенням фосфатів із розрахунку 0,05 г/дм$^3$ сусла.

Показники дозрілих бражок, які були одержані під час зброджування житнього сусла концентрацією 20,1 %, наведено в табл. 5. Результати досліджень (табл. 5) показують, що дозрілі бражки, одержані під час зброджування житнього сусла підвищеної концентрації сухих речовин з використанням нормативних витрат ферментних препаратів (контрольний варіант), характеризуються підвищеними показниками незброджених вуглеводів та нерозчиненого крохмалю.

Таблиця 5

*Вплив внесення фосфатів на показники зброджування сусла підвищеної концентрації*

| Показники | Варіанти | | |
|---|---|---|---|
| | Контроль | І | ІІ |
| pH, од. | 4,23 | 4,21 | 4,24 |
| Кислотність, град. | 0,68 | 0,71 | 0,66 |
| Видима густина, % | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| Істинні сухі речовини, % | 5,5 | 5,3 | 5,1 |
| Вміст спирту, об.% | 9,50 | 9,85 | 10,10 |
| Кількість незброджених вуглеводів, г/100 см$^3$: | | | |
| - загальні | 0,93 | 0,58 | 0,39 |
| - водорозчинні | 0,73 | 0,47 | 0,32 |
| - нерозчинений крохмаль | 0,18 | 0,10 | 0,06 |
| - спирторозчинні вуглеводи | 0,35 | 0,25 | 0,15 |
| - декстрини | 0,34 | 0,23 | 0,15 |

За умови збільшення витрат ферментних препаратів на 15 % проти нормативних витрат (вар. І) спостерігається зменшення вмісту незброджених загальних і водорозчинних вуглеводів та нерозчиненого крохмалю, приблизно, на 38, 36 та 45 % відповідно, та збільшення вмісту спирту на 0,35 об.% проти показників у контрольному варіанті. Таке збільшення вмісту спирту можна пояснити тим, що за рахунок збільшення витрат ферментних препаратів покращуються реологічні показники сусла – зменшується вміст декстринів на 32 % та збільшується вміст зброджуваних речовин, які легко засвоюються дріжджами, на що вказує вміст спирторозчинних вуглеводів, які зменшилися на 28,5 %.

Найбільш показовим є варіант ІІ, в якому за умови внесення фосфатів із розрахунку 0,05 г/дм$^3$ сусла та використання нормативних витрат ферментних препаратів вміст спирту в дозрілій бражці збільшився на 0,6 об.% у порівнянні з контрольним варіантом. Відповідно, зменшився вміст незброджених загальних і водорозчинних вуглеводів та нерозчиненого крохмалю, приблизно, на 58, 56 та 67 % порівняно з контролем.

Порівнюючи результати вар. І та вар. ІІ видно, що внесення фосфатів дає можливість стабілізувати активність амілолітичних ферментних препаратів та збільшити взаємодію ферменту із субстратом і тим самим підвищити швидкість утворення фермент-субстратного комплексу, що, у свою чергу, сприяє підвищенню швидкості гідролізу крохмалю жита та збільшенню кількості редукуючих речовин у суслі і, в результаті, дає змогу досягнути нормативних показників у дозрілій бражці.

**Висновки відповідно до статті.** За результатами досліджень показано позитивний вплив фосфатів на активність ферментів під час низькотемпературного розварювання житніх замісів концентрацією від 16,0 до 20,2 %. Встановлено, що при виробництві етилового спирту, використання фосфатів у кількості 0,05 г /дм$^3$ на стадії приготування житнього замісу є раціональною кількістю для покращання дії амілолітичних ферментів. Показано, що за рахунок внесення в житній заміс визначеної кількості фосфатів в'язкість знижується у 2,4-2,8 рази залежно від концентрації сухих речовин, що в свою чергу сприяє кращому утворенню фермент-субстратного комплексу та активації і стабілізації ферментів амілолітичної дії за умов низькотемпературного розварювання жита. Встановлено, що внесення в житній заміс фосфатів за умов нормативної кількості ферментних препаратів дає змогу зброджувати житнє сусло підвищеної концентрації сухих речовин та досягати нормативних показників дозрілої бражки.

## Список використаних джерел

1. Технологія спирту / за ред. В. О. Марінченка. Вінниця: Поділля-2000, 2003. 496 с.

2. ТРУ 18.8049Технологічний регламент виробництва етилового спирту з крохмалевмісної сировини. Київ: УкрНДІспиртбіопрод, 2000. 144 с.

3. Шиян П. Л., Сосницький В. В., Олійнічук С. Т. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: монографія. Київ: ВД «Асканія», 2009. 424 с.

4. Казаков Е. Д., Кретович В. Л. Биохимия зерна и продуктов его переработки. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Агропромиздат, 1989. 368 с.

5. Крикунова Л. Н., Максимова Е. М., Черных В. Я. Реологическое поведение клейстеризованного крахмалосодержащего сырья. *Производство спирта и ликероводочных изделий.* 2001. № 3. С. 24–25.

6. Лукерченко В. Н. Некрахмальные углеводы зерна и их значение для спиртового производства. *Пищевая промышленность*. 2000. № 1. С. 11–13.

7. Кононенко В. В., Крикунова Л. Н., Колпакова В. В. Переработка зерна ржи и ячменя в спиртовом производстве. *Производство спирта и ликероводочных изделий.* 2003. № 3. С. 11–13.

8. Грачева И. М. Технология ферментных препаратов. Москва: Агропромиздат, 1987. 336 с.

9. Кириленко Р. Г. Удосконалення енерго- та ресурсозберігаючої технології спиртової бражки з крохмалевмісної сировини: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.07 / НУХТ. Київ, 2007, 23 с.

10. Процан Н. В. Удосконалення технології спиртової бражки з жита: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.18.05 / Інститут продовольчих ресурсів НААУ. Київ, 2018. 25 с.

11. Protsan N., Oliynichuk S., Verbytskyi S. Effect of alkylresorcinols derivatives on the activity of enzyme preparations. *Технічні науки та технології.* 2017. № 4. С. 235–240.

12. Капрельянц Л. В. Ферменты в пищевых технологиях. Одесса: Друк, 2009. 468 с.

13. Шиян П. Л., Ткаченко Д. О., Ткаченко Л. В. Стабілізація амілолітичної активності ферментних препаратів під час термоферментативного оброблення зернових замісів *Обладнання та технології харчових виробництв:* темат. зб. наук. пр. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 77–82.

14. Ткаченко Д. О., Шиян П. Л., Ткаченко Л. В. Спосіб підвищення активності ферментів сусла під час спиртового збродження. *Наукові праці ОНАХТ,* 2013. Вип. 44. № 2. С. 269–272.

15. Лукачевский Б. П., Куцый И. А., Веретова Т. В. Немецкие фосфаты в пищевой промышленности. *Пищевые ингридиенты: сырье и добавки*. 2002. № 2. С. 56.

16. СОУ–15.9-37-241:2005. Препарати ферментні для спиртового виробництва. Методи визначення амілолітичної активності. Київ: Міністерство аграрної політики України, 2006. 26 с. (Стандарт організацій Мінагрополітики України).

17. ГСТУ 46.045.2003 Зерно. Методи визначення умовної крохмалистості. Київ: Міністерство аграрної політики України. Чинний від 01.01.2004. 23 с. (Галузевий стандарт України).

18. СОУ–15.9-37-243:2005 Сировина крохмалевмісна зброджена для виробництва етилового спирту. Методи визначання незброджених вуглеводів. Київ: Міністерство аграрної політики України, 2006. 20 с. (Стандарт організацій Мінагрополітики України).

19. СОУ–15.9-37-242:2005 Сировина крохмалевмісна зброджена для виробництва етилового спирту. Методи визначання об'ємної частки етилового спирту. Київ: Міністерство аграрної політики України, 2006. 21 с. (Стандарт організацій Мінагрополітики України).

## References

1. Marinchenko, V. O. (Ed.) (2003). *Tekhnolohiya spyrtu [Technology of alcohol]*. Vinnytsya: Podillya-2000 [in Ukrainian].

2. TRU 18.8049-2000 (2000). *Tekhnolohichnyy rehlament vyrobnytstva etylovoho spyrtu z krokhmalevmisnoyi syrovyny [Technological regulation of production of ethyl alcohol from starch-based raw materials]*. Kyiv: UkrNDIspirtbioprod [in Ukrainian].

3. Shyian, P. L., Sosnytskyi, V. V., Oliinychuk, S. T. (2009). *Inovatsiini tekhnolohii spyrtovoi promyslovosti. Teoriia i praktyka.* [*Innovative technologies of the alcohol industry. Theory and Practice*]. Kyiv: Vyd. dim. «Askaniia» [in Ukrainian].

4. Kazakov, E. D., Kretovich, V. L. (1989). *Biokhimiya zerna i produktov yego pererabotki* [*Biochemistry of grain and products of its processing*] (2nd ed.). Moscow: Agropromizdat [in Russian].

5. Krikunova, L. N., Maksimova, E. M., Chernykh, V. Ya. (2001). Reologicheskoye povedeniye kleysterizovannogo krakhmalosoderzhashchego syria [Rheological behavior of pasteurized starch-containing raw materials]. *Proizvodstvo spirta i likerovodochnykh izdeliy – Production of alcohol and alcoholic beverages,* 3, 24–25 [in Russian].

6. Lukerchenko, V. N. (2000). Nekrakhmal'nyye uglevody zerna i ikh znacheniye dlya spirtovogo proizvodstva. [Non-carbohydrate carbohydrates of grain and their significance for alcohol production] *Pishchevaya promyshlennost' – Food industry*, 1, 11–13 [in Russian].

7. Kononenko, V. V., Krikunova, L. N., Kolpakova, V. V. (2003). Pererabotka zerna rzhi i yachmenya v spirtovom proizvodstve [Processing of grain of rye and barley in alcohol production]. *Proizvodstvo spirta i likerovodochnykh izdeliy – Production of alcohol and alcoholic beverages*, 3, 11–13 [in Russian].

8. Hracheva, I. M. (1987). *Tekhnologiya fermentnykh preparatov [Enzyme preparation technology]*. Moscow: Agropromizdat [in Russian].

9. Kyrylenko, R. H. (2007). *Udoskonalennya enerho-ta resursozberihayuchoyi tekhnolohiyi spyrtovoyi brazhky z krokhmalevmisnoyi syrovyny [Improvement of energy and resource-saving technology of alcohol starch from starch-containing raw materials]*. (Candidate's thesis). NUKHT, Kyiv [in Ukrainian].

10. Protsan, N.V. (2018).*Udoskonalennia tekhnolohii spyrtovoi brazhky z zhyta [Perfection of technology of alcohol mash from rye]*. (Candidate's thesis). Instytut prodovolchykh resursiv NAAU, Kyiv [in Ukrainian].

11. Protsan, N., Oliynichuk, S., Verbytskyi, S. (2017). Effect of alkylresorcinols derivatives on the activity of enzyme preparations. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies,* 4, 235–240 [in Ukrainian].

12. Kapreliants, L. V. (2009). *Fermenty v pishchevykh tekhnologiyakh [Enzymes in food technology]*. Odessa: Druk [in Ukrainian].

13. Shyian, P. L., Tkachenko, D. O., Tkachenko, L. V. (2012). Stabilizatsiya amilolitychnoyi aktyvnosti fermentnykh preparativ pid chas termofermentatyvnoho obroblennia zernovykh zamisiv [Stabilization of amylolytic activity of enzyme preparations during thermo-enzymatic treatment of grain mixtures]. *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv – Equipment and technology of food production*, 28, 77–82 [in Ukrainian].

14. Tkachenko, D. O., Shyian, P. L., Tkachenko, L. V. (2013). Sposib pidvyshchennia aktyvnosti fermentiv susla pid chas spyrtovoho zbrodzhuvannia [A method of increasing the activity of wort enzymes during alcohol fermentation]. *Naukovi pratsi ONAHT – Scientific Works ONAHT*, 44 (2), 269–272 [in Ukrainian].

15. Lukachevsky, B. P., Kutsyi, I. A., Veretova, T. V. (2002). Nemetskiye fosfaty v pishchevoy promyshlennosti [German phosphates in the food industry]. *Pishchevyye ingridiyenty: syrie i dobavki – Food Ingredients: Raw and Supplements*, 2, 56 [in Russian].

16. SOU–15.9-37-241:2005 (2006). *Preparaty fermentni dlia spyrtovoho vyrobnytstva. Metody vyznachennia amilolitychnoi aktyvnosti [Enzyme preparations for alcohol production. Methods for determining amylolytic activity]*. Standart orhanizatsii Minahropolityky Ukrainy [in Ukrainian].

17. HSTU 46.045.2003 (2004). *Zerno. Metody vyznachennya umovnoyi krokhmalystosti [Grain. Methods for determining conditional starch]*. Ministerstvo ahrarnoyi polityky Ukrayiny, Kyiv [in Ukrainian].

18. SOU–15.9-37-243:2005 (2006). *Syrovyna krokhmalevmisna zbrodzhena dlia vyrobnytstva etylovoho spyrtu. Metody vyznachannya nezbrodzhenykh vuhlevodiv [Raw starch fused to produce ethyl alcohol. Methods for the determination of non-fermented carbohydrates]*. Standart orhanizatsii Minahropolityky Ukrainy [in Ukrainian].

19. SOU–15.9-37-242: 2005 (2006). *Syrovyna krokhmalevmisna zbrodzhena dlia vyrobnytstva etylovoho spyrtu. Metody vyznachannya ob yemnoyi chastky etylovoho spyrtu [Raw starch fused to produce ethyl alcohol. Methods for determining the volume fraction of ethyl alcohol]*. Standart orhanizatsii Minahropolityky Ukrainy [in Ukrainian].

*UDC 663.53.531*

*Natalia Protsan, Liubov Tkachenko*

# ACTIVATING OF ENZYMES WHILE TENDERIZING OF RYE BATCHES OF HIGH CONCENTRATION WHILE WHILE TENDERIZING OF RYE BATCHES OF RYE BATCHES

***Urgency of the research.*** *For the Ukrainian alcohol industry, the urgent task is to reduce the cost of ethyl alcohol through the more economical use of imported concentrated enzyme preparations, which are widely used in Ukraine.*

***Target setting.*** *An important stage in the production of ethyl alcohol from starch raw materials is the bioconversion of starch of cereal raw materials into alcohol through the use of concentrated enzyme preparations. The main type of grain raw materials processed into ethyl alcohol is rye, the processing of which under low-temperature modes is complicated because of the peculiarities of the structure and components of this culture, which leads to increasing the cost of enzyme preparations of amylolytic process by 15-25 %.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *The scientific researches on the problems of enzymatic hydrolysis of starch of different cultures during the production of ethyl alcohol are reflected in the works by S.T. Oliynychuk, P.L. Shiyan, V.O. Marinchenko, V.V. Sosnitsky, R.G. Kirilenko. The work of these scientists was implemented in the technology of low-temperature hydro-enzymatic processing of such starch-containing raw materials as wheat and corn.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *For today the problem of efficient processing of rye at distilleries remains unresolved, especially while tenderizing of rye batches of high concentration.*

***The research objective.*** *The purpose of this work is to activate amylolytic enzymesduring low-temperature tenderizing of rye batches of high concentration of solids due to the introduction of a rational amount of phosphates that help to maintain the activity of enzymes.*

***The statement of basic materials.*** *The article presents the results of studies of the influence of phosphates on the activity of enzymes during low-temperature tenderizing of rye batches of high-concentration under conditions of production of ethyl alcohol.*

***Conclusions.*** *It is established that the use of phosphates in the amount of 0.05 g / dm3 of wort at the stage of preparation of rye batches is a rational amount at which enzymatic hydrolysis is more complete and the activity of amylolytic enzymes is not reduced. It has been shown that when phosphate is applied, the viscosity of the wort is reduced by 2.4 times, which contributes to the better formation of the enzyme-substrate complex and the action of amylolytic enzymes.*

***Keywords:*** *rye; batch; phosphate; enzyme activity; viscosity; mature mash.*

*Table: 5. References: 19.*

**Процан Наталія Вікторівна** – кандидат технічних наук, зав. відділом технології продуктів бродіння і мікробного синтезу, ДНУ «Український науково-дослідний інститут спирту і біотехнології продовольчих продуктів» (пров. Бабушкіна, 3, м. Київ, 03190, Україна).

**Protsan Natalia** – PhD in Technical science, Head of the Department of Technology of Products of Fermentation and Microbial Synthesis, State Scientific Institution «Ukrainian Research Institute of Alcohol and Biotechnology of Foods» (3 Babushkina Lane, 03190 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** protsannataly@gmail.com.

**Ткаченко Любов Володимирівна** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу технології продуктів бродіння і мікробного синтезу, ДНУ «Український науково-дослідний інститут спирту та біотехнології продовольчих продуктів» (пров. Бабушкіна, 3, м. Київ, 03190, Україна).

**Tkachenko Liubov** – PhD in Technical science, Senior Scientist Spivor, State Scientific Institution Ukrainian Research Institute for Alcohol and Biotechnology of Food Products (3 Babushkina Lane, 03190 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** lubashev28@gmail.com

**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1082-6431

**ResearcherID:** G-7764-2014

Процан Н., Ткаченко Л. Активація ферментів під час розварювання житніх замісів підвищеної концентрації. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 241-249.

*UDC 676.6.614*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-250-256*

*Irina Trembus, Nina Semenenko*

# OXIDATIVE-ORGANOSOLVENT DELEGIFICATION OF WHEAT STRAW

***Urgency of the research.*** *Expansion of the raw material base of the pulp and paper industry of Ukraine takes place through the use of alternative types of vegetable raw materials, namely wheat straw, and the improvement of environmentally friendly oxidative-organosolvent technology for the production of straw pulp.*

***Target setting.*** *Methods for the delignification of vegetable raw materials using the oxidant – hydrogen peroxide – are currently available. The disadvantage of these methods is the high consumption of the oxidant, which constitutes 90 % by weight of absolutely dry raw material that significantly increases the cost of technical cellulose. Therefore, it is necessary to improve the technological parameters of the delignification process of wheat straw with hydrogen peroxide in acetic acid.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Recent open-access publications have been reviewed, including literature on oxidative-organosolvent delignification methods of plant material using peroxoacids.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *Investigation of technological parameters of oxidative-organosolvent delignification for the reduction of oxidant consumption and determination of optimal values of temperature and duration of the delignification process of wheat straw with the mixture of hydrogen peroxide in acetic acid.*

***The research objective.*** *Investigation of straw pulp production method in order to reduce the consumption of cooking reagents while increasing the physical- mechanical properties and yield of the target product.*

***The statement of basic materials.*** *A method of obtaining straw pulp from wheat straw shreddings in acetic acid media with the hydrogen peroxide consumption 50 % by weight of absolutely dry raw material was investigated. The content of the main components in the raw vegetable material was determined. The effect of the delignification conditions, namely the temperature and cooking duration, on the yield of the fibrous semi-finished product, the content of residual lignin and the content of cellulose was studied. It was shown that the increase of temperature from 70 °C to 90 °C and duration of vegetable raw materials processing from 60 to 180 min lead to the decrease in yield by 28 %, the content of residual lignin by 6.5 %, while the cellulose content in the fibrous semi-finished product increased by 21 %. Calculated regression equations adequately described the experimental data and could be used as a mathematical model of the delignification process of wheat straw by hydrogen peroxide in acetic acid media. Optimal values of technological parameters of the wheat straw cooking process were determined using the method of multicriterion optimization of the delignification conditions.*

***Conclusions.*** *Calculated regression equations adequately described the production process of straw cellulose by hydrogen peroxide delignification in acetic acid. Established optimal technological parameters provided obtaining a final product with high quality indicators (yield 78.2%, residual lignin content 3.6%, cellulose content 65.4%, breaking length – 6200 m, punching resistance 210 kPa, tearing resistance – 425 mN, folding endurance 625 n.d.b.).*

***Keywords:*** *wheat straw; hydrogen peroxide; acetic acid; delignification; yield; residual lignin content; cellulose; regression equation.*

*Table: 1. Fig.: 4. References: 10.*

**Urgency of the research.** Scientists are developing new environmentally friendly technologies that are based on the use of non-toxic delignifying reagents [1]. In particular, the processes of oxidative-organosolvent delignification of vegetable raw materials with hydrogen peroxide in the organic acids media are intensively investigated [2]. Such cooking is characterized by a greater selective effect on lignin, which makes it possible to increase the cellulose yield by preserving the polysaccharides (cellulose and hemicelluloses) of vegetable raw materials, by the possibility of using simple schemes of chemicals regeneration with smaller negative environmental impact [2].

**Target setting.** Today, highly selective methods of delignification, such as cooking of vegetable raw materials with peroxoformic (PFA) and peroxoacetic (PAA) acids, have been widely used [3]. It should be noted that the delignification by superacids generated during the cooking process does not lead to the destruction of the high-molecular component of a vegetable material. The disadvantage of such methods of obtaining fibrous semi-finished products is the significant consumption of oxidizer ($H_2O_2$) up to 90 % by weight of absolutely dry (abs. dry) raw materials. This factor of the process greatly increases the cost of technical pulp. Therefore, there is a need to improve the technology of the delignification process of vegetable raw materials with hydrogen peroxide in acetic acid media.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Recent years scientists have conducted a large amount of research on oxidative-organosolvent cooking of vegetable raw materials, primarily agricultural waste [4-6]. Delignification of raw materials was carried out at different consumption of the oxidant ($H_2O_2$) from 5 to 60 % in an organic solvent at pH = 2-4 [7]. At

© Трембус І. В., Семененко Н. В., 2020

the beginning of the process of cooking by peroxoacids, a heterolytic reaction of protonation of an oxygen atom of a hydroxyl group into an α-ether group occurs with the participation of a solvent. The use of oxidant at 50 % by weight of abs. dry raw materials makes possible to run the delignification of vegetable raw materials at temperatures of 90-100 ºC [7]. In addition, it should be noted that the technology of oxidative-organosolvent cooking involves the integrated processing of vegetable raw materials and the utilization of waste alkali liquor.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The absence of defined optimal parameters (temperature and cooking duration) of the wheat straw delignification process with hydrogen peroxide in acetic acid media requires further studies to obtain straw pulp with high quality indicators with minimal energy and chemical expenses.

**The research objective.** The purpose of this work is to study the process of oxidative-organosolvent delignification of wheat straw and to define the optimal values of its carrying out.

To achieve this goal, the following tasks were set:

– to determine the chemical composition of wheat straw shreddings;

– to investigate the impact of main factors of the delignification process on the properties of the final product;

– to make mathematical processing of the experimental data and to optimize the parameters of the straw pulp production basised of the obtained regression equations.

**The experimental part**

Wheat straw stalk (Triticum vulgare), harvested after the growing season and air-dried afterwards, were used for straw pulp research. Wheat straw was sorted from leaves and ears, crushed to a size of 15-20 mm and stored in a desiccator to maintain constant humidity and chemical composition. The chemical composition of wheat straw stems was performed according to TAPPI standard techniques [8]. Oxidative cooking of wheat straw was carried out with a cooking solution containing glacial acetic acid and water at a ratio of $CH_3COOH$ : $H_2O$ – 75:25 % by volume with the addition of hydrogen peroxide 50 % by weight of abs. dry raw material, at concentrations of $H_2O_2$ – 50 %. The delignification process was carried out at a temperature from 70 to 90±2 °C, cooking duration from 60 to 180 minutes, the water duty 10:1.

To save the cooking solution, the delignification process was carried out in heat-resistant flasks connected to backflow condenser. After processing, the fibrous semi-finished product was separated from the solution, rinsed with running water to neutral pH of the wash water, dehydrated and dried to a moisture content 6-8%. The yield of the product was determined gravimetrically. The quality indicators of the obtained cellulose – yield and residual lignin content were determined according to standard methods [8]. Physical-mechanical characteristics: breaking length, punching resistance, tearing resistance, folding endurance were determined according to ГОСТ 14363.4-89 [9].

**The statement of basic materials.** First of all, the chemical composition of the feedstock was determined. As a result of the research, the following chemical composition of wheat straw was obtained: content of cellulose – 50.1 %; lignin – 21.6 %; resins, fats and waxes (RFW) – 2.2 %; pentosans – 26.7 %; water solubility – 10.1 %; solubility in 1 % NaOH solution – 28,5 %; ash – 6.6 %. The obtained results indicated that the chemical composition of wheat straw stems is close to that of the hardwood, except content of minerals, which consists mainly from silicon oxide $SiO_2$. The ash content of wheat straw is several times higher than that of timber due to cereal growing conditions.

In order to obtain straw pulp, a series of laboratory cookings were conducted and the results are shown in Fig. 1.

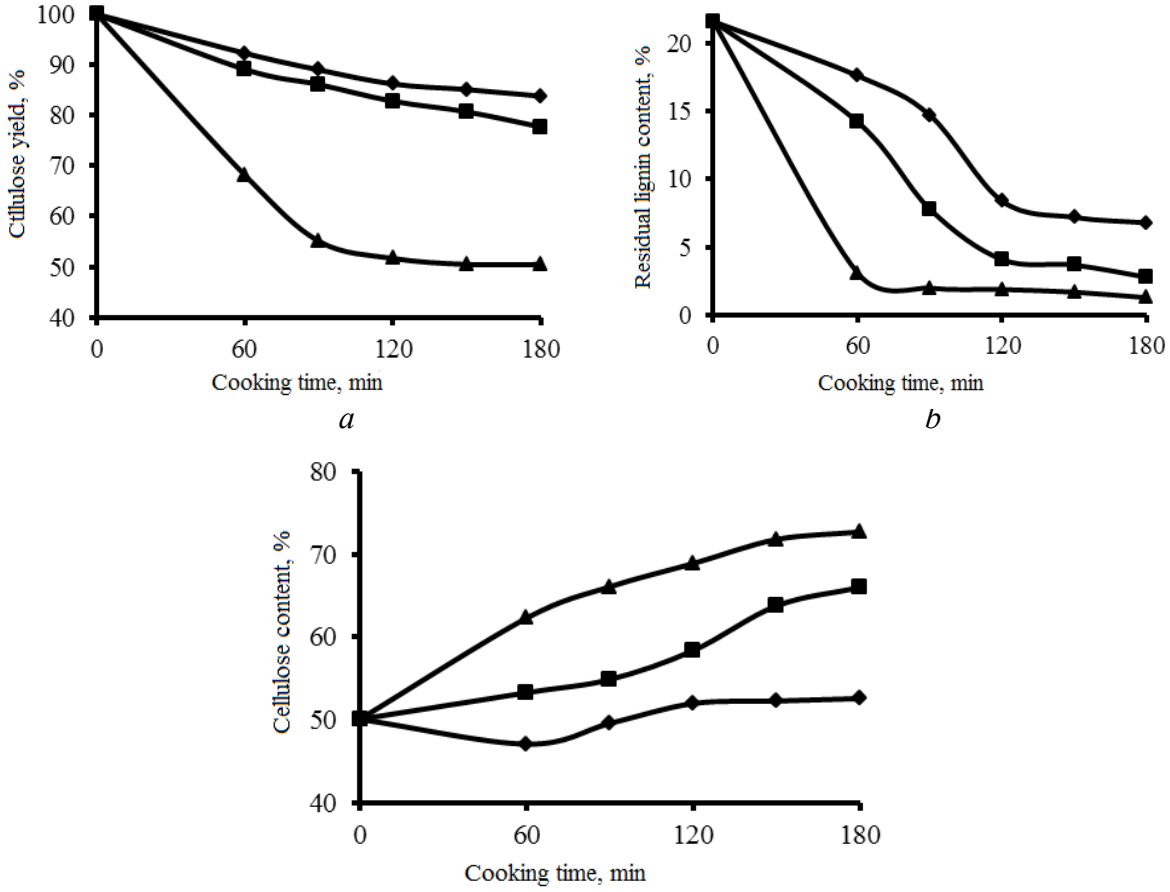



*Fig. 1. Straw pulp quality indicators:*
*a – cellulose yield; b – residual lignin content; c – cellulose content*
*(– ♦ – – 70 ºC, – ■ – – 80 ºC, – ▲ – – 90 ºC)*

As can be seen from the graphical dependencies at Fig. 1 (a), straw pulp yield of decreases with the increase of temperature and duration of cooking. This is due to the intensification of the process of lignin destruction because of the acidic decomposition of α-ether bonds of lignin with the formation of intermediate benzyl carbocations (Fig. 2). This explains the easier delignification of non-wood plant material, in which the proportion of non-cyclic α-aryl ether structures, which are responsible for lignin destruction, is almost as much as twice higher, than that of coniferous lignins. The organic solvent, as a weak nucleophile, blocks the active centers of lignin and impedes the process of its condensation. It should be noted that peroxide delignification of wheat straw is accompanied by partial destruction of polysaccharides, which also leads to a decrease in the yield of technical cellulose. Arabinans content changes the most quickly. The amount of glucans and xylans, which are the main components of the solid residue, decreases evenly throughout the cooking process. The cellular tissue in the straw is resistant to the components of the cooking solution.

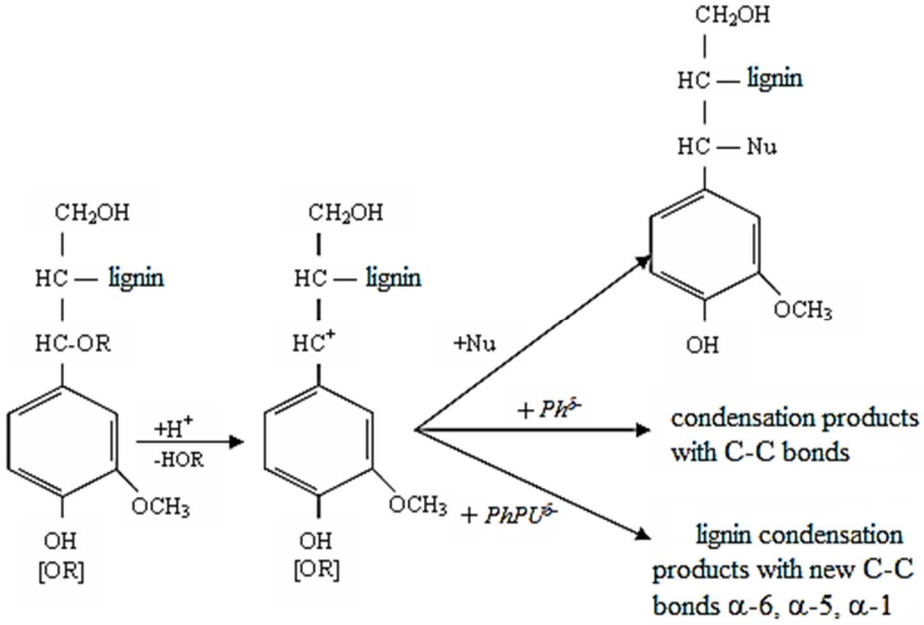



*Fig. 2. The decomposition of α-ether bonds of lignin by organosolvent cooking of plant raw materials in acidic media:*
*Nu – an external nucleophile (HOH, $C_2H_5OH$, $CH_3OH$ etc.); $PhPU^{\delta-}$ – an internal nucleophile (phenylpropane structural unit of lignin); $Ph^{\delta-}$ – an external nucleophile of the phenolic type (phenol, cresols etc.)*

In organosolvent cooking in acidic media, β-ether lignin bonds (primarily the β-O-4 bond at Fig. 3) are also subject to destruction, which also leads to a decrease in the yield of straw fibrous semi-finished products.

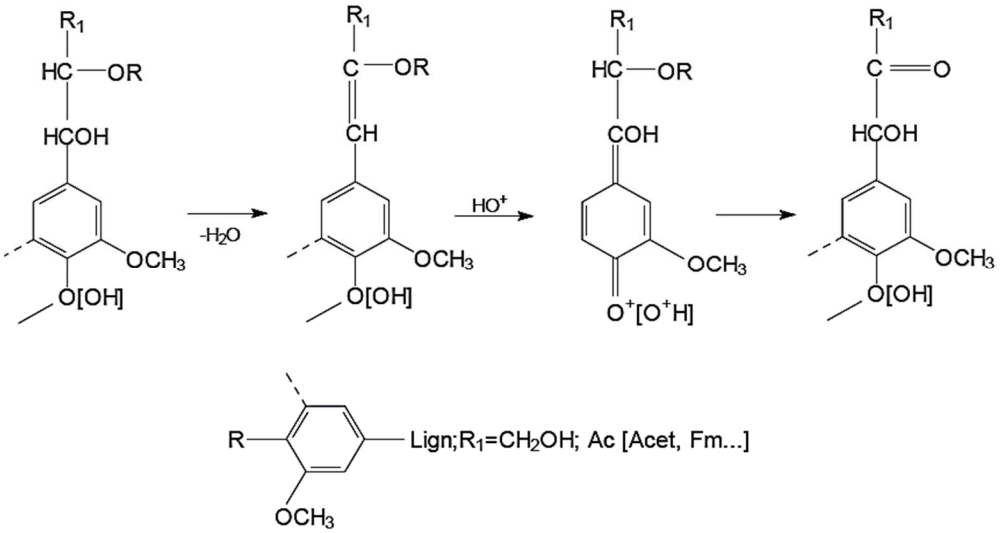



*Fig. 3. The mechanism of decomposition of β – O – 4 bond*

Similar dependencies are observed at Fig. 1 (b), namely with regard to the residual lignin content in straw pulp on changes of technological parameters. It should be noted that the bulk of lignin is removed from the plant material during the first 60 minutes.

The cellulose content increases due to the transition of soluble carbohydrate part of the plant raw materials – hemicelluloses and a considerable amount of pentosans – into cooking solution.

To obtain the mathematical dependence of the quality indicators of straw pulp on the main technological factors, a second-order polynomial was used, which has the following form for two independent variables:

$$y_i = b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_1X_2+b_4X_1^2+b_5X_2^2,$$

where $y_i$ – a quality index of straw pulp

$b_0$, $b_1$, $b_2$, $b_3$, $b_4$, $b_5$ – coefficients of mathematical model

$x_1$ i $x_2$ – the values of the factors.

The following indicators of cellulose quality were determined as variable functions ($y_i$): $y_1$ – yield, %; $y_2$ – content of residual lignin, %. The optimization of technological parameters was performed by the multicriteria estimation method using the generalized Harrington function of desirability. According to the chosen method, the values of the parameters $y_1$ and $y_2$ were converted into the corresponding desires $d_1$ and $d_2$ [10].

As an outcome of mathematical processing of the results of cooking, regression equations were calculated that adequately describe the experimental data and can be used as a mathematical model of oxidative-organosolvent cooking, namely the production of cellulose with predetermined quality parameters.

a) mathematical model for cellulose yield, %

$$y = -696.29 + 0.005155 \cdot X_1 + 21.189 \cdot X_2 + 0.00093917 \cdot X_1^2 – 0.0041333 \cdot X_1 \cdot X_2 – 0.1391 \cdot X_2^2$$

b) mathematical model for residual lignin content, %

$$y = +92.62 – 0.57747 \cdot X_1 – 0.761 \cdot X_2 + 0.00062697 \cdot X_1^2 + 0.0045333 \cdot X_1 \cdot X_2 – 0.0015 \cdot X_2^2$$

c) mathematical model for cellulose content, %

$$y = +49.826 – 0.033267 \cdot X_1 – 0.846 \cdot X_2 + 0.00032806 \cdot X_1^2 + 0.0024833 \cdot X_1 \cdot X_2 – 0.0098 \cdot X_2^2.$$

In the process of mathematical modeling on the basis of the obtained regression equations the technological parameters of the cooking process were determined and the values of the pulp quality indicators in the form of the optimal point were obtained: $X_1 = 90$ ºC, $X_2 = 180$ min.

Using the obtained mathematical dependences, the quality indicators of straw pulp were calculated according to the determined technological parameters and compared with the obtained experimental data. The results are shown in Table 1.

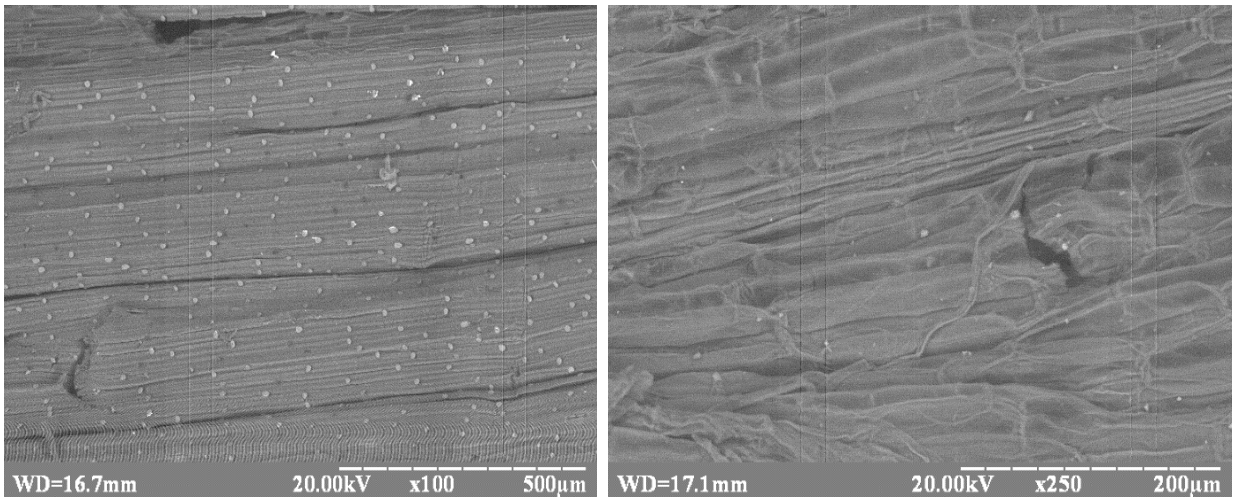
Table 1

*Quality indicators of straw pulp obtained by cooking of wheat straw with hydrogen peroxide in acetic acid media*

| Quality indicators | Theoretical data | Practical data |
|---|---|---|
| Cellulose yield, % | 51,6 | 50,5 |
| Residual lignin content, % | 1,4 | 1,3 |
| Cellulose content, % | 71,2 | 72,7 |

Physical-mechanical parameters of straw technical pulp obtained under optimal conditions of the delignification process were determined in accordance with the accepted methods [9]: breaking length, m – 6200, punching resistance, kPa – 210, tearing resistance, mN – 425, folding endurance, n.d.b. – 625. In terms of strength, obtained cellulose is not inferior to sulfite bleached coniferous pulp of quality class C-II according to GOCT 3914-89.

The samples of wheat straw and straw cellulose were investigated by scanning electron microscopy (Fig. 4).




*a* *b*

*Fig. 4. Photographs of SEM samples of wheat straw (a) and straw cellulose (b) obtained by cooking with hydrogen peroxide in acetic acid at 90 °C during 180 min*

As can be seen from the SEM images, cooking of wheat straw with hydrogen peroxide in acetic acid media leads to a significant change in the length of the fibers.

**Conclusions.** The possibility of delignification of wheat straw shreddings with hydrogen peroxide at its consumption 50 % by weight of abs. dry raw material in acetic acid media is shown.

The effect of temperature and duration of cooking on the quality of straw pulp was investigated. An increase of these parameters was found to reduce the yield of straw pulp and residual lignin content by 39 and 16.3 %, respectively.

Calculated regression equations adequately described the experimental data and could be used as a mathematical model for the oxidative-organosolvent cooking of wheat straw. The optimal technological parameters of the delignification process – temperature 90 °C, cooking time 180 min, and straw pulp quality indicators at the optimum point were determined by the multicriteria optimization method.

## References

1. Barbash, V. A., Deikun, I. M. (2014). *Khimiia roslinnih polimeriv [Chemistry of plant polymers]*. Kyiv: Edelveis [in Ukrainian].

2. Trembus, I. V., Trophimchuk, J. S., Galysh, V. V. (2018). Obtaining of pulp from sulnflower stalks with peracids shells. *Questions of chemistry and chemical technology, 2,* 122–127 [in English].

3. Barbash, V. A., Trembus, I. V., Gapon, O. S., Shevchenko, V. M. (2010). Oderzhannya solom'yanih voloknistih napivfabrikativ peroctovim sposobom delignifikaciyi [Obtaining straw-fiber semi-finished products by percostylation method of delignification]. *Naukovi visti NTUU «KPI» – Scientific news national technical university of Ukraine «KPI», 3,* 42–49 [in Ukrainian].

4. Simenez, L. (2004). Ethylene glycol/soda organosolv pulpino of oliveree rimmings. *Wood and Fiber Saence, 36(3),* 423–431 [in English].

5. Kham, L. (2005). Delignification of wheat straw using a mixture of caroxylic acid and peroxoacids. *Industrial crops and products, 5,* 9–15 [in English].

6. Fagbemigun, T. K., Fagbemi, O. D., Otitoju, O., Mgbachiuzor, E., Igme, C. C. (2014). Pulp and paper-making potential of corn husk. *Int. J. AgriScience, 4,* 209–213 [in English].

7. Trembus, I. V. & Sokolovska, N. V. (2018). Delignifikaciya pshenichnoyi solomi v sistemi $CH_3COOH – H_2O – H_2O_2$ [Delignification of wheat straw in the system $CH_3COOH – H_2O – H_2O_2$]. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe East European Scientific Journal, 2 (30, 2),* 61–66 [in English].

8. Test Methods (2004). *Tappi press* [in English].

9. GOST 14363.4–89. (1991). Cellyuloza. Metod podgotovki prob k fiziko-mehanicheskim ispytaniyam [Cellulose. Method for preparing samples for physical and mechanical tests]. *USSR State Committee for Product Quality and Standards Management* [in Russian].

10. Trautmann, H. (2006). On the distribution of the desirability index using Harrington's desirability function. *Metrika, 63(2),* 207–213 [in English].

*УДК 676.6.614*

*Ірина Трембус, Ніна Семененко*

# ОКИСНО-ОРГАНОСОЛЬВЕНТНА ДЕЛІГНІФІКАЦІЯ ПШЕНИЧНОЇ СОЛОМИ

***Актуальність теми дослідження.*** *Розширення сировинної бази целюлозно – паперової галузі України за рахунок використання альтернативних видів рослинної сировини, а саме пшеничної соломи та вдосконалення екологічно безпечної окисно – органосольвентної технології одержання солом'яної целюлози.*

***Постановка проблеми.*** *Нині наявні методи делігніфікації рослинної сировини з використанням окисника – пероксиду водню. Недоліком таких способів є високі витрати окисника, а саме 90 % від маси абсолютно сухої сировини, що значно збільшує собівартість технічної целюлози. Тому необхідно вдосконалити технологічні параметри процесу делігніфікації пшеничної соломи пероксидом водню в середовищі оцтової кислоти.*

***Аналіз останніх досліджень.*** *Були розглянуті останні публікації що є у відкритому доступі, включаючи літературу щодо окисно–органосольвентних способів делігніфіації рослинної сировини з використанням пероксокислот.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Дослідження технологічних параметрів окисно– органосольвентної делігніфікації - зменшення витрат окисника та визначення оптимальних значень температури і тривалості процесу делігніфікації пшеничної соломи пероксидом водню в середовищі оцтової кислоти.*

***Постановка завдання.*** *Дослідження способу одержання солом'яної целюлози з метою зниження витрат варильних реагентів за одночасного збільшення фізико–механічних показників і виходу цільового продукту.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Досліджено спосіб одержання солом'яної целюлози із січки пшеничної соломи в середовищі оцтової кислоти за витрат пероксиду водню 50 % від маси абсолютно сухої сировини. Визначено вміст основних компонентів у вихідній рослинній сировині. Вивчено вплив умов делігніфікації, а саме температури та тривалості варіння на вихід волокнистого напівфабрикату, вміст в ньому залишкового лігніну та вміст целюлози. Показано, що зростання температури від 70 ºС до 90 ºС і тривалості обробки рослинної сировини від 60 до 180 хв. призводить до зменшення виходу на 28 %, вмісту залишкового лігніну на 6,5 %, при цьому вміст целюлози у волокнистому напівфабрикаті зростає на 21 %. Розраховано рівняння регресії, які адекватно описують експериментальні дані і можуть бути використані в якості математичної моделі процесу делігніфікації пшеничної соломи пероксидом водню в середовищі оцтової кислоти. Методом багатокритеріальної оптимізації умов делігніфікації визначено оптимальні значення технологічних параметрів процесу варіння пшеничної соломи.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Розраховано рівняння регресії, що адекватно описують процес одержання солом'яної целюлози делігніфікацією пероксидом водню в середовищі оцтової кислоти. Встановлено оптимальні технологічні параметри, які забезпечують одержання кінцевого продукту з високими показниками якості (вихід 78,2 %, вміст залишкового лігніну 3,6 %, вміст целюлози 65,4 %, розривна довжина – 6200 м, опір продавлюванню 210 кПа, опір роздиранню – 425 мН, міцність на злам під час багаторазових перегенів 625 к.п.п.).*

***Ключові слова****: пшенична солома; пероксид водню; оцтова кислота; делігніфікація; вихід; вміст залишкового лігніну; целюлоза; рівняння регресії.*

*Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 10.*

**Trembus Irina** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Ecology and technology of plant polymers, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (3 Academician Yangel Str., 03056 Kyiv, Ukraine).

**Трембус Ірина Віталіївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського (вул. Академіка Янгеля, 3, м. Київ, 03056, Україна).

**E-mail:** tivkpi@gmail.com

**Scopus Author ID:** 55227349800

**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6985-4424

**Semenenko Nina** – PhD student of Ecology and technology of plant polymers, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (3 Academician Yangel Str., 03056 Kyiv, Ukraine).

**Семененко Ніна Валеріївна** – аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського (вул. Академіка Янгеля, 3, м. Київ, 03056, Україна).

**E-mail:** nina_sokolovska@ukr.net

Trembus, I., Semenenko, N. (2020). Oxidative-organosolvent delegification of wheat straw. *Technical sciences and technologies*, *1* (19), 250-256.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 544. 023*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-257-263*

*Олена Іщенко*

# ПЛІВКИ МЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ ПОЛІСАХАРИДІВ

***Актуальність теми дослідження*** *визначається необхідністю розробки сучасної вітчизняної технології створення біоактивних полімерних матеріалів для трансдермальних систем та надання їм комплексу властивостей, зокрема знеболювальних та антимікробних. Дослідження набувають актуальності також з урахуванням того, що склади плівок на основі полісахаридів мають певні переваги. Також доступна вітчизняна первинна сировина для їх одержання.*

***Постановка проблеми.*** *Встановити можливість та особливості одержання плівок медичного призначення на основі хітозану та крохмалю.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі стосовно полімерних матеріалів, які використовують для одержання сучасних лікарських засобів, таких як плівки, губки, гелі з антисептичними та фунгіцидними властивостями.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Технології одержання плівки на основі композиції хітозану та крохмалю з покращеними фізико-механічними властивостями.*

***Постановка завдання.*** *Розробити технологію та композиції для одержання плівок на основі полісахаридів, а саме: хітозану, розчиненого в 5 %-вій молочній кислоті, та крохмалю з різними масовими частками, дослідити одержані плівки, встановити придатність цих матеріалів для застосування як плівок медичного призначення.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Встановлено, що полімерна композиція на основі хітозану та крохмалю, за другим способом підготовки, мають покращені фізико-механічні властивості, розривна напруга зростає з 0,38 до 1,64 МПа. Встановлено, що процес термостабілізації та збільшення вмісту крохмалю впливають на сорбційні властивості плівок, які поступово зменшуються від 300 до 110 %, і це дає можливість регулювати кінетику вивільнення.*

***Висновки відповідно до статті.*** *У результаті проведених досліджень встановлено, що запропонована технологія та рецептурний склад плівок на основі полісахаридів може бути застосовано для одержання плівок медичного призначення. Процесом термостабілізації та вмістом крохмалю можна регулювати сорбційні властивості плівок і це вливає на кінетику вивільнення лікарського препарату.*

***Ключові слова:*** *полісахариди; крохмаль; полівініловий спирт; молочна кислота; хітозан; медичні плівки.*
*Рис.: 6. Бібл.: 16.*

**Актуальність теми дослідження.** Асортимент полімерів як природного, так і синтетичного походження постійно розширюється, але тільки деякі з них використовуються для виготовлення матеріалів медичного призначення. Оскільки більшість полімерів мають не тільки формуючі, але й біологічно активні властивості, пролонговану дію, біодоступність низькорозчинних сполук, це визначає можливість розробки лікарських засобів на основі полімерів різної природи та структури [1].

Актуальність теми визначається необхідністю розробки сучасної вітчизняної технології створення біоактивних полімерних матеріалів для трансдермальних систем та надання їм комплексу властивостей, таких як знеболювальні та антимікробні. Дослідження набувають актуальності також з урахуванням того, що плівкові матеріали на основі полісахаридів мають певні переваги, такі як наявність певних функціональних груп, які забезпечують можливість утворення зв'язків різної міцності між полімером-носієм і лікарським препаратом, що дає можливість регулювати активність і стабільність зв'язаної речовини та швидкість її дифузії [2]. Також доступна вітчизняна первинна сировина для їх одержання.

**Постановка проблеми.** Протигрибкові й антимікробні властивості хітозану обумовлені його полікатіонною природою [3]. Антимікробні властивості хітозану залежать від багатьох факторів, зокрема від типу хітозану, його молекулярної маси, pH і концентрації розчину. Однак плівки на основі чистого хітозану не мають необхідних механічних властивостей та водостійкості. Тому правильно підібрана технологія одержання плівок на основі суміші гідрофільних полімерів є вирішенням цієї проблеми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання направленої доставки активного фармацевтичного інгредієнта (АФІ) до ураженої шкіри вивчається лікарями, біологами, фармацевтами, хіміками. Направлена доставка АФІ вирішує медичні та економічні проблеми, знижує побічні ефекти від АФІ, скорочуються терапевтичні дози препаратів.

Останнім часом особливу увагу приділяють розробкам трансдермальних терапевтичних систем — перспективних полімерних форм введення АФІ. Вони являють собою альтернативний спосіб застосування тих ліків, які не можуть бути введені в організм пацієн-

© Іщенко О. В., 2020

та іншим шляхом, або інше введення є менш ефективним. Фізичні та хімічні властивості трансдермальних систем доставки забезпечують безперервне дозування лікарських речовин протягом тривалого часу [4].

Для створення відповідної основи матричної трансдермальної терапевтичної системи у фармацевтичній технології застосовуються різноманітні полімери як природного, так і синтетичного походження [5]. Так, до найпоширеніших природних полімерів можна віднести крохмаль, клітковину, желатин, білки, природні смоли, колаген, альгінати та ін.; до синтетичних – поліетиленоксиди, пропіленгліколь, полівініловий спирт, ПВП, синтетичні смоли та ін. [6]. Слід зауважити, що використання природних полімерів не забезпечує достатньої механічної міцності.

У полімери за допомогою особливої технології вводяться АФІ. В'язкі полімерні композиції є «депо» для АФІ, з якого по мірі набрякання полімеру ліки вивільнюються в зовнішнє середовище. Вибір матеріалів для одержання виробів медичного призначення ґрунтується на можливості гелеутворення обраних полімерів, їхньої здатності утворювати в'язкі стабільні системи, дозволі на використання в медицині та додаткових лікувальних властивостях [7].

Полісахариди поліфункціональні природні полімери, які ідеально підходять для модифікації. Полісахариди можуть бути позитивно зарядженими (хітозан) або негативно зарядженими (альгінат, гепарин, гіалуронова кислота, пектин тощо), що є важливим для їх застосування. На відміну від білків та нуклеїнових кислот, вони можуть утворювати розгалужені структури. Хімічно модифіковані полісахариди можуть бути застосовані в доставці ліків, інженерії тканин, транспортуванні генів тощо [8].

Хітозан має антибактеріальні, протигрибкові та антивірусні властивості. Завдяки позитивному заряду в нейтральних середовищах хітозан має біоадгезивний і бактерицидний ефект і сприяє загоєнню ран, поглинає біологічні рідини й допомагає регенерації тканин [9].

Механізм дії хітозану досі не вивчений повністю, найбільш прийнятний механізм заснований на електростатичних взаємодіях між позитивно зарядженим хітозаном та негативно зарядженою мембраною мікроорганізмів [10]. Однак існують інші механізми дії, такі як взаємодія з ДНК або утворення комплексів з іонами металів [11]. На антимікробну активність хітозану сильно впливають структурні характеристики, такі як молекулярна маса або ступінь деацетилювання, і такі умови навколишнього середовища, як pH, температура або іонна сила [12].

Для контролю як механічних, так і хімічних властивостей різних матеріалів на основі хітозану використовують здатність цього полісахариду до формування комплексів електростатичними силами, фізичними або хімічними зшиваннями. В обзорній публікації [7] розглянуто гідрогелі зі спеціальними властивостями та застосуваннями, які виготовляли із суміші хітозану з іншими природними полімерами, такими як альгінати, целюлоза, колаген і желатин.

Прикладом фізичної модифікації полімерів є створення полімерних покриттів для ран та опіків. У вигляді гелів, плівок, пластин і порошків їх отримують із суміші полімерів, іноді з різною термодинамічною сумісністю. Перевага таких матеріалів полягає в можливості зміни складу і структури у широкому діапазоні, що дає можливість регулювати властивості полімерної матриці та рівень біологічної активності [13].

Ще один полісахарид – крохмаль, який утворюється великою кількістю ланок глюкози, пов'язаних глікозидними зв'язками. Крохмаль - це високогідрофільний полімер, який складається з лінійної амілози та сильно розгалуженого амілопектину. [14]. Однак його механічні показники погані, тому для подолання цього обмеження зазвичай його змішують з іншими біополімерами, такими як хітозан [15].

Полівініловий спирт - це водорозчинний полімер, який отримують гідролізом полівінілацетату, ступінь гідролізу та ступінь полімеризації визначають фізичні властивості полімеру. Завдяки нетоксичній природі його застосовують у фармацевтичних та офтальмологічних виробах, як агент, що змінює в'язкість. Він також використовується в препаратах для пролонгації вивільнення лікарських речовин [16].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Недоліком хітозану є крихкість і зміна структури при стерилізації різними методами, включаючи радіаційний. З метою поліпшення властивостей і розширення області застосування хітозану розробляють різні способи його хімічної модифікації та нові технологічні прийоми його переробки.

**Постановка завдання (цілей статті).** Мета цього дослідження – одержання плівки з покращеними фізико-механічними властивостями на основі композиції хітозану, кукурудзяного крохмалю та встановити вплив технології одержання на властивості матеріалу. Дослідження впливу складу та умов підготовки формувального розчину на фізико-механічні властивості плівки. Встановити, як процес термостабілізації впливає на сорбційні властивості плівок.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі досліджували композиції на основі розчинів хітозану в молочній кислоті, крохмалю з додаванням полівінілового спирту для одержання плівок, придатних для використання в медицині.

Для одержання біосумісних плівок використовували хітозан CAS № 9012-76-4, кукурудзяний крохмаль CAS № 9005-25-8, гліцерин, полівініловий спирт ПВС марки 16/1 (масова частка ацетатних груп, не більше за 0,9-1,7 %). Полімерні плівки формували методом поливу, формувальний розчин наносили на поліпропіленову поверхню та сушили плівку при 40 °С протягом 24 год (рис. 1).

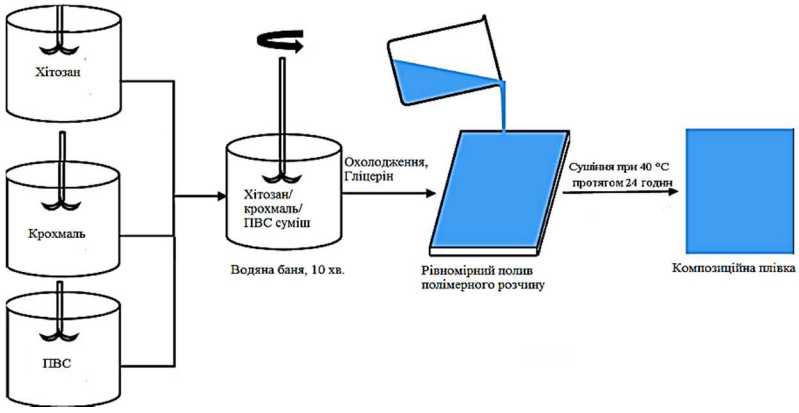



*Рис. 1. Схема одержання плівки медичного призначення методом поливу на основі полісахаридів*

Як пластифікатор використовували гліцерин. Завершальною стадією отримання водонерозчинних хітозановмісних плівок є їх термостабілізація при температурі 75 $^0$С протягом 1, 2, 3 годин. Товщина отриманих плівок 0,22–0,24 мм.

Готували 2,5 % розчин хітозану у 5 % молочній кислоті та окремо 10 % водний колоїдний розчин крохмалю. За першим способом – змішували підготовлені розчини у співвідношеннях (1:3, 1:1, 3:1 мас.ч.). За другим способом – розчини змішували в тих же співвідношеннях і витримували на водяній бані 10 хвилин.

Плівки, які були отримані за двома способами, були крихкими й розчинялись у воді. Тому в подальшому дослідженні додавали в суміш 2 мас.% полівінілового спирту (ПВС) та 1 мас.% гліцерину.

У роботі досліджували реологічні характеристики розчинів, сорбційні, фізико-механічні властивості, мікроскопічні структури плівок.

Проводили реологічні дослідження методом капілярної віскозиметрії (діаметр капіляра – 0,73 мм). На рисунках 2, 3 наведено графіки залежностей питомої та відносної в'язкостей розчинів полімерів від вмісту крохмалю в композиції, які готували за 2 способами.

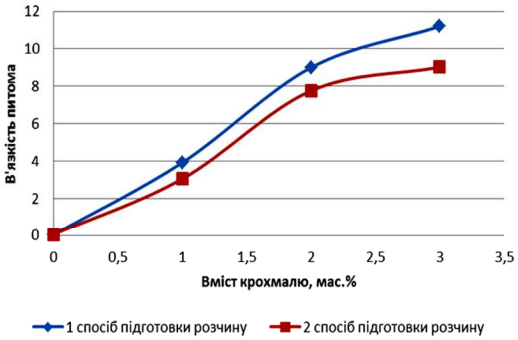



*Рис. 2. Залежність питомої в'язкості від концентрації крохмалю*

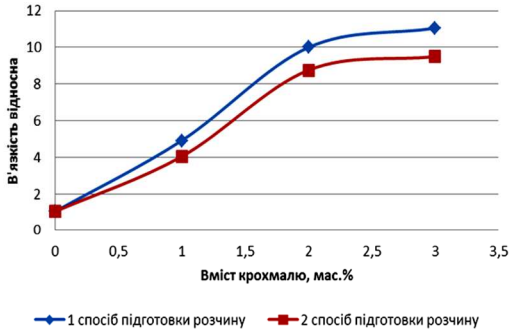



*Рис. 3. Залежність відносної в'язкості від концентрації крохмалю*

Встановлено, що за другим методом приготування всі показники в'язкості менші, ніж за першим методом. На рис. 4 представлено залежності сорбційної здатності плівок відносно дистильованої води від вмісту крохмалю та часу термостабілізації.

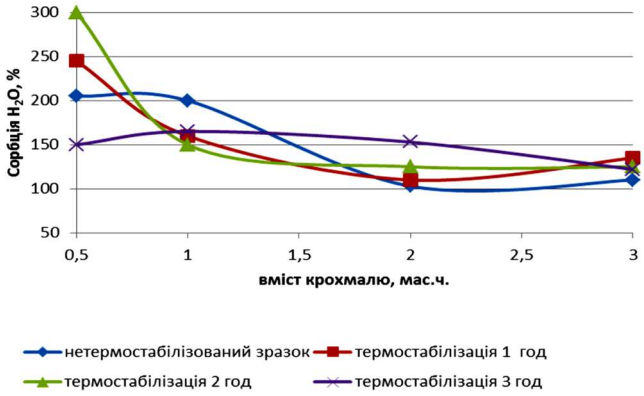



*Рис. 4. Вплив вмісту крохмалю на сорбційні властивості плівкових матеріалів*

Було встановлено, що зі збільшенням вмісту крохмалю сорбційна здатність плівок поступово зменшуються від 300 до 110%.

Час термостабілізації змінює сорбційні властивості плівок на основі хітозану з різним вмістом крохмалю. Це дає можливість регулювати кінетику вивільнення лікарських препаратів та впливати на розчинність плівок залежно від терміну їх експлуатації.

Такі сорбційні характеристики матеріалів, ймовірно, свідчать про одночасне протікання релаксаційного упорядкування надмолекулярної структури полімерів, що призводить до їх локальної кристалізації. Термофіксація сприяє ущільненню структури плівки, посиленню міжмолекулярних взаємодій і змін у будові хітозанового компонента, що призводить до втрати розчинності матеріалу у воді при кімнатній температурі.

Фізико-механічні показники досліджували лише для зразків з вмістом ПВС у складі (рис. 5).

Виявили, що зі збільшенням вмісту крохмалю розривна напруга зростає з 0,38 до 1,64 МПа, а відносне подовження максимальне в композиції при співвідношенні компонентів 3:1. Подальше збільшення вмісту крохмалю призводить до зменшення відносного подовження плівок.

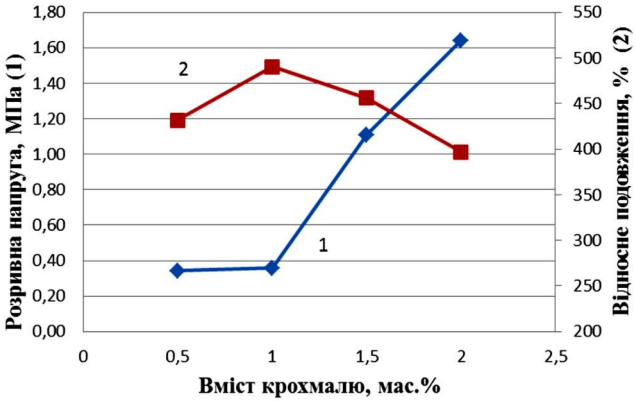
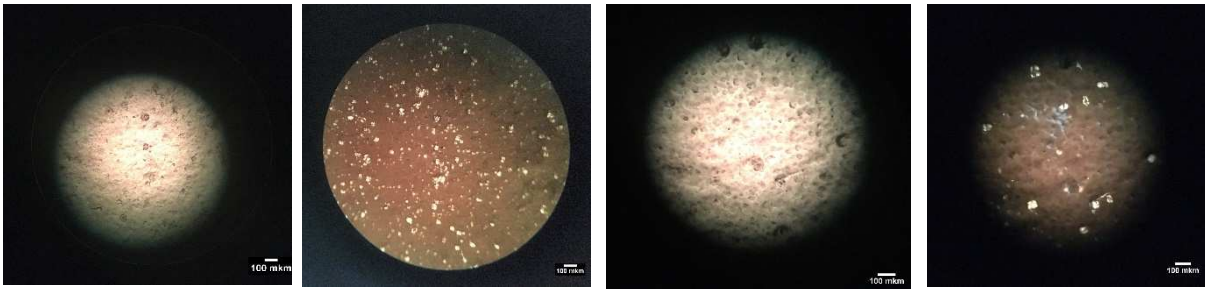



*Рис. 5. Фізико-механічні властивості плівок залежно від вмісту крохмалю*

У роботі досліджена структура плівок на основі хітозану та крохмалю, що вміщують пластифікатор гліцерин. Як імерсійну рідину використовували люголь. Мікрофотографії плівок в поляризованому світлі (поляроїди схрещені) представлені на рис. 6, *б, г*. З мікрофотографій видно, що структура плівок відрізняється залежно від способу підготовки розчину.



*а* *б* *в* *г*

*Хітозан/Крохмаль (3:1) за 1 способом (б) у поляризованому світлі*

*Хітозан/Крохмаль (3:1) за 2 способом (г) у поляризованому світлі*

*Рис. 6. Мікрофотографії плівок на основі полісахаридів*

Мікроскопічними дослідженнями було встановлено, що плівки мають однорідну структуру, але зразки плівок, які виготовлені за 2 способом (рис. 6 в, г), показали кращі результати. На мікрофотографіях у поляризованому світлі за 1 (рис. 6, г), способом підготовки плівок спостерігається наявність більшої кількості крохмальних зерен, що пов'язано з відсутністю деструкції крохмалю в розчині з хітозаном та молочною кислотою.

Плівка, одержана з таких розчинів, має характерну сітчасту структуру, в якій краплі полімеру оточені тонкими прошарками розчинника. Зі збільшенням вмісту крохмалю відносна питома в'язкість зростає, але за другим способом відбувається деструкція крохмалю в молочній кислоті, тому в'язкість знижується. Очевидно, утворення такої структури (2 спосіб) у розчині та призводить до зменшення його в'язкості. Плівки отримані за 2 способом більш еластичні, та рівномірні за своєю структурою.

**Висновки відповідно до статті.** У роботі досліджено одержання плівок на основі композиції біосумісних полімерів із покращеними фізико-механічними властивостями. Плівки на основі чистого хітозану та композицій хітозан/крохмаль не мають потрібних механічних властивостей та водостійкості, тому досліджували вплив різних способів підготовки розчинів композицій полімерів та процесу термостабілізації на властивості плівок. За другим способом плівки мають покращені фізико-механічні властивості, їх розривна напруга зростає з 0,38 до 1,64 МПа, вони еластичні та рівномірні за своєю структурою. Встановлено, що процес термостабілізації, з одного боку, та збільшення

вмісту крохмалю, з іншого боку, впливають на сорбційну здатність плівок, яка поступово зменшується від 300 до 110 %, що дає можливість регулювати кінетику вивільнення АФІ. Плівки на основі композиції хітозан/крохмаль (3:1) показали покращені фізико-механічні властивості та сорбційні характеристики на рівні 150 %.

## Список використаних джерел

1. Habib W, Khankari R, Hontz J. Fast-dissolving drug delivery systems, critical review in therapeutics. *Drug Carrier Syst.* 2000. Vol. 17. P. 61–72.

2. Krajewska B. Application of chitin- and chitosan-based materials for enzyme immobilizations: a review. *Enzyme and Microbial Technology*. 2004. Vol. 35. P. 126–139.

3. Joshi M., Wased Ali S., Purwar R., Rajendran S. Eco-friendly antimicrobial finishing of textiles using bioactive agents based on natural products. *Indian Journal of Fibre and Textile.* 2009. Vol. 34, № 9. P. 295–304.

4. Cumpstey I. Chemical Modification of Polysaccharides. International scholarly research notices. 2013.:41767. ISRN Org. Chem. 2013. doi: 10.1155/2013/417672.

5. Кравченко И. А. Трансдермальное введение лекарственных препаратов. Одесса: Астропринт, 2001. 166 с.

6. Leila N. Hassani, Frederic Hendra, Kawthar Bouchemal. Auto-associative amphiphilic polysaccharides as drug delivery systems. *Drug Discov Today.* 2012. № 17, № 11/12. P. 608–614.

7. Wu T., Li Y., Lee D. S. Chitosan-based composite hydrogels for biomedical applications. *Macromolecular Research*. 2017. Т. 25, № 6. P. 480–488.

8. Joseph F. PJ., Arun K. J., Navas A. A., Irene J. Biomedical Applications of Polymers - An Overview. Curr Trends Biomedical Eng & Biosci. 2018. № 15(2). P. 55–59.

9. Sogias I. A., Williams A. C., Khutoryanskiy V. V. Why is chitosan mucoadhesive? *Biomacromolecules*. 2008. Т. 9, № 7. С. 1837–1842.

10. Tang H., Zhang P., Kieft T.L., Ryan S. J., Baker S. M., Wiesmann W. P.; Rogelj S. Antibacterial action of a novel functionalized chitosan-arginine against gram-negative bacteria. *Acta Biomater*. 2010. Vol. 6. P. 62–71.

11. Raafat D., von Bargen, K., Haas A., Sahl H. G. Insights into the mode of action of chitosan as an antibacterial compound. *Appl. Environ. Microbiol*. 2008. Vol. 74. P. 64–73.

12. Muñoz-Bonilla A., Cerrada M. L., Fernández-García M. Antimicrobial activity of chitosan in food, agriculture and biomedicine. In Polymeric Materials with Antimicrobial Activity / Eds. Muñoz-Bonilla A., Cerrada M. L., Fernández-García M. *Royal Society of Chemistr*y: Cambridge, UK, 2013. P. 22–54.

13. Карпенко О. С., Демченко І. Б. Біологічно активні полімерні системи з лікарськими речовинами. *Полімерний журнал.* 2013. № 35 (4). С. 333-342.

14. Cazón P., Velazquez G., Ramírez J. A., Vázquez M. Polysaccharide-based films and coatings for food packaging*: A review. Food Hydrocoll.* 2017. Vol. 68. P.136–148.

15. The Antibacterial Activity of Chitosan Products Blended with Monoterpenes and Their Biofilms against Plant Pathogenic Bacteria Mohamed E. I. Badawy, Entsar I. Rabea, Nehad E. M. Taktak, and Mahmoud A. M. El-Nouby Hindawi. *Publishing Corporation Scientifica – 2016.* http://dx.doi.org/10.1155/2016/1796256.

16. Mannan A., Pawar S. J. Anti-infective coating of gentamicin sulphate encapsulated PEG/PVA/chitosan for prevention of biofilm formation. *Int. J. Pharm. Pharm. Sci.* 2014. Vol. 6. P. 571-576.

## References

1. Habib, W., Khankari, R., Hontz, J. (2000). Fast-dissolving drug delivery systems, critical review in therapeutics. *Drug Carrier Syst.,* 17, 61–72.

2. Krajewska, B. (2004). Application of chitin- and chitosan-based materials for enzyme immobilizations: a review. *Enzyme and Microbial Technology,* 35, 126–139.

3. Joshi, M., Wased, Ali S., Purwar, R., Rajendran, S. (2009). Eco-friendly antimicrobial finishing of textiles using bioactive agents based on natural products. *Indian Journal of Fibre and Textile,* 34 (9), 295–304.

4. Cumpstey I. (2013). Chemical Modification of Polysaccharides. *International scholarly research notices,* 41767, 27.

5. Kravchenko, I. A. (2001). *Transdermalnoe vvedenie lekarstvennykh preparatov [Transdermal drug administration]*. Odessa: Astroprint [in Russian].

6. Leila, N. Hassani, Frederic Hendra, Kawthar Bouchemal (2012). Auto-associative amphiphilic polysaccharides as drug delivery systems. *Drug Discov Today,* 17 (11/12), 608–614.

7. Wu, T., Li, Y., Lee, D. S. (2017). Chitosan-based composite hydrogels for biomedical applications *//Macromolecular Research,* 25 (6), 480–488.

8. Joseph, F. PJ., Arun, K. J., Navas, A. A., Irene, J. (2018). Biomedical Applications of Polymers - An Overview. Curr Trends. *Biomedical Eng & Biosci,* 15(2), 55–59.

9. Sogias, I. A., Williams, A. C., Khutoryanskiy, V. V. (2008). Why is chitosan mucoadhesive? *Biomacromolecules,* 9 (7), 1837–1842.

10. Tang, H., Zhang, P., Kieft, T. L., Ryan, S. J., Baker, S. M., Wiesmann, W. P., Rogelj, S. (2010). Antibacterial action of a novel functionalized chitosan-arginine against gram-negative bacteria. *Acta Biomater,* 6, 62–71.

11. Raafat, D., vonBargen, K., Haas, A., Sahl, H. G. (2008). Insights into the mode of action of chitosan as an antibacterial compound. *Appl. Environ. Microbiol.*, 74, 64–73.

12. Muñoz-Bonilla, A., Cerrada, M. L., Fernández-García, M. (Eds.) (2013). Antimicrobial activity of chitosan in food, agriculture and biomedicine. In Polymeric Materials with Antimicrobial Activity. *Royal Society of Chemistry: Cambridge, UK,* 22–54.

13. Karpenko, O. S., Demchenko, I. B. (2013). Biolohichno aktyvni polimerni systemy z likarskymy rechovynamy. *Polimernyi zhurnal,* 35 (4), 333–342 [in Ukrainian].

14. Cazón, P., Velazquez, G., Ramírez, J. A., Vázquez, M. (2017). Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: *A review. Food Hydrocoll.*, 68, 136–148.

15. The Antibacterial Activity of Chitosan Products Blended with Monoterpenes and Their Biofilms against Plant Pathogenic Bacteria Mohamed E. I. Badawy, Entsar I. Rabea, Nehad E. M. Taktak, and Mahmoud A. M. El-Nouby Hindawi. *Publishing Corporation Scientifica,* 2016. Article ID 1796256. DOI: http://dx.doi.org/10.1155/2016/1796256.

16. Mannan, A., Pawar, S. J. (2014). Anti-infective coating of gentamicin sulphate encapsulated PEG/PVA/chitosan for prevention of biofilm formation. *Int. J. Pharm. Pharm. Sci.,* 6, 571–576.

*UDC 544. 023*

*Olena Ishchenko*

## MEDICAL PURPOSE FILMS BASED ON POLYSACCHARIDES

***Urgency of the research.*** *It is determined by the need of modern domestic technology development for the creation of bioactive polymeric materials for transdermal systems and giving them specific properties, such as painkillers and antimicrobials. Research is also relevant due to polysaccharide-based film compositions have several advantages. Domestic raw materials are also available for their production.*

***Target setting.*** *To determine the possibility and specialties of obtaining medical films based on chitosan and starch.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Recent open access publications have been reviewed regarding polymeric materials used to produce modern drugs such as films, sponges, gels with antiseptic and fungicidal properties.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *Technology for film production based on chitosan and starch composition with improved physical and mechanical properties.*

***The research objective.*** *To develop technology and compositions for obtaining polysaccharide films, namely: chitosan dissolved in 5% lactic acid and starch with different mass fractions, to examine the obtained films, to determine the suitability of these materials for use as medical films.*

***The statement of basic materials.*** *The polymer composition based on chitosan and starch, according to the second method of preparation, has improved physical and mechanical properties, the breaking stress increases from 0.38 to 1.64 MPa. It has been found that the process of thermostabilization and starch content increasing affect the sorbtion properties of films, which gradually decrease from 200 to 110 %, and this allows to regulate the release kinetics.*

***Conclusions.*** *As the result of the conducted researches, it is found that the proposed technology and prescription composition of films based on polysaccharides can be applied for production of medical films. The process of thermostabilization and starch content can regulate the sorbtion properties of the films and this influences the release kinetics of the drug.*

***Keywords:*** *polysaccharides; starch; polyvinyl alcohol; lactic acid; chitosan; medical films.*

*Fig.: 6. References: 16.*

**Іщенко Олена Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ПЕТПХВ, Київський національний університет технологій та дизайну (вул. Немировича-Данченка, 2, м. Київ, 01011, Україна).
**Ishchenko Olena** – PhD, Associate professor, Department of AETPCF, Kyiv National University of Technologies and Design (2 Nemirovich-Danchenko Str., 01011 Kyiv, Ukraine).
**E-mail:** e.ishchenko5@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9510-6005
**Scopus Author ID:** 57200013816

Іщенко О. Плівки медичного призначення на основі полісахаридів. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 257-263.

*УДК 667.622.11*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-264-271*

*Лілія Фролова, Тетяна Бутиріна*

# ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛІРНИХ ТА АНТИКОРОЗІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІГМЕНТІВ У СИСТЕМІ Fe-Al-Mg-O-H

***Актуальність теми дослідження.*** *Перспективними пігментами пасивуючого типу, крім фосфатних, є інші матеріали – оксигідроксиди, ферити, молібдати, станати, борати, вольфрамати, які отримують за традиційними технологіями. Проте ці методи зазвичай пов'язані зі значними витратами енергії, великою тривалістю синтезу, необхідністю подрібнення спіків до дрібнодисперсного стану. Зростає інтерес дослідників до методу співосадження, який дозволяє варіювати катіонним та аніонним складом пігментів.*

*Крім того, перед розробниками лакофарбових матеріалів стоїть задача заміни токсичних протикорозійних хром-, кадмій- та плюмбумвмісних пігментів, що входять до складу більшості сучасних ґрунтовок інгібуючого типу. Альтернативою таким лакофарбовим матеріалам є наповнювачі оксидного типу, які є антикорозійними пігментами, у тому числі оксигідроксиди, ферити магнію, алюмінати кобальту, ферити цинку, ферити міді, алюмінати магнію, алюмінати цинку тощо. Забарвлення пігментів, їх антикорозійні властивості залежать від іонів хромофорів, які входять до складу структури отримуваних сполук.*

***Постановка проблеми.*** *Технологія співосадження має певні переваги в порівнянні із традиційними та дозволяє радикально здешевити отримання оксидних матеріалів. Такий процес, заснований на використанні внутрішньої хімічної енергії системи, дає змогу проводити синтез за зменшених температурі, тривалості синтезу та енергетичних витратах. Простота обладнання, можливість синтезу значної кількості продукту необхідного фазового та гранулометричного складу, екологічна чистота процесу також вказують на доцільність використання цього методу.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Останнім часом робились спроби одержання пігментів методом співосадження, але систематичних досліджень кінцевих продуктів не проводилось. Отримані продукти в більшості випадків формувались у вигляді погано відтворюваних за складом продуктів. У зв'язку з цим цікавим стає синтез у такому режимі, який дозволив би отримувати пігменти з хорошими колірними характеристиками в дрібнодисперсному стані, і виключив трудомістку стадію подрібнення.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Вивчення умов утворення пігментів зі структурою оксигідроксидів, впливу їхнього складу на колірність та антикорозійні властивості.*

***Постановка завдання.*** *Вивчення закономірностей формування антикорозійних властивостей, розробка складів для одержання пігментів із використанням методу співосадження і наступною термообробкою.*

***Виклад основного матеріалу.*** *За допомогою експериментальних і теоретичних досліджень встановлено вплив природи катіонів хромофорів на колірний тон, чистоту кольору, антикорозійні властивості пігментів в системі Fe-Al-Mg-O, що дозволяє проводити цілеспрямований синтез пігментів бежевої, червоної та жовтої колірної гами з високими антикорозійними властивостями.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Основні технологічні властивості пігментів визначаються аніонним і катіонним складом. Антикорозійні властивості оксигідроксидних пігментів більшою мірою визначаються наявністю іонів гідроксила, що утворюються внаслідок дисоціації. Найбільший ефект спостерігається в разі використання сполук металів, константи дисоціації яких значно відрізняються. Захисний ефект переважно визначається уповільненням анодного процесу. При цьому аніони, які містять атоми алюмінію, прискорюють корозійні процеси.*

***Ключові слова:*** *пігменти; колір; кольороутворення; pH витяжки; потенціал; корозія.*
*Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 11.*

**Актуальність теми дослідження.** Актуальною проблемою в теперішній час є розробка ефективних неорганічних пігментів, які мають інгібіторні властивості в нейтральних середовищах. Перспективними пігментами пасивуючого типу, крім фосфатних, є інші солевмісні матеріали – ферити, молібдати, станати, борати, вольфрамати [1–6]. Ефективність перелічених пігментів, як показують сучасні дослідження, істотно зростає при їх спільному поєднанні та не обмежується тільки пасивуючою дією [2; 3]. У роботах [7–10] показана висока інгібуюча здатність неорганічних пігментів, отриманих за керамічною технологією. Проте цей метод пов'язаний зі значними витратами енергії, великою тривалістю синтезу, необхідністю подрібнення спіків до дрібнодисперсного стану. Зростає інтерес дослідників до методу співосадження, який дозволяє варіювати катіонним та аніонним складом пігментів.

Крім того, перед розробниками ЛФМ постає завдання заміни токсичних протикорозійних хром-, кадмій- та плюмбумвмісних пігментів, що входять до складу більшості сучасних ґрунтовок інгібуючого типу. Альтернативою таким ЛФМ є наповнювачі оксидного типу, в тому числі окси- та гідроксиди металів, алюмінати кобальту, ферити цинку, ферити міді, алюмінати магнію, алюмінати цинку тощо. Передбачається, що процес, який інгібує корозію в присутності оксидних сполук, пов'язаний з їх гідроліз-

© Фролова Л. А., Бутиріна Т. Є., 2020

зом, який приводить до збільшення pH під пігментованим лакофарбовим покриттям. До того ж вони підсилюють бар'єр для дифузії води та кисню за рахунок утворення комплексів з кислотними групами плівкоутворювачів. З іншого боку, забарвлення пігментів залежить від іонів хромофорів, які входять до складу структури отримуваних сполук. У пігментах, у тому числі й в оксигідроксидах, як відомо, основними хромофорами є іони перехідних металів, використання яких дає можливість варіювати pH водної витяжки і таким чином додатково регулювати антикорозійні властивості пігментів [6–10].

**Постановка проблеми.** Технологія співосадження має певні переваги в порівнянні із традиційними та дозволяє радикально здешевити отримання тугоплавких матеріалів. Такий процес, заснований на використанні внутрішньої хімічної енергії системи, дає змогу проводити синтез за зменшених температурі, тривалості синтезу та енергетичних витратах та отримувати продукти з заданими властивостями. Простота обладнання, можливість синтезу значної кількості продукту необхідного фазового та гранулометричного складу, екологічна чистота процесу також вказують на доцільність використання цього методу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом робились спроби одержання пігментів методом співосадження, але систематичних досліджень кінцевих продуктів не проводилось. Отримані продукти в більшості випадків формувались у вигляді погано відтворюваних за складом щільних продуктів. У зв’язку з цим цікавим стає синтез у такому режимі, який дозволив би отримувати пігменти з хорошими колірними характеристиками в дрібнодисперсному стані, і виключив трудомістку стадію подрібнення.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Вивчення умов утворення пігментів зі структурою оксигідроксидів, впливу їхнього складу на колірність та антикорозійні властивості.

**Постановка завдання.** Вивчення закономірностей формування антикорозійних властивостей, розробка складів для одержання пігментів із використанням методу співосадження і наступною термообробкою.

**Виклад основного матеріалу.**

**Методика експерименту.** Для одержання спільно осаджених гідроксидів використовували водні розчини солей. Умови синтезу варіювали за такими параметрами: природа вихідних солей металів, співвідношення катіонів металів. Концентрація розчинів солей становила 0,5 моль/л, осаджувача 1 моль/л, pH водної витяжки та антикорозійні властивості визначали за методиками, наведеними в [11].

Протикорозійну активність пігментів оцінювали потенціодинамічним методом, порівняння анодних та катодних поляризаційних кривих, а також розрахованих на підставі тафелевських ділянок кривих потенціалів і струмів корозії. Поляризаційні криві отримували на установці, що складалась із потенціостата Potentiostat / Galvanostat / ZRA Gamry, підключеного до ПК з використанням програми Gamry Framework. Швидкість сканування потенціалу 50 мВ/с. Як робочий електрод використовували пластини зі сталі марки Ст 3 площею 1 см$^2$. Ст 3 – одна з найбільш часто використовуваних у промисловості марок сталі. Перед експериментом електроди полірували, знежирювали, витримували в розчині HCl (1:1 об.) протягом хвилини. Допоміжним електродом слугував платиновий дріт.

Електродні потенціали вимірювали відносно насиченого хлоридсрібного електрода і перераховували у шкалу стандартного водневого електрода. Температура експерименту становила (298 ± 1) К.

Результати вимірювань обробляли за допомогою методу симплекс-решітчастого планування. При вивченні властивостей суміші в залежності від вмісту компонентів в ній, факторний простір представляли у вигляді правильного *(q-1)* – розмірного симплекса. З метою вивчення залежності позначених фізико-хімічних та оптичних характерис-

тик пігментів від складу й температури відпалу пігментів за допомогою симплекс-решітчастого методу планування були проведені відповідні експерименти. Поверхні реакції на діаграмах «склад-властивість» зображували за допомогою ізоліній, які виконували з використанням математичних моделей.

Ефективність інгібітора (ступінь захисту) визначали за формулою (1):

$$\eta = \left( \frac{I_0 - I_{інг}}{I_0} \right) \cdot 100 , \quad (1)$$

де η – ступінь захисту, %;

$I_0$ – струм корозії у фоновому розчині, А/см$^2$;

$I_{інг}$ – струм корозії у присутності інгібітора, А/см$^2$.

Рентгенограми пігментів отримували на приладі ДРОН-2.0 у монохроматизованому мідному випромінюванні з нікелевим фільтром.

**Результати та обговорення.**

Характеристика синтезованих композицій наведена в табл. 1. Залежність колірних показників у вигляді діаграм склад–властивість наведена на рис. 1.

Таблиця 1

*Колірні характеристики пігментів Fe-Al-Mg-O-H*

| № з/п | Склад, частки | | | КДВ, % | λ, нм | Р, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fe | Al | Mg | | | |
| 1 | 1 | | | 36,49 | 588 | 69 |
| 2 | 2/3 | 1/3 | | 33,85 | 599 | 50 |
| 3 | 1/3 | 2/3 | | 33,24 | 596 | 40 |
| 4 | | 1 | | 94,25 | 700 | 1 |
| 5 | | 2/3 | 1/3 | 79,97 | 700 | 5 |
| 6 | | 1/3 | 2/3 | 62,68 | 605 | 10 |
| 7 | | | 1 | 26,15 | 591 | 15 |
| 8 | 1/3 | | 2/3 | 28,33 | 596 | 40 |
| 9 | 2/3 | | 1/3 | 18,76 | 595 | 30 |
| 10 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 25,23 | 595 | 35 |

Аналізуючи отримані дані, можна сказати, що колір обумовлений фазовим складом утворених гідроксидів та оксигідроксидів. Жовтий колір зразка № 1 відповідає утворенню ферум(III) оксигідроксиду. Зміна насиченості жовтого кольору по стороні Fe-Al трикутника залежить від вмісту катіонів алюмінію. Причому, кольороутворення відбувається згідно із законом адитивності. Присутність катіонів алюмінію призводить до утворення твердих розчинів оксигідроксидів феруму та алюмінію. Зразок № 4 відповідає утворенню гідроксиду алюмінію білого кольору. Зразки № 5 і 6 відповідають різному вмісту магнію та визначають бежево-молочні кольори утворених продуктів.

Гідроксид магнію (зразок № 7) має бежевий колір – довжина хвилі 591 нм відповідає жовто-зеленій області спектра. Комбінації катіонів магнію та феруму дають кольори коричневих відтінків, переважаюча довжина хвилі яких 596 нм відповідає червоній області спектра. Збільшення вмісту катіонів феруму надає пігменту темно-коричневий колір. Потрійна точка (Fe-Mg-Al) має також коричневий колір. Найбільший показник КДВ (коефіцієнт дифузного відбиття) свідчить про виражений блиск (зразок № 4 КДВ=94,25–94,62). Склади по сторонах трикутника Fe-Mg, Fe-Al відповідають нижчим значенням КДВ, зумовленим наявністю сполук феруму. При додаванні до складу пігменту сполук феруму збільшується чистота кольору приблизно на 20-25 %.

Оскільки однією з важливих технологічних характеристик пігментів є корозійна стійкість, далі досліджувалась їх антикорозійна дія за відомими методиками [11].

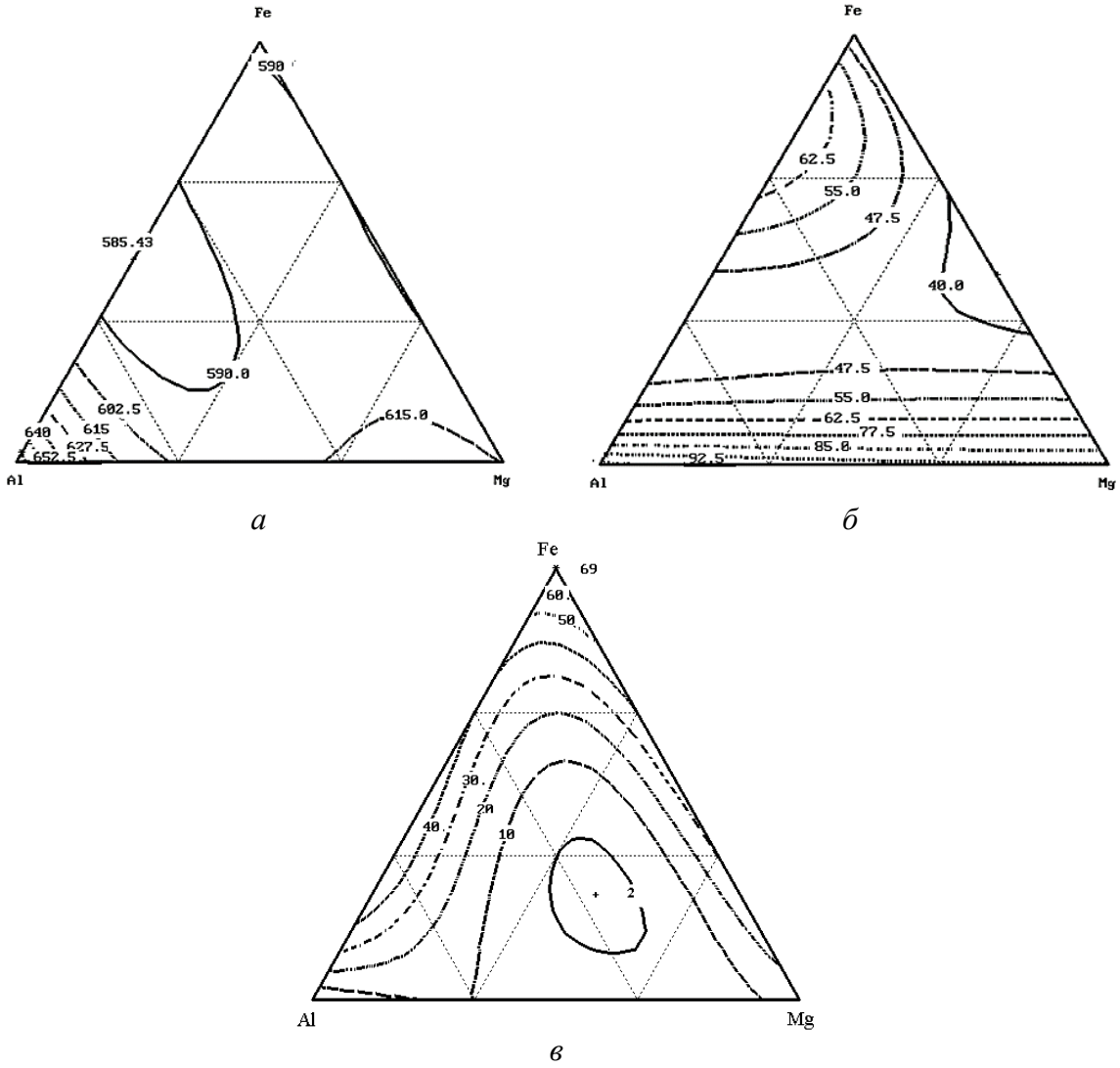



*Рис. 1. Колірні характеристики пігментів системи Fe-Al-Mg-O: (а) КДВ пігментів (б), чистота кольору пігментів (в)*

Відомо, що інгібуючий ефект може бути зумовлений гальмуванням анодної реакції, гальмуванням катодної і обох реакцій. Цікавим є порівняння складу пігменту з його антикорозійною дією, а також врахування впливу природи катіонів та аніонів на швидкість корозії. Можна припустити, що найбільшу антикорозійну дію будуть здійснювати солі металів, що дають при гідролізі лужне середовище, а також гідроксиди металів, що проявляють значно виражені амфотерні властивості (Al, Mn, Cr, Pb, Sn, Zn). Особливе місце посідають метали, що утворюють стійкі оксиди з низьким значенням добутку розчинності ($TiO_2$, $ZrO_2$). Досліджена система містить катіони металів, гідроксиди яких виявляють основні властивості за зменшенням таким чином $Mg(OH)_2 \rightarrow Fe(OH)_3 \rightarrow Al(OH)_3$. Цікаво порівняти співвідношення компонентів у пігментах з їх антикорозійними властивостями.

Найвища швидкість анодного процесу у зразка 4, а інші можна розташувати таким чином 4<6<1,7,8 <2,5 <10<3 <9.

Аналіз рис. 2 показує, що значення pH водного середовища для пігментів знаходяться в діапазоні від 5,0 до 11, проте, значення ступеня захисту змінюється від 40 до 82 % і не в усіх випадках корелюють зі значенням pH водної витяжки. Для амфотерних гідроксидів можна припустити утворення в лужному середовищі як основ, так і кислот або солей з різною комбінацією катіонів та аніонів (табл. 2).

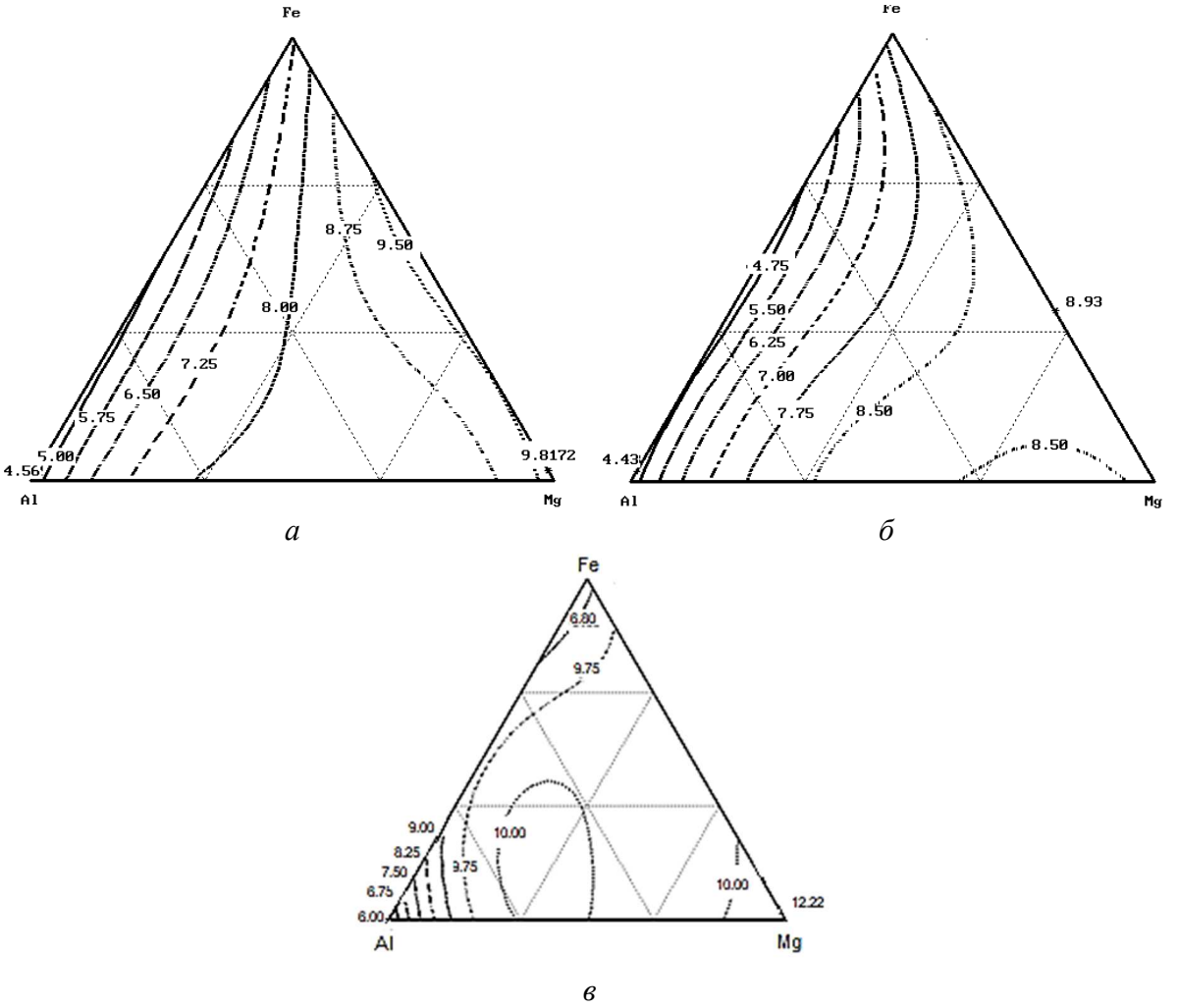
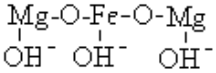
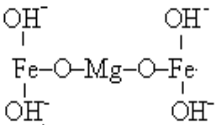
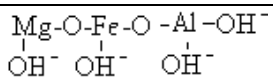



*Рис. 2. pH водної витяжки пігментів системи Fe-Al-Mg-O-H:*
*а – температура обробки 25 $^0$C; б – температура обробки пігментів 100 $^0$C;*
*в – pH осадження гідроксидів*

Таблиця 2

*Залежність антикорозійних властивостей пігментів від складу*

| № з/п | Склад | $\varphi^{korr}_0$, В | $\Delta\varphi_a$, В | $\Delta\varphi_k$, В | $I^{korr}_0$, А | pH | z,% | $\chi$, Ом$^{-1}$ м$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | $H_3FeO_3$ | -0,536 | 0,11 | 0,13 | 0,3355 | 4,95 | 50,6 | 5,56 |
| 2. | $FeAlO_3 *H_2O$ | -0,296 | 0,08 | 0,539 | 0,2747 | 6,68 | 59,36 | 5,82 |
| 3. | $FeAlO_3*H_2O$ | -0,436 | 0,07 | 0,379 | 0,1841 | 7,9 | 72,77 | 5,62 |
| 4. | $H_3AlO_3$ | -0,296 | 0,05 | 0,539 | 0,4097 | 4,45 | 39,39 | 5,27 |
| 5. | $Mg_3(AlO_3)_2$ | -0,496 | 0,06 | 0,259 | 0,2747 | 8,35 | 59,36 | 5,27 |
| 6. | $Mg[Al(OH)_4]_2$ | -0,486 | 0,07 | 0,229 | 0,3707 | 8,34 | 45,16 | 5,5 |
| 7. | $Mg(OH)_2$ | -0,506 | 0,08 | 0,229 | 0,3353 | 10,14 | 50,39 | 5,27 |
| 8. |  | -0,486 | 0,07 | 0,229 | 0,3355 | 9,00 | 50,66 | 5,21 |
| 9. |  | -0,486 | 0,08 | 0,259 | 0,1234 | 8,95 | 81,74 | 5,21 |
| 10. |  | -0,426 | 0,07 | 0,319 | 0,2249 | 8,53 | 66,73 | 5,38 |
| фон | | -0,768 | 0,03 | 0,04 | 0,676 | | | |

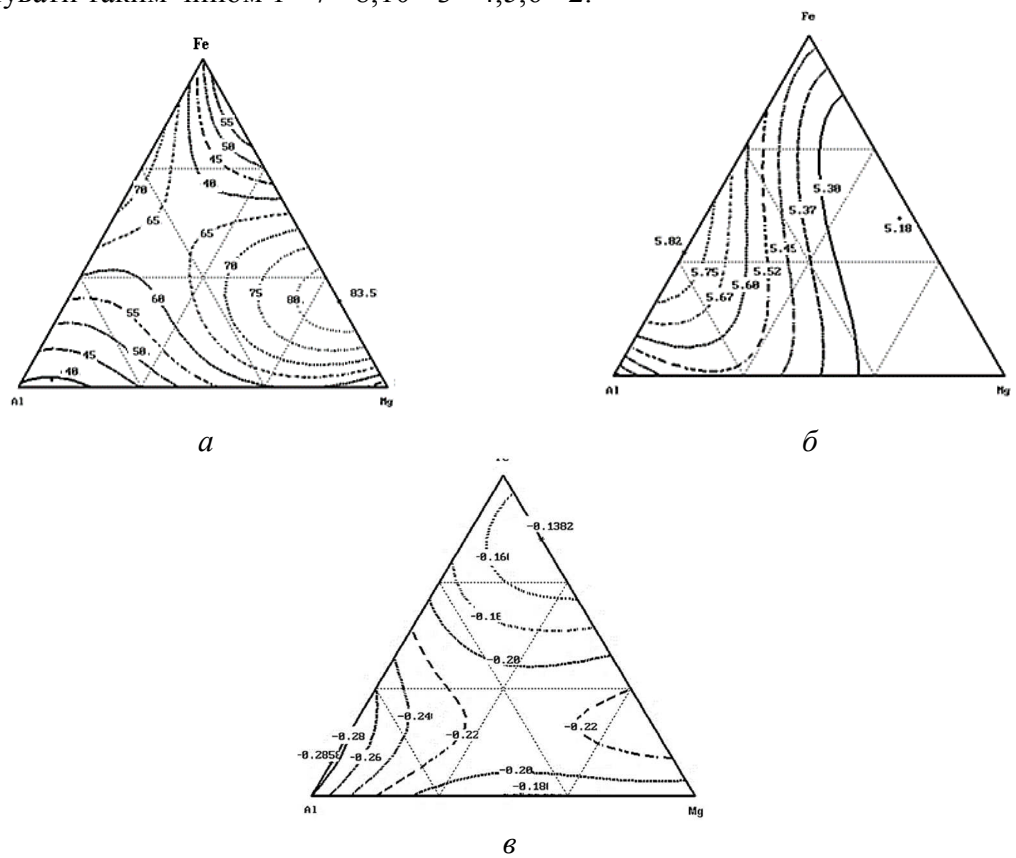
Значення констант дисоціації, які є мірою основності сполук, що розміщені у вершинах трикутника, дають можливість припустити механізм, за яким проходить гідроліз. Найменше значення рКа для магній гідроксиду (рКа = 2,6) визначає його вирішальне значення при дисоціації, друге місце посідає ферум(III) гідроксид (II) (рКа = 5,56), на останньому місці – гідроксид алюмінію (рКа = 8,86). Аналіз табл. 2 показує, що високі значення катодного перенапруження відповідають складам № 2, 3, 4, які містять катіони алюмінію і феруму. Гальмування відбувається за рахунок блокування катодних ділянок утвореними нерозчинними плівками з продуктами катодної реакції і уповільнення дифузії кисню і води. Для складів, що включають магній, усі значення катодної поляризації приблизно однакові. У цьому випадку можна припустити гальмування катодного процесу, що описується реакцією

$$O_2 + 2\ H_2O + 4e = 4\ OH^-, \quad (1)$$

обумовлене збільшенням концентрації іонів гідроксилу (продукт реакції 1).

Отже, максимальний захисний ефект відповідає сполукам феруму і магнію. При цьому значення електропровідності для пігментів змінюються в невеликому діапазоні значень і корелюють зі значеннями захисного ефекту. Аналізуючи антикорозійну дію пігментів, можна припустити, що в водних середовищах сполуки феруму, алюмінію і магнію матимуть вигляд, представлений у табл. 2.

Результати отримані з допомогою симплексного методу (рис. 3) показують, що спостерігається уповільнення катодного процесу і зміщення рівноважного потенціалу в позитивну область. Найменша швидкість анодного процесу у зразка 3, а інші можна розташувати таким чином 1 <7 <8,10 <3 <4,5,6 <2.




*а* *б* *в*

*Рис. 3. Захисний ефект (а), електропровідність водної витяжки (б) і рівноважний потенціал (в) Ст3 у водній витяжці пігментів системи Fe-Al-Mg-O-H температура обробки 25 $^0C$*

Потенціал і швидкість корозії сталі в розчинах, приготованих із витяжок досліджуваних порошкових композицій, залежать від природи катіонів, складу цих композицій.

**Висновки відповідно до статті.** Основні технологічні властивості пігментів визначаються аніонним і катіонним складом. Колірні характеристики визначаються катіоном-хромофором. Антикорозійні властивості пігментів більшою мірою визначаються наявністю іонів гідроксила, що утворюються складом сполук. Найбільший захисний ефект спостерігається в разі використання подвійних сполук металів, константи дисоціації яких значно відрізняються. Захисний ефект в основному визначається уповільненням анодного процесу. При цьому аніони, які містять атоми алюмінію, прискорюють корозійні процеси.

## Список використаних джерел

1. Yang G.-Q., Han B., Sun Z.-T., Yan L.-M., Wang X.-Y. Preparation and characterization of brown nanometer pigment with spinel structure. *Dyes and Pigments*, 2002. Vol. 55, № 1. P. 9–16.

2. Frolova L.A., Shuvalov V.A. The technology of complex pigments of zinc-containing waste water. *Chemistry & Chemical Technology*. 2013. № 2. P. 235–239.

3. Hajjaji W., Seabra M.P., Labrincha J.A. Evaluation of metal-ions containing sludges in the preparation of black inorganic pigments. *Journal of Hazardous Materials.* 2011. Vol. 185, № 2-3. P. 619–625.

4. Ghercaa D., Corneia N., Mentréb O., Kabbourb H., Daviero-Minaudb S., Puia A. In situ surface treatment of nanocrystalline $MFe_2O_4$ (M = Co, Mg, Mn, Ni) spinel ferrites using linseed oil. *Applied Surface Science.* 2013. Vol. 287, № 15. P. 490–498.

5. Saberia A., Golestani-Farda F., Willert-Poradab M., Simonc R., Gerdesb T., Sarpoolakya H. Improving the quality of nanocrystalline $MgAl_2O_4$ spinel coating on graphite by a prior oxidation treatment on the graphite surface. *Journal of the European Ceramic Society.* 2008. Vol. 28, № 10. P. 2011–2017.

6. Kalendováa A., Veselýa D., Kohla M., Stejskalb J. Effect of surface treatment of pigment particles with polypyrrole and polyaniline phosphate on their corrosion inhibiting properties in organic coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2014. Vol. 77, № 9. P. 1465–1483.

7. Frolova L.A. Production conditions of iron oxide black from pickle liquors. *Metallurgical and Mining Industry.* 2014. № 4. P. 65–69.

8. Veselý D., Kalendova A. Anticorrosion efficiency of $Zn_xMg_yAl_2O_4$ core–shell spinels in organic coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2008. Vol. 62, № 1. P. 5–20.

9. Kalendová A. Alkalising Neutralising effects of anticorrosive pigments containing Zn, Mg, Ca, and Sr cations. *Progress in Organic Coating.* 2000. Vol. 38, № 3–4. P. 199–206.

10. Brodinováa J., Stejskalb J., Kalendováa A. Investigation of ferrites properties with polyaniline layer in anticorrosive coatings. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2007. Vol. 68, № 5–6. P. 1091–1095.

11. Горловский И. А., Индейкин Е. А., Толмачев И. А. Лабораторный практикум по пигментам и пигментированным лакокрасочным материалам. Ленинград.: Химия, 1990. 240 с.

## References

1. Yang, G.-Q., Han, B., Sun, Z.-T., Yan, L.-M., Wang, X.-Y. (2002). Preparation and characterization of brown nanometer pigment with spinel structure. *Dyes and Pigments*, *55* (1), 9–16.

2. Frolova, L. A., Shuvalov, V. A. (2013). The technology of complex pigments of zinc-containing waste water. *Chemistry & Chemical Technology*, 2, 235–239.

3. Hajjaji, W., Seabra, M. P., Labrincha, J. A. (2011). Evaluation of metal-ions containing sludges in the preparation of black inorganic pigments. *Journal of Hazardous Materials, 185* (2-3), 619–625.

4. Ghercaa, D., Corneia, N., Mentréb, O., Kabbourb, H., Daviero-Minaudb, S., Puia, A. (2013). In situ surface treatment of nanocrystalline $MFe_2O_4$ (M = Co, Mg, Mn, Ni) spinel ferrites using linseed oil. *Applied Surface Science, 287* (15), 490–498.

5. Saberia, A., Golestani-Farda, F., Willert-Poradab, M., Simonc, R., Gerdesb, T., Sarpoolakya, H. (2008). Improving the quality of nanocrystalline $MgAl_2O_4$ spinel coating on graphite by a prior oxidation treatment on the graphite surface. *Journal of the European Ceramic Society, 28* (10), 2011–2017.

6. Kalendováa, A., Veselýa, D., Kohla, M., Stejskalb, J. (2014). Effect of surface treatment of pigment particles with polypyrrole and polyaniline phosphate on their corrosion inhibiting properties in organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, *77* (9), 1465–1483.

7. Frolova, L. A. (2014). Production conditions of iron oxide black from pickle liquors. *Metallurgical and Mining Industry,* 4, 65–69.

8. Veselý, D., Kalendova, A. (2008). Anticorrosion efficiency of $Zn_xMg_yAl_2O_4$ core–shell spinels in organic coatings. *Progress in Organic Coatings, 62* (1), 5–20.

9. Kalendová, A. (2000). Alkalising Neutralising effects of anticorrosive pigments containing Zn, Mg, Ca, and Sr cations. *Progress in Organic Coating, 38* (3–4), 199–206.

10. Brodinováa, J., Stejskalb, J., Kalendováa, A. (2007). Investigation of ferrites properties with polyaniline layer in anticorrosive coatings. *Journal of Physics and Chemistry of Solids, 68* (5–6), 1091–1095.

11. Gorlovskiy, I. A., Indeykin, E. A., Tolmachev, I. A. (1990). Laboratornyiy praktikum po pigmentam i pigmentirovannyim lakokrasochnyim materialam [Laboratory workshop on pigments and pigmented paints and varnishes]. Leningrad: Khimiia [in Russian].

*UDC 667.622.11*

*Liliia Frolova, Tetiana Butyrina*

# RESEARCH OF COLOR AND ANTI-CORROSION PROPERTIES OF PIGMENTS IN THE Fe-Al-Mg-O-H SYSTEM

***Urgency of the research.*** *Promising pigments of the passive type, in addition to phosphate, are other materials - oxyhydroxides, ferrites, molybdates, stanns, borates, tungstates, which are obtained by traditional technologies. However, these methods are usually associated with significant energy costs, long synthesis times, the need to grind the fins to a finely divided state. The researchers' interest to co-precipitation method, which allows varying the composition of anionic and cationic pigments, is growing.*

*In addition, the developers of paints and varnishes are tasked with replacing toxic anti-corrosion chromium, cadmium and plumbum-containing pigments that are part of most modern primers of the inhibitory type. The alternative to such paints are oxide type fillers, which are anti-corrosion pigments, including oxyhydroxides, magnesium ferrites, cobalt aluminates, zinc ferrites, copper ferrites, magnesium aluminates, zinc aluminates, etc. The coloration of the pigments, their corrosion properties depend on the chromophore ions that are part of the structure of the compounds obtained.*

***Target setting.*** *Co-precipitation technology has several advantages over traditional ones and makes it possible to reduce the cost of producing oxide materials radically. This process is based on the use of chemical energy inside the system and allows reducing synthesis temperature, duration of the synthesis and energy costs. The simplicity of the equipment, the possibility to synthesize a large amount of the product of the required phase composition and particle size, environmental cleanliness of the process also indicate the feasibility of using this method.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Recently, attempts to obtain pigments co-precipitation method were made, but systematic studies of the end products was not carried out. The resulting products are mostly formed as poorly reproducible composition products. In this regard, synthesis becomes interesting in this mode, when would be obtain pigments with good color characteristics in fine condition and excluded time-consuming step of shredding.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *The study of the conditions of formation of pigments with the structure of oxyhydroxides, the influence of their composition on the color and anti-corrosion properties.*

***The research objective.*** *The study of the laws of formation of anticorrosive properties, the development of compositions for the production of pigments with using the method of co-precipitation and subsequent heat treatment.*

***The statement of basic materials.*** *Experimental and theoretical studies have established the influence of the nature of chromophore cations on the color tone, color purity, anticorrosion properties of pigments in the Fe-Al-Mg-O system, which allows targeted synthesis of beige, red and yellow pigments with high anticorrosive properties.*

***Conclusions.*** *The main technological properties of pigments are determined by the anionic and cationic composition. The anticorrosive properties of oxyhydroxide pigments are largely determined by the presence of hydroxyl ions formed by dissociation. The greatest effect is observed when using metal compounds whose dissociation constants are significantly different. The protective effect is mainly determined by the slowdown of the anode process. Anions, which containing aluminum atoms, accelerate corrosion processes.*

***Keywords:*** *pigments; color; color formation; pH of the extract; potential; corrosion.*

*Fig.: 3.Table: 2. References: 11.*

**Фролова Лілія Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (прнсg. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005, Україна).
**Frolova Liliia** – PhD in Technical science, Associate Professor, Associate Professor, Department of Inorganic Materials Technology and Ecology, Ukrainian State University Of Chemical Technology (8 Gagarina Av., Dnipro, 49005, Ukraine).
**E-mail:** 19kozak83@gmail.com
**SCOPUS Author ID:** 55505810700
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-7970-2264

**Бутиріна Тетяна Євгенівна** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет» (пр. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005, Україна).
**Butyrina Tetiana** – PhD in Chemical science, Associate Professor, Associate Professor, Department of Inorganic Materials Technology and Ecology, Ukrainian State University Of Chemical Technology (8 Gagarina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine).
**E-mail:** butan@email.ua
**SCOPUS Author ID:** 6506147362
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0619-6783

Фролова Л., Бутиріна Т. Дослідження колірних та антикорозійних властивостей пігментів у системі Fe-Al-Mg-O-H. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 264-271.

*УДК 554.526.5, 54.057+544.77.051*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-272-279*

*Маргарита Скиба, Вікторія Воробйова*

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТИТАНУ (IV) ОКСИДУ МОДИФІКОВАНОГО НАНОЧАСТИНКАМИ СРІБЛА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ТЕКСТИЛЬНИХ ВИРОБНИЦТВ

***Актуальність теми дослідження.*** *Екологічні проблеми водних екосистем України пов'язані з безповоротним водозабором і скидом забруднюючих речовин у водні об'єкти. Тому актуальним є дослідження спрямовані на удосконалення відомих методів та засобів очищення стічних вод виробництв для запобігання шкідливого впливу на довкілля та життєдіяльності людини.*

***Постановка проблеми.*** *На сьогодні не достатньо наукової інформації про підвищення ефективності фотокаталізаторів (діоксину титану) нанорозмірними металами та їх використання для розкладання барвників, тому необхідно здійснення досліджень в цьому напрямку.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Були розглянуті останні вітчизняні та закордонні публікації у відкритому доступі, щодо модифікування фотокаталізатору титану (IV) оксиду наночастинками срібла, одержаними різними способами, та їх ефективність до розкладання полютантів (барвників).*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Інформація про допування фотокаталізатора (титану (IV) оксиду) плазмохімічно одержаними наночастками срібла та вивчення його ефективності щодо розкладання барвників є дуже обмеженою.*

***Постановка завдання.*** *Дослідження ефективності використання плазмохімічно одержаних дисперсій срібла в якості допуючої складової фотокаталізатора та дослідження його ефективності очищення стічних вод від барвників.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Одержано модифікований плазмохімічно одержаними наночастинками срібла титан (IV) оксид. Фазовий склад модифікованого фотокаталізатора (2% Ag НЧ) було досліджено рентгеноструктурним аналізом. Аналіз морфології поверхні зразків проаналізовано із використанням скануючої і просвічуючої мікроскопії. Оцінено можливість застосування композитного фотокаталізатора для видалення барвника катіонного барвника метиленового синього. Встановлено, що одержаний композитний фотокаталізатор виявляли більшу фотокаталітичну активність щодо барвника, в порівнянні з промисловим $TiO_2$. Досліджено вплив домішок $Cl^-$, $NO_3^-$, $SO_4^{2-}$, $Fe^{3+}$ на ефективність фотокаталітичного розкладання барвника.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Серед багатьох полютантів особливу увагу привертають барвники. Модифікування промислових зразків фотокаталізатора металевими наночастинками, одержаними плазмовим способом є перспективним способом для підвищення ефективності промислових зразків титан (IV) оксиду.*

***Ключові слова:*** *фотокаталізатор; наночастинки срібла; модифікування; розкладання; метиленовий синій; модельні стічні води.*

*Рис.: 6. Бібл.: 19.*

**Актуальність теми дослідження.** Однією з найважливіших екологічних проблем світового масштабу є забруднення водних середовищ полютантами, а саме барвниками внаслідок роботи промислових підприємств. У зв'язку з цим пошук шляхів ефективного вилучення барвників зі стічної води є нині актуальним питанням.

**Постановка проблеми.** Очищення стічних вод від полютантів є найважливішим завданням відновлення водних ресурсів [1-2]. Серед багатьох полютантів особливу увагу привертають барвники, оскільки більшість із них є токсичними та небезпечними для навколишнього середовища. Основними джерелами забруднення барвниками є підприємства легкої (текстильної), хімічної, целюлозно-паперової та фармацевтичної промисловості, оскільки вагома частка таких підприємств скидає відпрацьовані води до водойм без належного очищення. Серед зазначених вище, текстильна промисловість є основним генератором кольорових стічних вод, оскільки вона використовує близько 80 % барвників, що виробляється. На сьогодні в усьому світі використовується близько 10 000 різних видів барвників, загальний обсяг виробництва яких становить приблизно $8 \times 10^6$ тонн на рік [3] і близько 10–15 % з них потрапляють у стічні води [4]. На сьогодні розроблено й використовується на практиці широкий перелік методів очищення стічних вод від барвників [5; 6]. Проте недосконаліть наявних технологій зумовлює необхідність пошуку нових і вдосконалення відомих способів, які б забезпечували необхідний ступінь вилучення барвника. Одним із перспективних методів очищення стічних вод від барвників нині вважається метод очищення фотокаталізаторами.

Сьогодні спостерігається зростаючий інтерес до фотокаталізаторів-напівпровідників на основі титану (IV) оксиду ($TiO_2$) [5-8]. Це пов'язано із значною його фото, високою хімічною стабільністю, низькою вартістю та відсутністю токсичності. Проте ширина

© Скиба М. І., Воробйова В. І., 2020

забороненої зони (зона каталізатора, що відповідає за здатність поглинати світло і діяти як типовий фотокаталізатор 3,0-3,2 еВ; область поглинання світла лежить в УФ-частині спектра, тому ефективність роботи під дією видимого опромінення становить менше 10 %. Тому підвищення фотокаталітичної активності фотокаталізатора титан (IV) оксиду є актуальним завданням як із теоретичного, так і з практичного погляду.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Досягти підвищення ефективності титан (IV) оксиду можна шляхом допування йонами, наночастинками (НЧ) металів або неметалами, що впливає на процеси рекомбінації фотогенерованих носіїв заряду [5–7; 9–11]. Аналіз вітчизняних та закордонних публікацій свідчить, що для модифікації $TiO_2$ наночастками металевих металів бажано використовувати нанометали дорогоцінних металів, а саме: Au та Ag [4–8; 12]. Для останніх характерно наявне оптичне поглинання у видимій області, за рахунок наявного плазмонного резонансу дорогоцінних металів в нанорозмірному стані. Відтак, реакційна здатність модифікованого титан (IV) оксиду є комплексною функцією концентрації допанту, його електронної структури, положення енергетичних рівнів допанту в забороненій зоні напівпровідника, розподілу допанту на поверхні або в об'ємі матеріалу. Також вагомий вклад у цьому випадку відіграють фізико-хімічних властивостей самого матеріалу-допанту, що, у свою чергу, залежить, як відомо, від способу одержання. На сьогодні використовують різні методи синтезу наночасток для допування на поверхню композиційних матеріалів. Осадження здійснюють або з попередньо сформованих колоїдних розчинів НЧ або безпосереднім відновленням на поверхні. Наявні результати свідчать про ефективність одержаних фотокаталізаторів для розкладання полютантів широкого генезису.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Сучасними, екологічно безпечними та високоефективними є короткотривалі плазмові розряди [13]. Проте, у більшості опублікованих закордонних роботах [5; 7; 13–15] формування/осадження допуючої/легуючої складової здійснюється із використанням різних видів опромінення: УЗ, гамма-, мікрохвильове опромінення і майже відсутня інформація про формування НЧ із використанням короткотривалих плазмових розрядів і їх використання як металу-модифікатора. Одним із перспективних газоріднинних плазмохімічних розрядів є контактна нерівноважна низькотемпературна плазма (КНП). Розряд КНП формується між електродом, що знаходяться в газовій фазі, і поверхнею рідини, в об'ємі якої розташований другий електрод і є ефективним способом формування стабільних дисперсій срібла [16–18].

**Постановка завдання.** Метою цієї роботи було дослідження ефективності використання плазмо-хімічно одержаних дисперсій срібла в якості допуючої складової фотокаталізатора та дослідження його ефективності при очищенні стічних вод від барвників.

**Експериментальна частина.** Проста одностадійна реакція була використана для синтезу Ag НЧ. Наночастинки срібла синтезували за допомогою плазмохімічного реактора синтезу (рис. 1). Наважку $AgNO_3$ розчиняли у подвійній дистильованій воді, отримуючи розчин фіксованої концентрації (3,0 ммоль/л). Альгінат натрію (як стабілізатор) розчиняли у подвійній дистильованій воді для отримання розчину 5,0 г/л і додавали до 40 мл розчину $AgNO_3$ при мольному співвідношенні (1:1) при перемішуванні 1,0 хв. Отриману реакційну суміш обробляли в реакторі з розрядом контактної нерівноважної низькотемпературної плазми з фіксованими параметрами (тиск, сила струму). Параметри плазми I = 120 мА, P = 0,08 МПа.

Для характеристики сформованих наночастинок срібла реакційну суміш після отримання аналізували за допомогою спектрофотометрії. Спектри колоїдних розчинів отримували на спектрофотометрі UV-5800PC з використанням кварцових кювет в діапазоні довжин хвиль $\lambda$ = 300–700 нм. Піки при $\lambda$ = 260-335 нм свідчать про формування кластерів срібла різної структури, а пік при $\lambda$ = 400-440 нм про формування НЧ Ag.

Серія композиційного $TiO_2$, модифікованого наноматеріалом (Ag НЧ), була отримана шляхом просочення комерційного порошку $TiO_2$ плазмохімічно синтезованими наночастинками срібла (перемішування 1 год та наступне статичне відстоювання 10 год, фільтрування та висушування при кімнатній температурі). Були одержані $TiO_2$, допувані Ag НЧ з вмістом 2,0 %. Фазова структура та морфологія зразків характеризувались рентгенографією, скануючою (СЕМ) та просвічуючою (ПЕМ) електронною мікроскопією.

Фотокаталітичну активність синтезованих зразків досліджували в статичних умовах і оцінювали за ступенем знебарвлення розчину основного (катіонного) органічного барвника метиленового синього структурна формула якого представлені на рис. 2. 3D-модель молекули барвника метиленового блакитного, побудовану із використанням програмного забезпечення Hyper Chem. Лабораторна установка для дослідження фотокаталітичної активності складалась із магнітної мішалки, скляного стакана ємністю 70 $см^3$ та УФ лампи, що находиться безпосередньо над скляним стаканом. Захисний екран з алюмінієвої фольги слугував для захисту реактора із досліджуваною системою від сонячного світла.

Вихідна концентрація модельного розчину барвника становили ~0,1 $г/дм^3$. Ступінь знебарвлення розчину барвника визначали за відносною зміною оптичної густини розчину за довжини хвилі 664 нм, %(1):

$$X = (A_0 - A_\tau)/A_0, \quad (1)$$

де $A_0$ – оптична густина вихідного розчину барвника; Aτ – оптична густина розчину після експерименту.

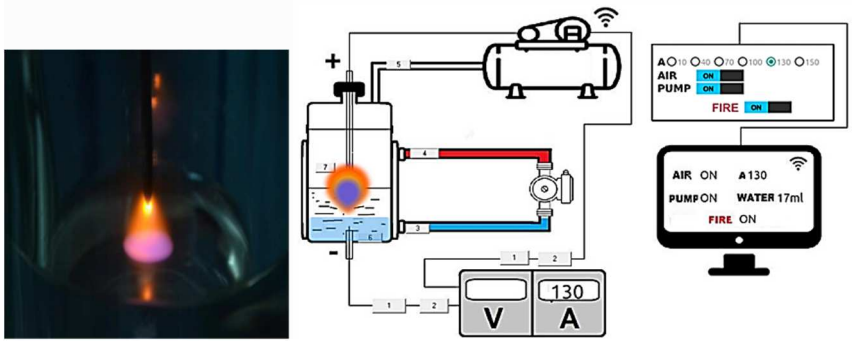



*Рис. 1. Схема плазмохімічної установки та фото розряду плазми над оброблюваним розчином*

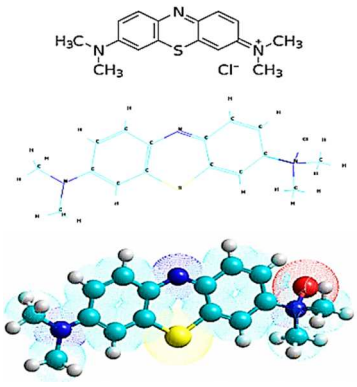
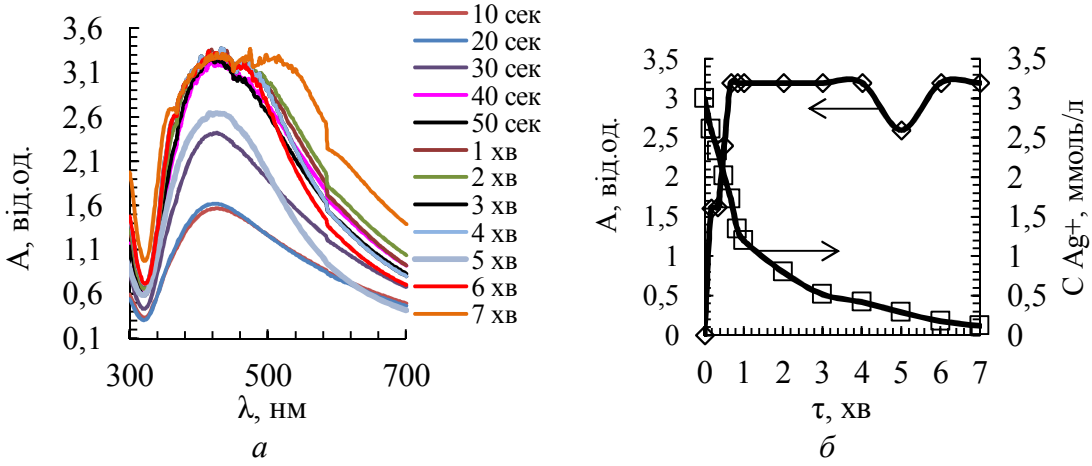


*Рис. 2. Структурна формула молекули метиленового блакитного та 3D-модель молекули барвника метиленового блакитного*

**Результати досліджень.** На рис. 3 представлено характерні спектри плазмохімічно одержаного колоїдного розчину наночастинок срібла Ag НЧ. Видно, що при досліджуваній початковій концентрації нітрату аргентуму (3,0 ммоль/л) у результаті дії плазмового розряду від 10 с до 7 хв на розчин нітрату срібла/AlgNa утворюються нано-

частинки срібла. Наночастинки характеризуються наявністю максимуму поглинання ППР ($\lambda_{макс}$) в діапазоні 400–425 нм, що, відповідає НЧ срібла переважно сферичної форми до 50 нм. В попередніх дослідженнях авторів [16–19] представлено детальну характеристику плазмохімічно одержаних наночастинок срібла. Одержана дисперсія срібла є стабільною, наночастинки сферичні із середнім розміром часток 26,0 нм (рис. 4).




*а* *б*

*Рис. 3. Залежність спектрів одержаних нанодисперсій срібла від тривалості дії розряду плазми на вихідний розчин при концентрації $AgNO_3$ 3,0 ммоль/л (а) та зміна концентрації $Ag^+$ від дії розряду плазми*

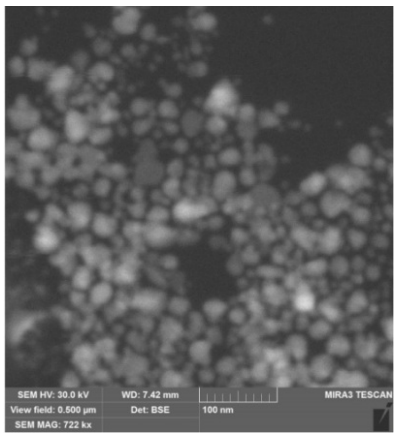
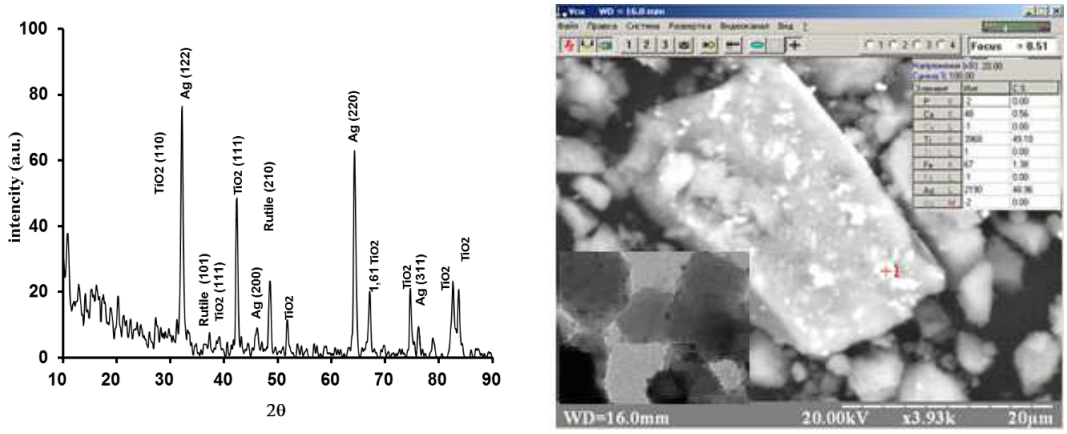



*Рис. 4. СЕМ-зображення одержаної нанодисперсії срібла*

На рис. 5 зображено результати рентгеноструктурного та мікроскопічного аналізу модифікованого зразка Ag НЧ/$TiO_2$. Аналіз результатів свідчить, що модифікований фотокаталізатор складаються з рутильної фази та металевих наночастинок срібла. Основні піки, характерні рутильній фазі 2θ: (110) 27,4°; (101) 36°; (111) 41,2°; (210) 44,2°. Піки при 2θ: 32,16°; 38,1°; 46,4°; 66,74° і 76,84° відповідають 122, 111, 200, 220 і 311 кристалічним площинам для кубічної кристалічної структури срібла (карта JCPDS № 04-0783).

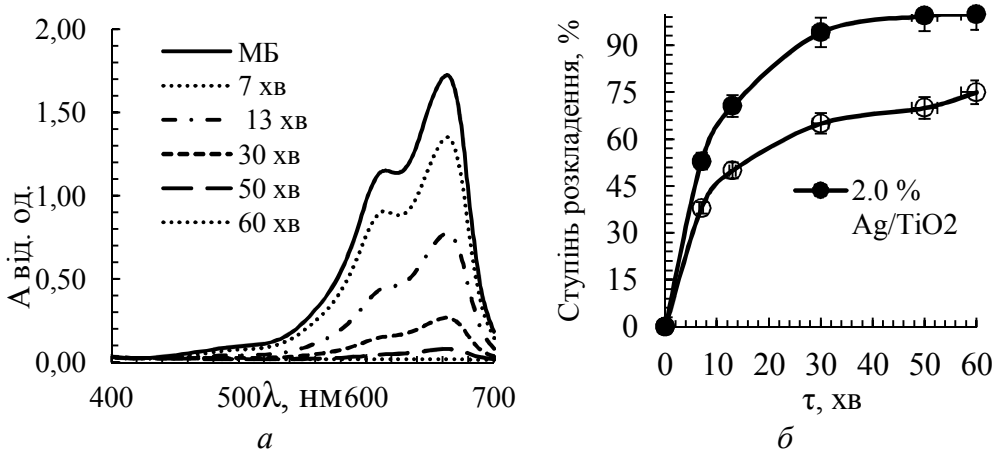
Для характеристики морфології поверхні та елементного складу одержаного композитного фотокаталізатора було використано комплекс мікроскопічних досліджень (скануючу (СЕМ) та просвічуючи (ПЕМ) мікроскопію). Аналіз одержаних результатів свідчить, що на поверхні модифікованого зразка $TiO_2$ спостерігається присутність рівномірно розподілених, не агрегованих нанорозмірних частинок срібла.




*а* *б*

*Рис. 5. Рентгенограма (а) та СЕМ-зображення (ПЕМ-зображення вставка) (б) зразка фотокаталізатора, модифікованого плазмохімічно одержаними наночастками срібла*

Досліджено фотокаталітичну ефективність модифікованого зразка титан (IV) оксиду. Зміни концентрації МБ контролювались шляхом визначення зменшення інтенсивності піку поглинання МБ при $\lambda = 664$ нм, як зображено на рис. 6, *а*. Отже, пік поглинання поступово зменшувався зі збільшенням часу опромінення до 60 хв, що свідчить про фотокаталітичну деградацію барвника. Ступінь розкладання на рівні 94,0–99,0 % досягається за 30–60 хв. Отримані результати перевищують ефективність не модифікованого зразка фотокаталізатора, ефективність якого за аналогічний період становить 65–75 %.




*а* *б*

*Рис. 6. Залежність інтенсивності спектрів поглинання барвника метиленового блакитного (а) та ступінь фотокаталітичного розкладання від тривалості опромінення(б) при використанням модифікованого фотокаталізатора $Ag/TiO_2$*

Було досліджено ефективність одержаного модифікованого каталізатора у присутності домішок: $Cl^-$ (0–1000 мкг/л), $NO_3^-$ (0–1000 мкг/л), $CO_3^{2-}$ (0–1000 мкг/л), $Fe^{3+}$ (0–400 мкг/л) (рис. 7). Аналіз отриманих залежностей свідчить про сприятливий вплив різної кількості аніонних домішок на деградацію барвника МБ. Сприятливий ефект аніонів може бути обумовлений утворенням неорганічних радикальних аніонів за рахунок реакції гідроксильних радикалів з аніонами. У свою чергу, утворені радикальні аніони можуть викликати деградацію барвника. Слід зазначити, що присутність катіонних домішок знижує ступінь фотокаталітичного очищення за рівних умов.

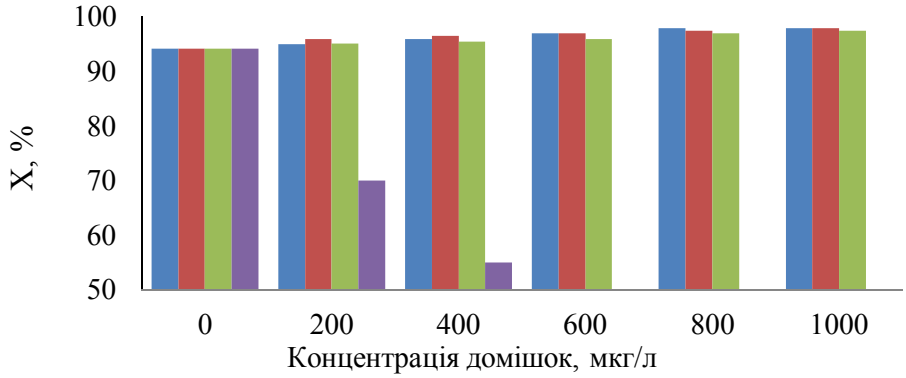



*Рис. 7. Вплив домішок на ступінь фотокаталітичного розкладання барвника при використанні модифікованого фотокаталізатора ($C_{МБ}$=0,1 г/л, тривалість опромінення 60 хвилин ($Cl^-$, $NO_3^-$, $SO_4^{2-}$, $Fe^{3+}$) відповідно*

**Висновки відповідно до статті.** Одержано модифікований плазмохімічно одержаними наночастками срібла титан (IV) оксид. Фазовий склад модифікованого фотокаталізатора (2% Ag НЧ) було досліджено рентгеноструктурним аналізом. Аналіз морфології поверхні зразків проаналізовано із використанням скануючої і просвічуючої мікроскопії. Оцінено можливість застосування композитного фотокаталізатору для видалення барвника катіонного барвника метиленового блакитного. Встановлено, що одержаний композитний фотокаталізатор виявляє більшу фотокаталітичну активність щодо барвника, в порівнянні з промисловим $TiO_2$. Досліджено вплив домішок $Cl^-$, $NO_3^-$, $SO_4^{2-}$, $Fe^{3+}$ на ефективність фотокаталітичного розкладання барвника. Домішки $Cl^-$, $NO_3^-$, $CO_3^{2-}$ сприяють незначному збільшенню ступеня розкладання барвника, в той час як 200–400 мкг/л $Fe^{3+}$ суттєво знижую ефективність фотокаталіза на понад 50 %. Встановлено, що фотокаталітична ефективність модифікованого зразка за рівних умов вище за промисловий зразок на 20-25 %.

## Список використаних джерел

1. Bakardjieva S. Photoactivity of anatase–rutile $TiO_2$ nanocrystalline mixtures obtained by heat treatment of homogeneously precipitated anatase. *Appl. Catal. B*. 2005. № 58. P. 193–202.
2. Chen X., Mao S. S. Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications, and applications. *Chem. Rev.* 2007. № 107. P. 2891–2959.
3. Ahmed S., Rasul M. G., Martens,\ W. N. Advances in heterogeneous photocatalytic degradation of phenols and dyes in wastewater: a revie. *Water, Air, & Soil Pollution.* 2011. Vol. 215. P. 27–31.
4. Sahoo C., Gupta A. K., Sasidharan Pillai I. M. Photocatalytic degradation of methylene blue dye from aqueous solution using silver ion-doped $TiO_2$ and its application to the degradation of real textile wastewater. *Journal of Environmental Science and Health*, Part A. 2012. № 47(10). P. 1428–1438.
5. Ko S., Banerjee C. K., Sankar, J. Photochemical synthesis and photocatalytic activity in simulated solar light of nanosized Ag doped $TiO_2$ nanoparticle composite'. *Composites Part B: Eng.* 2011. Vol. 42, No. 3. P. 579–583.
6. Bouhadjar S. I., Deowan S. A., Galiano F., Figoli A., Hoinkis J., Djennad M. Performance of commercial membranes in a side-stream and submerged membrane bioreactor for model textile wastewater treatment. *Desalination and Water Treatmen*. 2015. Vol. 57(12), P. 5275–5285.
7. Kaur Aulakh M., Sharma R., Pal B., Prakash R. Photo-induced oxidation and reduction by plasmonic Ag-$TiO_2$ nanocomposites under UV/sunlight. *Solar Energy*. 2020. Vol. 196, P. 427–436.
8. Haider A. J., AL-Anbari R. H., Kadhim G. R., Salame C.T . Exploring potential environmental applications of $TiO_2$ Nanoparticle. *Energy Procedia.* 2017. Vol. 119. P. 332–345.
9. Ghosh M., Mondal M., Mandal S., Roy A., Chakrabarty S., Chakrabarti G., Pradhan S. K. Enhanced photocatalytic and antibacterial activities of mechanosynthesized TiO2-Ag nanocomposite in wastewater treatment. *Journal of Molecular Structure*. 2020. Vol. 1211. P. 128076.
10. Ivanenko I. N., Dontsova T. A., Astrelin I. M., Trots V. V. Low-temperature synthesis, structure-sorption characterisics and photocatalytic activity of $TiO_2$ nanostructures. *J. Water Chem. Technol*. 2016. Vol. 37 (1). P. 14–20.

11. Ohno T., Mitsui T., Matsumura M. Photocatalytic activity of S-doped $TiO_2$ photocatalyst under visible light. *Chemistry letters.* 2003. Vol. 32(4). P. 364–365.

12. Sobana N., Muruganadham M., Swaminathan M. Nano-Ag particles doped $TiO_2$ for efficient photodegradation of Direct azo dyes'. *J. Mol. Catal. A: Chem.* 2006. Vol. 258 (1–2). P. 124–132.

13. Mahmoudabadi Z. D., Eslami E., Narimisa M. Synthesis of Ag/$TiO_2$ nanocomposite via plasma liquid interactions: Improved performance as photoanode in dye-sensitized solar cell. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. Vol. 529. P. 538–546.

14. Chen Q., Li J., Li Y. A review of plasma–liquid interactions for nanomaterial synthesis. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2015. Vol. 48(42). P. 1-27.

15. Dong P., Yang F., Cheng X., Huang Z., Nie X., Xiao Y., Zhang X. Plasmon enhanced photocatalytic and antimicrobial activities of Ag-$TiO_2$ nanocomposites under visible light irradiation prepared by DBD cold plasma treatment. *Materials Science and Engineering: C*. 2018. Vol. 96. P. 197–204.

16. Pivovarov O. A., Skiba M. I., Makarova A. K., Vorobyova V. I., Pasenko O. O. Plasma-chemical obtaining of silver nanoparticles in the presence of sodium alginate. *Вопросы химии и химической технологии.* 2017. Vol. 6, Issue 115. P. 82–88.

17. Skiba M., Pivovarov A., Makarova A., Vorobyova V. Plasma-Chemical Synthesis of Silver Nanoparticles in the Presence of Citrate. *Chemistry Journal of Moldova*. 2018. Vol. 13, № 1. P. 7–14.

18. Skiba M. I., Vorobyova V. I., Pivovarov O. A., Makarshenko N. P. Green synthesis of silver nanoparticles in the presence of polysaccharide: Optimization and characterization. *Journal of Nanomaterials*. 2020. Vol. 2020. P. 1–10.

19. Skiba M. I., Vorobyova V. I. Synthesis of Silver Nanoparticles Using Orange Peel Extract Prepared by Plasmochemical Extraction Method and Degradation of Methylene Blue under Solar Irradiation. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 2019. P. 1–8.

## References

1. Bakardjieva, S. (2005). Photoactivity of anatase–rutile $TiO_2$ nanocrystalline mixtures obtained by heat treatment of homogeneously precipitated anatase. *Appl. Catal. B*, 58, 193–202.

2. Chen, X. Mao, S.S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications, and applications. *Chem. Rev.,* 107, 2891–2959.

3. Ahmed, S., Rasul, M.G., Martens, W.N. (2011). Advances in heterogeneous photocatalytic degradation of phenols and dyes in wastewater: a revie. *Water, Air, & Soil Pollution*, 215, 27–31.

4. Sahoo, C., Gupta, A. K., Sasidharan Pillai, I. M. (2012). Photocatalytic degradation of methylene blue dye from aqueous solution using silver ion-doped $TiO_2$ and its application to the degradation of real textile wastewater. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*., 47(10), 1428–1438.

5. Ko, S., Banerjee, C.K. Sankar, J. (2011). Photochemical synthesis and photocatalytic activity in simulated solar light of nanosized Ag doped $TiO_2$ nanoparticle composite'. *Composites Part B: Eng.,* 42 (3), 579–583.

6. Bouhadjar, S. I., Deowan, S. A., Galiano, F., Figoli, A., Hoinkis, J., Djennad, M. (2015). Performance of commercial membranes in a side-stream and submerged membrane bioreactor for model textile wastewater treatment. *Desalination and Water Treatmen,* 57(12), 5275–5285.

7. Kaur Aulakh, M., Sharma, R., Pal, B., Prakash, R. (2020). Photo-induced oxidation and reduction by plasmonic Ag-$TiO_2$ nanocomposites under UV/sunlight. *Solar Energy*, 196, 427–436.

8. Haider A.J., AL-Anbari R.H., Kadhim G.R., Salame C.T. (2017). Exploring potential environmental applications of $TiO_2$ Nanoparticle. *Energy Procedia,* 119, 332-345.

9. Ghosh M., Mondal M., Mandal S., Roy A., Chakrabarty S., Chakrabarti G., Pradhan S. K. (2020). Enhanced photocatalytic and antibacterial activities of mechanosynthesized TiO2-Ag nanocomposite in wastewater treatment. *Journal of Molecular Structure,* Vol. 1211, 128076.

10. Ivanenko, I. N., Dontsova, T. A., Astrelin, I. M., Trots, V. V. (2016). Low-temperature synthesis, structure-sorption characterisics and photocatalytic activity of $TiO_2$ nanostructures. *J. Water Chem. Technol*, 37 (1), 14-20.

11. Ohno, T., Mitsui, T., Matsumura, M. (2003). Photocatalytic activity of S-doped $TiO_2$ photocatalyst under visible light. *Chemistry letters,* 32(4), 364–365.

12. Sobana, N., Muruganadham, M. and Swaminathan, M. (2006). Nano-Ag particles doped TiO2 for efficient photodegradation of Direct azo dyes'. *J. Mol. Catal. A: Chem.*, 258 (1–2), 124–132.

13. Mahmoudabadi, Z. D., Eslami, E., Narimisa, M. (2018). Synthesis of Ag/$TiO_2$ nanocomposite via plasma liquid interactions: Improved performance as photoanode in dye-sensitized solar cell. *Journal of Colloid and Interface Science*, 529, 538–546.

14. Chen, Q., J. Li, Y. Li, (2015). A review of plasma–liquid interactions for nanomaterial synthesis. *Journal of Physics D: Applied Physics,* 48(42), 1-27.

15. Dong, P., Yang, F., Cheng, X., Huang, Z., Nie, X., Xiao, Y., Zhang, X. (2018). Plasmon enhanced photocatalytic and antimicrobial activities of Ag-$TiO_2$ nanocomposites under visible light irradiation prepared by DBD cold plasma treatment. *Materials Science and Engineering: C*., 96, 197–204.

16. Pivovarov, O. A., Skiba, M. I., Makarova, A. K., Vorobyova, V. I., Pasenko, O. O. (2017). Plasma-chemical obtaining of silver nanoparticles in the presence of sodium alginate. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii – Questions of chemistry and chemical technology*, 6 (115), 82–88.

17. Skiba, M., Pivovarov, A., Makarova, A., Vorobyova, V. (2018). Plasma-Chemical Synthesis of Silver Nanoparticles in the Presence of Citrate. *Chemistry Journal of Moldova,* 13 (1), 7–14.

18. Skiba, M. I., Vorobyova V. I., Pivovarov, O. A., Makarshenko, N. P. (2020). Green synthesis of silver nanoparticles in the presence of polysaccharide: Optimization and characterization. *Journal of Nanomaterials*, 2020, 1–10.

19. Skiba, M. I., Vorobyova V. I. (2019). Synthesis of Silver Nanoparticles Using Orange Peel Extract Prepared by Plasmochemical Extraction Method and Degradation of Methylene Blue under Solar Irradiation. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2019, 1–8.

*UDC 554.526.5, 54.057+544.77.051*

*Margarita Skiba, Viktoria Vorobyova*

## INVESTIGATION TITANIUM (IV) OXIDE MODIFIED BY SILVER NANOPARTICLES FOR TEXTILE WASTEWATER TREATMENT

***Urgency of the research.*** *The environmental problems of aquatic ecosystems in Ukraine are related to irreversible water intake and discharge of pollutants into water bodies. Therefore, research aimed at improving existing methods and means of wastewater treatment for production to prevent harmful effects on the environment and human life is relevant.*

***Target setting.*** *Nowadays, there is insufficient scientific information on the enhancement of the efficiency of photocatalysts (titanium dioxin) by nanoscale metals and their use for the decomposition of dyes, so research in this direction is needed.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Recent domestic and foreign publications in open access have been reviewed regarding the modification of titanium (IV) oxide photocatalyst by silver nanoparticles obtained in various ways, and their effectiveness for the decomposition of pollutants (dyes).*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *The information on the doping of photocatalyst (titanium (IV) oxide) by plasma-chemically obtained silver nanoparticles and the study of its efficiency in the decomposition of dyes is very limited.*

***The research objective.*** *Analysis of the possibility of applying the heat spread theory in welding to determine the size of the forming point at zero velocity of arc surfacing.*

***The statement of basic materials.*** *The modified titanium (IV) oxide was modified by plasma-chemically obtained silver nanoparticles. The phase composition of the modified photocatalyst (2% Ag NP) was investigated by X-ray diffraction analysis. Analysis of the surface morphology of the samples was analyzed using scanning and transmission microscopy. The possibility of using a composite photocatalyst to remove methylene blue anionic dye was evaluated. The obtained composite photocatalyst was found to exhibit greater photocatalytic activity with respect to the dye compared to industrial $TiO_2$. The effect of $Cl^-$, $NO_3^-$, $SO_4^{2-}$, $Fe^{3+}$ impurities on the photocatalytic decomposition efficiency of the dye was investigated.*

***Conclusions.*** *Among many pollutants, dyes are of particular interest. Modification of industrial samples of photocatalyst with metallic nanoparticles obtained by the plasma method is a promising way to improve the efficiency of industrial samples of titanium (IV) oxide.*

***Keywords:*** *photocatalyst; silver nanoparticles; modification; decomposition; methylene blue; model wastewater.*

*Fig.: 6. References: 18.*

**Скиба Маргарита Іванівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедра технології неорганічних речовин та екології, Український державний хіміко-технологічний університет (просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005, Україна).

**Skiba Margarita –** PhD in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Inorganic Substances and Ecology Ukrainian State Chemical Technology University (8 Gagarina Av., 49005 Dnipro, Ukraine).

**E-mail:** Margaritaskiba88@gmail.com

**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4634-280X

**SCOPUS Author ID:** 57198771281

**Воробйова Вікторія Іванівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Vorobyova Viktoria** – PhD in Technical Science, Assistant, Assistant of Physical Chemistry Department, National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** Vorobyovavika1988@gmail.com

**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-7479-9140

**Scopus Author ID:** 55808771000

Скиба М., Воробйова В. Дослідження титану (IV) оксиду модифікованого наночастинками срібла для очищення стічних вод текстильних виробництв. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 272-279.

*УДК 664*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-280-286*

*Вікторія Челябієва, Людмила Щерба, Тетяна Оляченко*

# ВИКОРИСТАННЯ ЖИТНЬОЇ ЗАКВАСКИ В ТЕХНОЛОГІЇ КИСЛОМОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ

***Актуальність теми дослідження.*** *Кисломолочні напої в харчуванні людини займають вагоме місце, і питання розширення асортименту кисломолочних напоїв, шляхом використання нових кисломолочних культур для заквашування є актуальним для харчової галузі.*

***Постановка проблеми.*** *Приготування кефіру передбачає використання кефірного грибка – адаптованого кумисного ферменту, отримання культури якого потребує специфічного елективного середовища. Тому, пошук культур, які можна отримати на доступних елективних середовищах, і, які можуть бути використані для швидкого й легкого приготування кисломолочного продукту, максимально наближеного за своїми властивостями до кефіру, є актуальним питанням.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Для отримання кисломолочних продуктів застосовують ряд культур молочнокислих бактерій і дріжджів, найбільш вживаними є молочнокислий стрептокок (Lactococcus lactis); болгарська паличка (Lactobacterium bulgaricum), вершковий стрептокок (Streptococcus cremoris), ацидофільна паличка (Lactobacterium acidophilium). Кожний вид кисломолочних продуктів виготовляють за допомогою певних культур мікроорганізмів.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Відсутня інформація стосовно використання мікрофлори житньої заквасками у виробництві кисломолочних продуктів.*

***Постановка завдання.*** *За мету було поставлено дослідження використання в технології кисломолочних продуктів мікрофлори житньої заквасками, органолептичних та фізико-хімічних характеристик отриманого готового продукту.*

***Виклад основного матеріалу.*** *За структурно-механічними властивостями згустку, органолептичними характеристиками готового продукту та показниками синерезису найкращі властивості має продукт, отриманий при внесенні в коров'яче молоко 3 % виведеної густої житньої закваски. Фізико-хімічні характеристики отриманого продукту відповідають ДСТУ 4417:2005. Кефір.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Внесення в коров'яче молоко густої житньої закваски в кількості 3 % до маси молока дозволяє отримати кисломолочний продукт, який відповідає за органолептичними і фізико-хімічними характеристиками кефіру. Виведення мікрофлори густої житньої закваски не потребує спеціальних елективних середовищ та відбувається за простою схемою. Мікрофлора густої житньої закваски містить гетероферментативні мікроорганізми Lactobacillus plantarum і Lactobacillus brevis, які невибагливі в умовах виробничого технологічного циклу, володіють пробіотичними властивостями, зумовлюючи біологічну цінність отриманого кефіру.*

***Ключові слова:*** *мікрофлора; кисломолочний продукт; житня закваска; Lactobacillus plantarum, Lactobacillus brevis.*
*Рис.: 2. Табл.: 3. Бібл.: 10.*

**Актуальність теми дослідження.** Кисломолочні напої володіють цінними харчовими та біологічними властивостями. Вони втамовують спрагу, збуджують апетити, підсилюють секрецію шлункового соку, перистальтику шлунково-кишкового тракту, покращують роботу нирок. Кисломолочні напої зберігають біологічно цінні речовини молока – метіонін, холін, Кальцій, Магній – володіють антибіотичними властивостями. Усе це свідчить про вагоме місце кисломолочних напоїв у харчуванні людини, і питання розширення асортименту кисломолочних напоїв шляхом використання нових кисломолочних культур для заквашування є актуальним.

**Постановка проблеми.** Кисломолочні напої користуються великою популярністю в різних країнах світу. Один із перших дослідників кефіру В. В. Підвисоцький прийшов до висновку, що грибкова культура кефірних зерен бере свій початок від грибкової культури кумисного ферменту, яку принесли в гори Кавказу степові племена, основною галуззю тваринництва у яких було конярство. Тут, на Кавказі, культуру кумисного ферменту почали вперше додавати в коров'яче молоко як альтернативу кобилячого молока, на основі чого і з'явився відомий кефір, а кумисний фермент адаптувався до нових реалій і став місцевою грибковою культурою кефірних зерен [1].

В Україні традиційно вживався кисляк, який отримували при скисанні молока. Через відсутність культури кефірного грибка в домашньому господарстві українців кефір не готували. З поширенням цього продукту у XX столітті для приготування продукту, схожого на кефір, у домашньому господарстві почали використовувати сметану у якості закваски. Цей процес є досить тривалим, тому не набув широкої популярності. Таким чином, пошук культур, які можуть бути використані для швидкого і легкого приготування кисломолочного продукту максимально наближеного за своїми властивостями до кефіру є актуальним питанням.

© Челябієва В. М., Щерба Л. В., Оляченко Т. Ю., 2020

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для отримання кисломолочних продуктів застосовують ряд культур молочнокислих бактерій і дріжджів: молочнокислий стрептокок (Streptococcus lactis); болгарську паличку (Lactobacterium bulgaricum), вершковий стрептокок (Streptococcus cremoris), ацидофільну паличку (Lactobacterium acidophilium), ароматутворюючі бактерії: діацетилактіс (Streptococcus diacetilactis), цитроворус (Streptococcus citrovorus), парацитроворус (Streptococcus paracitrovorus), ацетоінікус (Streptococcus asetoinicus) і молочні дріжджі, які зброджують лактозу. Кожний вид кисломолочних продуктів виготовляють за допомогою певних культур мікроорганізмів. Наприклад, при виробництві йогурту застосовують закваски термофільного стрептокока й болгарської палички [2; 3].

Streptococcus (Lactococcus) lactis – мікроорганізм, який найбільш широко використовують для приготування молочнокислих продуктів. Під його дією молоко сквашується протягом 6-10 годин, досягаючи граничної кислотності 120 °Т. Сквашене молоко має рівний щільний згусток і приємний кисломолочний запах і смак [4]. Розрізняють мезофільні стрептококи, для яких оптимальною є температура 30-35 °С, і термофільні стрептококи, для яких найбільш сприятливою є температура 40–42 °С.

Streptococcus thermophilus відносять до факультативних анаеробних молочнокислих стрептококів, він добре росте на знежиреному і гідролізованому молоці. Характерною ознакою Streptococcus thermophilus є широкий діапазон температур зростання – від 20 до 50 °С [2]. Він широко використовується в харчовій промисловості при приготуванні різних молочних продуктів, включаючи ряжанку, йогурти, сметани тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на відсутність інформації про можливість використання мікрофлори житньої закваски у виробництві кисломолочних продуктів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** У результаті проведеного аналізу виявлено, що відсутня інформація про використання в технології кисломолочних продуктів мікрофлори житньої закваски.

**Постановка завдання.** За мету було поставлено дослідження можливості використання у технології кисломолочних продуктів мікрофлори житньої закваски, органолептичних та фізико-хімічних характеристик отриманого готового продукту.

**Виклад основного матеріалу.** Кефір – продукт змішаного бродіння (молочнокислого та спиртового), виробляється сквашуванням пастеризованого молока.

Молочнокисле бродіння відіграє важливу роль під час виробництва житньопшеничного хліба, особливо в разі використання заквасок. Мікроорганізми житніх заквасок, що викликають молочнокисле бродіння, можна розділити на дві групи. Гомоферментативні молочнокислі бактерії під час зброджування гексоз утворюють виключно молочну кислоту та ароматичні речовини (типовим представником є Lactobacillus casei), гетероферментативні молочнокислі бактерії, крім молочної кислоти, утворюють велику кількість інших продуктів, у тому числі оцтову кислоту та етиловий спирт (Lactobacillus brevis).

У густих житніх заквасках переважають гетероферментативні молочнокислі бактерії (Lactobacillus plantarum, Lactobacillus brevis) [5-7], які утворюють до 72 % молочної кислоти і 21 % летких кислот (переважно оцтову), газ (переважно діоксид вуглецю) і незначну кількість спирту. Специфічними є для житнього борошна дріжджі Saccharomyces minor. Оптимальна температура їх розвитку 25–28 °С. Вони відрізняються кислотостійкістю, не вимогливі до джерел вітамінного та азотного харчування, спиртостійкі.

Отже, густі житні закваски містять мікроорганізми, а саме *Lactobacillus plantarum* і Lactobacillus brevis, які здатні забезпечити змішане бродіння коров'ячого молока.

Бактеріальна закваска Vivo Сімбілакт, яку пропонують виробники України містить Lactobacillus brevis, Lactobacillus plantarum, усього 17 видів мікроорганізмів.

Використовували для отримання кефіру закваску, яку виводили за наступною схемою. Готували густу житню закваску змішуванням 50 г борошна і 50 г води. Закваску поміщали в термостат для бродіння при температурі 28 ºС. Через 24 години закваску поновлювали, шляхом змішування всієї маси закваски , борошна (50 г) і води (50 г). Через 48 годин до закваски додавали знову 50 г борошна і 50 г води. Далі через 72 години після замісу відбирали 50 г закваски, додавали 50 г борошна і 50 г води. Через 96 годин і через 120 годин повторювали оновлювання закваски (відбирали 50 г закваски, додавали 50 г борошна і 50 г води).

Отримували кефір резервуарним способом. Для цього молоко нормалізували за вмістом жиру до 2,5 %, підігрівали, очищували від можливих механічних домішок у сепараторі. Потім молоко пастеризували і гомогенізували. Після молоко охолоджували до температури заквашування 28 ºС і вносили закваску. Суміш залишали для сквашування й утворення згустку на 8-12 годин. Закінчення сквашування визначали за структурно-механічними властивостями і кислотністю згустку. Температура дозрівання кефіру – 14-16 °С. По закінченні дозрівання кефір охолоджували до 5-8 °С.

Для заквашування використовували не висушену виведену житню закваску. Закваску вносили в кількості 1; 2; 3 та 5 % до маси молока, що заквашували. За структурно-механічними властивостями згустку та за органолептичними характеристиками готового продукту (табл. 1, рис. 1, 2) визначили, що найкращі показники має продукт, отриманий при внесенні у молоко 3 % виведеної житньої закваски. Фізико-хімічні характеристики отриманого продукту наведені в табл. 2.

*Рис. 1. Зовнішній вигляд кисломолочного продукту, приготованого шляхом внесенням 3 % житньої закваски*

Таблиця 1

*Органолептична оцінка кисломолочного продукту на мікрофлорі житньої закваски*

| **Показник** | **Характеристика за ДСТУ 4417:2005** | **Відсоток доданої житньої закваски до маси молока** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **1 %** | **3 %** | **5 %** |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Зовнішній вигляд і консистенція | Однорідна, в'язка, з порушеним або непорушеним згустком (залежно від технології виробництва). Дозволено: газоутворення, яке спричинено нормальною життєдіяльністю мікрофлори кефірної закваски; незначне відокремлення сироватки | Однорідна, не дуже в'язка маса, без газоутворення | Однорідна, в'язка маса, без газоутворення | Однорідна, в'язка маса, без газоутворення |

Закінчення табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| Смак і запах | Запах чистий, кисломолочний. Смак щипкий, без сторонніх присмаків і запахів | Запах чистий приємний, кисломолочний. Смак м'який із хлібним відтінком | Запах чистий приємний. Смак не різкий із відтінком присмаку житнього борошна | Запах чистий приємний. На смак відчутно ніби підмішене борошно в продукт |
| Колір | Молочно-білий, рівномірний за всією масою | Молочно-білий, рівномірний за всією масою | Молочно-білий, рівномірний за всією масою | Молочно-білий, рівномірний за всією масою |

Таблиця 2

*Фізико-хімічні показники отриманого кисломолочного продукту*

| **Показник** | **Характеристика за ДСТУ 4417:2005** | **Відсоток доданої житньої закваски до маси молока** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **1 %** | **3 %** | **5 %** |
| Кислотність, °Т | 85-130 | 104 | 107 | 111 |
| Активна кислотність, pH | 4,03-4,80 | 4,60 | 4,50 | 4,46 |

Досліджували синерезис отриманого кисломолочного продукту. Синерезис – мимовільне відділення сироватки із згустку. Ступінь синерезису є одним з показників реологічних властивостей кисломолочних продуктів, оскільки визначає міцність згустку, а отже, їх споживчі властивості. Метод визначення заснований на вимірюванні кількості сироватки, що виділилася за 1-2 год вільного фільтрування 50 $см^3$ продукту через фільтр. Відзначають час падіння першої краплі, потім заміряють об'єм виділення сироватки кожні 15 хвилин. Ступінь синерезису виражають у % від обсягу продукту, який аналізують (табл. 3). Синерезис отриманого продукту порівнювали з еталонним зразком, у якості якого використали промисловий продукт – кефір торговельної марки «Добряна» жирністю 2,5 %.

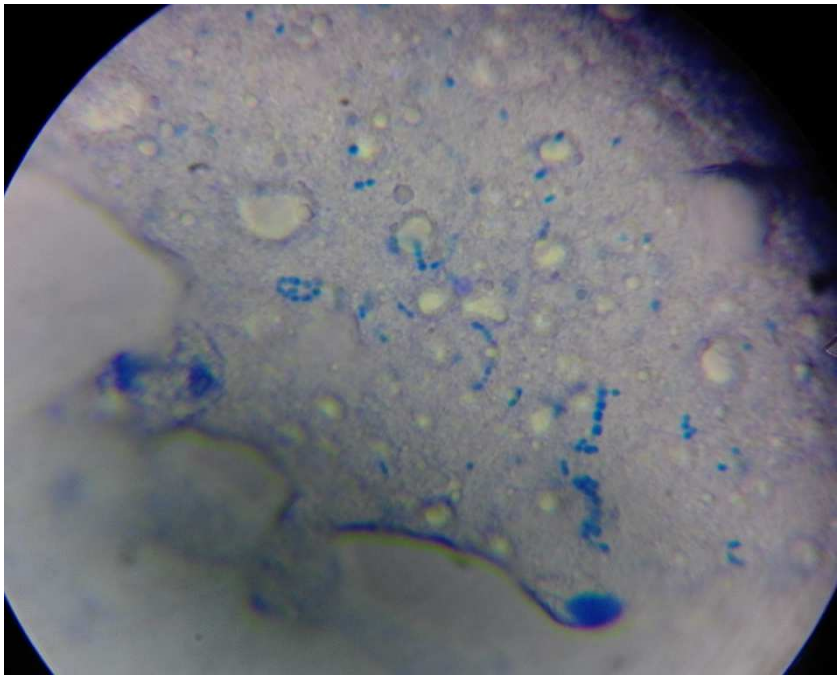


*Рис. 2. Мікрофлора отриманого кисломолочного продукту на основі закваски житнього борошна (збільшення у 2000 разів)*

Таблиця 3

*Дослідження синерезису зразків*

| Час відділення сироватки, хв | Об'єм сироватки, що відділилася, см$^3$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Кефір «Добряна» | Отриманий дослідний продукт із додаванням житньої закваски відповідно: | | |
| | | 1 % | 3 % | 5 % |
| 15 | 12,0 | 15,0 | 17,0 | 6,5 |
| 30 | 17,0 | 21,0 | 19,0 | 9,5 |
| 45 | 20,0 | 24,5 | 19,3 | 11,5 |
| 60 | 23,0 | 26,0 | 19,6 | 13,0 |
| Ступінь синерезису,% | 46,0 | 52,0 | 39,2 | 26,0 |

Відповідно до результатів табл. 3, можемо сказати, що дослідні зразки, отримані внесенням у молоко 3 і 5 % густої житньої закваски, мають покращені показники синерезису порівняно з промисловим кефіром відповідної жирності.

Для отримання кисломолочного продукту була використана мікрофлора житньої закваски, яка переважно містить Lactobacillus plantarum та Lactobacillus brevis. Ці культури забезпечують змішане бродіння коров'ячого молока – спиртове і молочнокисле. За органолептичними та фізико-хімічними показниками отриманий кисломолочний продукт відповідає ДСТУ 4417:2005. Кефір. Таким чином, отриманий на основі густої житньої закваски кисломолочний продукт можна назвати кефіром.

Lactobacillus plantarum є культурою толерантною до кислот і жовчі організму людини, що дозволяє їй виживати при проходженні через шлунково-кишковий тракт і досягати кишечника, тому Lactobacillus plantarum представляє інтерес для харчової промисловості, оскільки вважається безпечним пробіотиком.

Lactobacillus brevis добре розвивається при pH 4-7 [10], володіє пробіотичними властивостями. Це вказує на високу здатність культур до виживання у несприятливих умовах біотехнологічного циклу й перспективність їх застосування у виробництві молочних продуктів.

**Висновки відповідно до статті**. Внесення в коров'яче молоко густої житньої закваски в кількості 3 % до маси молока дозволяє отримати кисломолочний продукт, який відповідає за органолептичними і фізико-хімічними характеристиками кефіру.

Виведення мікрофлори густої житньої закваски не потребує спеціальних елективних середовищ та відбувається за простою схемою.

Мікрофлора густої житньої закваски містить гетероферментативні мікроорганізми Lactobacillus plantarum і Lactobacillus brevis, які володіють пробіотичними властивостями, що зумовлює біологічну цінність кефіру, отриманого за її допомогою.

## Список використаних джерел

1. Гамалія В. М., Руда С. П. Етапи творчого шляху В. В Підвисоцького (До 160-річчя від дня народження). *Історія науки і техніки*. 2018. №11. С. 147-153.

2. Горбатова К. К., Гунькова К. К. Биохимия молока и молочных продуктов. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2015. 328 с.

3. Горбатова К. К. Химия и физика молока. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2004. 280 с.

4. Ткаченко Н. А., Назаренко Ю. В., Окуневська С. О. Раціональне співвідношення культур лактобактерій у біотехнології кисломолочних продуктів для людей з серцево-судинними захворюваннями. *Харчова наука і технологія*. 2015. №. 9. Вип. 4. С. 16-22.

5. Челябієва В. М., Соседова К. Ю. Використання заквасок спонтанного бродіння та борошна бобових культур у виробництві хліба. *Технічні науки та технології*. 2018. № 3 (13). С. 251–257.

6. Пшенишнюк Г. Ф., Ковпак Ю. С. Вплив житніх заквасок спонтанного бродіння на кінетику кислотонакопичення в тісті та якість хліба. *Харчова наука і технологія*. 2011. № 1 (14). С. 43–46.

7. Дробот В. І., Сильчук Т. А. Використання закваски спонтанного бродіння при виробництві житньо-пшеничного хліба. *Наукові праці НУХТ*. 2016. № 1. Т. 22. С. 180-184.

8. Исследование изменения кислотности в закваске спонтанного брожения / Е. И. Пономарева та ін. *Вестник ВГУИТ*. 2013. № 3. С. 82–84.

9. Сильчук Т. А., Дробот В. І. Дослідження біотехнологічних властивостей тістових напівфабрикатів. *Наукові праці НУХТ*. 2017. № 1. Т. 23. С. 211-215.

10. Джафаров М.М. Молочнокислые бактерии Lactobacillus brevis. *Молочная промышленность*. 2011. № 10. С. 54–55.

## References

1. Hamaliia, V. M., Ruda, S. P. (2018). Etapi tvorchogo shlyahu V.V Pidvisockogo (Do 160-richchya vid dnya narodzhennya). [Stages of the creative career of V.V. Podvisotsky (To the 160th Birthday)]. *Istoriya nauki i tehniki – History of science and technology*, 11, 147–153 [in Ukrainian].

2. Gorbatova, K. K. & Gunkova, K. K. (2015). *Biohimiya moloka i molochnykh produktov [Biochemistry of milk and dairy products]*. Sankt-Peterburg: GIORD [in Russian].

3. Gorbatova, K. K. (2004). *Himiya i fizika moloka [Chemistry and Physics of Milk]*. Sankt-Peterburg: GIORD [in Russian].

4. Tkachenko, N. A., Nazarenko, Yu. V., & Okunevska, S. O. (2015). Racionalne spivvidnoshennya kultur laktobakterij u biotehnologiyi kislomolochnih produktiv dlya lyudej z sercevo-sudinnimi zahvoryuvannyami [A rational correlation of lactobacillus cultures in biotechnology of dairy products for people with cardiovascular disease]. *Kharchova nauka i tehnologiya – Food Science and Technology*, 9 (4), 16–22 [in Ukrainian].

5. Chelyabiyeva, V. M. & Sosedova, K. Yu. (2018). Vikoristannya zakvasok spontannogo brodinnya ta boroshna bobovih kultur u virobnictvi hliba [The use of spontaneous fermentation and leguminous flour in the production of bread]. *Tehnichni nauki ta tehnologiyi – Technical sciences and technologies,* 3 (13), 251–257 [in Ukrainian].

6. Pshenyshniuk, G. F. & Kovpak, Yu. S. (2011). Zakvasky spontannoho brodinnia v tekhnolohii zhytnoho khliba [Influence of spontaneous fermentation on kinetics of acid accumulation in dough and quality of bread]. *Kharchova nauka i tekhnolohiia – Food Science and Technology,* 1 (14), 43–46 [in Ukrainian].

7. Drobot, V. I. & Sylchuk, T. A. (2016). Vykorystannia zakvasky spontannoho brodinnia pry vyrobnytstvi zhytno-pshenychnoho khliba [Using spontaneous fermentation sourdough in the production of rye-wheat bread]. *Naukovi pratsi NUXT – Scientific works of NUFT*, 22 (1), 180-184 [in Ukrainian].

8. Ponomareva, E. I., Alehina, N. N., Zhuravlev, A. A. & Zhuravleva, I. A. (2013). Issledovanie izmeneniia kislotnosti v zakvaske spontannogo brozheniia [Investigation of the change in acidity in the spontaneous fermentation]. *Vestnik VGUIT – Bulletin of VSUET*, 3, 82–84 [in Russian].

9. Sylchuk, T. A. & Drobot, V. I. (2017). Doslidzhennia biotekhnolohichnykh vlastyvostei tistovykh napivfabrykativ [Research of biotechnologic properties of dough semi-finished products]. *Naukovi pratsi NUXT – Scientific works of NUFT*, 23 (1), 211–215 [in Ukrainian].

10. Dzhafarov, M. M. (2011). Molochnokislye bakterii Lactobacillus brevis [Lactic acid bacteria Lactobacillus brevis]. *Molochnaya promyshlennost – Dairy industry,* 10, 54–55 [in Russian].

*UDC 664*

*Viktoriia Cheliabiieva, Liudmyla Shcherba, Tetiana Oliachenko*

## USE OF RYE FLOUR SOURDOUGH IN THE TECHNOLOGY OF DAIRY PRODUCTS

***Urgency of the research.*** *Dairy drinks in human nutrition take a significant place. It is important for the food industry to expand the range of fermented beverages by using new fermented cultures for fermentation.*

***Target setting.*** *For the preparation of kefir, kefir fungus is used - an adapted cumin enzyme. It requires a specific selective environment. It is important to obtain crops that can be grown on available selective media, crops that can be used for the quick and easy preparation of fermented milk product - kefir.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *To obtain dairy products cultures of lactic acid bacteria and yeast are used, the most commonly used are lactic acid streptococcus (Lactococcus lactis); Bulgarian stick (Lactobacterium bulgaricum), creamy streptococcus (Streptococcus cremoris), acidophilus stick (Lactobacterium acidophilium). Each type of fermented milk products is made with the help of certain cultures of microorganisms.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *Information on the use of microflora of rye fermentation in the production of dairy products is missing.*

***The research objective.*** *The aim is to study the use of microflora of rye fermentation in the technology of fermented milk, organoleptic and physicochemical characteristics of the finished product.*

***The statement of basic materials.*** *When 3 % microflora of starter of rye flour is introduced into cow's milk, we obtain a fermented milk product that has structural and mechanical properties of a clot, organoleptic and physical chemical characteristics corresponding to kefir.*

***Conclusions.*** *Obtaining microflora of starter of rye flour does not require special selective media and occurs according to a simple scheme.*

*The microflora of thick rye fermentation contains heteroenzymatic microorganisms Lactobacillus plantarum and Lactobacillus brevis, which are undemanding in the production process, have probiotic properties, which increases the biological value of kefir.*

***Keywords:*** *microflora; fermented milk product; rye yeast; Lactobacillus plantarum; Lactobacillus brevis.*

*Fig.: 2. Tabl.:3. References: 10.*

**Челябієва Вікторія Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Cheliabiieva Viktoriia** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Food Technology Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** vika.chl@ukr.net
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-5364-4633
**ResearcherID:** F-7305-2014
**Scopus Author ID**: 6505851894

**Щерба Людмила Володимирівна** – студентка, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Shcherba Liudmyla** – student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** ludashcherba99@gmail.com

**Оляченко Тетяна Юріївна** – студентка, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Oliachenko Tetiana** – student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** battyboop54@gmail.com

Челябієва В., Щерба Л., Оляченко Т. Використання житньої закваски в технології кисломолочних продуктів. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 280-286.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 663.05*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-287-295*

*Анастасія Лялик, Олег Покотило, Микола Кухтин, Людмила Бейко*

# ОРГАНОЛЕПТИЧНИЙ І СЕНСОРНИЙ АНАЛІЗ СИРКОВОЇ ПАСТИ З ЛЛЯНОЮ ОЛІЄЮ

***Актуальність теми дослідження:*** *Нестача жирних кислот, таких як поліненасичені (лінолева і ліноленова), омега-3, у раціоні людей є серйозною проблемою. Для підвищення біологічної цінності, зокрема збагачення незамінними жирними кислотами необхідно розробляти нові види готової продукції.*

***Постановка проблеми.*** *При розробці харчових продуктів вагоме значення мають його жири, особливо жирні кислоти, такі як поліненасичені (лінолева і ліноленова), омега-3, яких практично немає у жирах тваринного походження. Великий вміст даних кислот у льоні, горіхах, рибі, саме ці продукти є корисними для профілактики серцево-судинних захворювань. Тому розроблення нових видів рецептур сиркових виробів, які мають у своєму складі інгредієнти багаті на незамінні жирні кислоти та підвищують їх біологічну цінність є перспективними для впровадження у виробництво.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, включаючи технології виготовлення сиркової пасти. Лляна олія є важливим джерелом збагачення харчових продуктів. Тому актуальним є збагачення харчових продуктів лляною олією та створення збалансованих рецептур продуктів підвищеної харчової цінності з поліпшеним жирокислотним складом і збагачених жиророзчинними вітамінами. Це беззаперечно є одним з важливих напрямків у виробництві харчових продуктів, які призначені зберігати і покращувати здоров'я, регулювати певні процеси в організмі, запобігати розвитку деяких захворювань.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми****. Для покращення харчової та біологічної цінності до сиркової пасти додавали інгредієнти багаті на незамінні жирні кислоти, а саме: лляну олію. Це беззаперечно є одним з важливих напрямків у виробництві харчових продуктів, які призначені зберігати і покращувати здоров'я, регулювати певні процеси в організмі, запобігати розвитку деяких захворювань. Створення таких продуктів харчування виводить сучасне виробництво продуктів харчування на новий рівень розвитку, коли вони знаходяться між продуктами споживання та продуктами лікувального харчування і приносять користь здоров'ю людини*

***Постановка завдання.*** *Проведення органолептичної оцінки і визначення профілю флейвору сиркової пасти з різним вмістом лляної олії.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Згідно ДСТУ 4503:2005 "Вироби сиркові. Загальні технічні умови" визначали органолептичні властивості зразків сиркової маси. Органолептичні властивості кисломолочного сиру порівнювали з показниками ДСТУ 4554:2006 Сир кисломолочний. Загальні технічні умови, а зразків сиркової пасти з ДСТУ 4503:2005 Вироби сиркові. Загальні технічні умови та удосконаленою нами 10 бальною шкалою.*

*Сенсорний аналіз зразків сиркової пасти з вмістом лляної олії проведено відповідно до ДСТУ ISO 6564:2005 Дослідження сенсорне. Методологія. Методи створювання спектра флейвору.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Встановлено, що найкращі органолептичні показники мав дослідний зразок з вмістом 10 % лляної олії. Органолептична оцінка встановила на доцільність поєднання кисломолочного сиру, як основи сиркової пасти та лляної олії, як джерела омега-3 жирних кислот. Профілограми флейвору дослідних зразків виявили, що найбільше наближений до гіпотетичного еталонного взірця мав зразок з 10 % лляної олії.*

***Ключові слова:*** *сиркова паста; лляна олія; органолептична оцінка; сенсорний аналіз; дескриптори; профіль флейвору.*
*Рис.: 1. Табл.: 5. Бібл.: 13.*

**Актуальність теми дослідження.** Сьогодні ринок молочних продуктів пропонує широкий асортимент продукції не тільки із заданою поживною цінністю, але і з функціональними властивостями. Харчові продукти, так званого «здорового харчування» мають на меті збалансовувати раціон за певними поживними чи біологічно активними речовинами та профілактувати розвиток певних захворювань. Значну частку з поміж продуктів функціонального призначення становлять молочні продукти, які виготовлені на кисломолочному сирі – сиркові вироби з додаванням різних рослинних інгредієнтів (кунжут, хрін, цибулю, часник, гриби, льон, мед, тощо), ароматичних і смакових наповнювачів [1; 2; 3; 4; 7; 8]. Висока засвоюваність білків кисломолочного продукту і значний вміст мінеральних речовин дає змогу використовувати його в дієтичному дитячому, геродієтичному та іншому харчуванні Також поширюється тенденція до заміни тваринних висококалорійних на низькокалорійні рослинні жири. Тому, при розробці харчових продуктів вагоме значення мають його жири, особливо жирні кислоти, такі як поліненасичені (лінолева і ліноленова), омега-3, яких практично немає в жирах тваринного походження. Великий вміст даних кислот у льоні, горіхах, рибі, саме ці продукти є корисними для профілактики серцево-судинних захворювань [3; 7; 8].

Отже, розроблення нових видів рецептур сиркових виробів, які мають у своєму складі інгредієнти багаті на незамінні жирні кислоти, підвищують їх біологічну цінність та є перспективними для впровадження у виробництво.

© Лялик А. Т., Покотило О. С., Кухтин М. Д., Бейко Л. А., 2020

**Постановка проблеми.** Нами було розроблено дослідні зразки сиркової пасти з вмістом лляної олії, як джерела омега-3 жирних кислот. Однак споживачі при виборі сиркових виробів в першу чергу звертають на його органолептичні показники, а не на біологічну цінність. Саме тому дослідження з визначення органолептичних і сенсорних властивостей сиркової пасти з лляною олією за допомогою сучасних методів, такого як профілю флейвору є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, включаючи технології виготовлення сиркової пасти. Розглянуто товарознавчу оцінку якості нової сиркової пасти, як продукту "здорового харчування", яка задовольняє потреби споживача в омега-3 та омега-6 і відповідає всім вимогам стандартів. До складу рецептури даного сиркового продукту входить насіння льону, кропу та маринованого огірка [1].

Проаналізовано технології кулінарної продукції на основі сиру кисломолочного, основні новації у виробництві продукції на його основі. Розроблено інноваційний задум нової продукції. Показано, що впровадження напівфабрикатів дозволить підвищити ефективність технологічних процесів, запропонувати напівфабрикати з високою харчовою та біологічною цінністю, тривалим терміном зберігання, розширити асортимент кулінарної продукції на їх основі [2].

У дослідження фахівців кафедри харчової біотехнології та хімії Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя [2; 3] запропоновано використання лляної олії (як джерела омега-3 жирних кислот) у складі сиркової пасти.

У дослідженні Т. В. Рудакової представлено технологію виробництва виробів сиркових для дитячого харчування, які виробляють з сиру кисломолочного, отриманого способом ультрафільтрації, з використанням рисового борошна, збагачені вітамінами, мінеральними речовинами та амінокислотами, омега-3. Обґрунтовано вибір компонентів виробів сиркових, зокрема, рисового борошна, як функціонально-технологічну добавку та технологічні режими виробництва сиру кисломолочного [4].

Сиркова паста, яка виготовлена на кисломолочному сирі відноситься до молочного продукту, технологія виготовлення якого пов'язана з розвитком і біохімічною активністю мікрофлори. Не термізована сиркова паста має бути представлена молочнокислими мікроорганізмами закваски. На органолептичні показники, в процесі виробництва сиркової пасти, може мати значний вплив залишкова мікрофлора пастеризованого молока, технологічного обладнання, а також інгредієнтів, які вносяться. При порушені технологічного процесу або недотримані гігієнічних вимог виробництва може попадати й розвиватися стороння технічно шкідлива та умовно-патогенна і патогенна мікрофлора, які впливають і на органолептику цього продукту [5; 6].

Органолептичні методи дослідження відносять до основних, які дають можливість одержати об'єктивні дані про якість продукту за такими важливими для споживача показниками, як смак і запах, консистенція і структура, колір і зовнішній вигляд Лляна олія є важливим джерелом збагачення харчових продуктів. Тому необхідним є збагачення харчових продуктів лляною олією та створення збалансованих рецептур продуктів підвищеної харчової цінності з поліпшеним жирокислотним складом і збагачених жиророзчинними вітамінами. Це, беззаперечно, є одним із важливих напрямків у виробництві харчових продуктів, які призначені зберігати і покращувати здоров'я, регулювати певні процеси в організмі, запобігати розвитку деяких захворювань [7; 8].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Не досліджено апробацію у виробництво розроблених нових видів рецептур сиркових виробів, які мають у своєму складі інгредієнти багаті на незамінні жирні кислоти та підвищують їх біологічну цінність.

**Постановка завдання.** Проведення органолептичного оцінювання і визначення профілю флейвору сиркової пасти з різним вмістом лляної олії. Об'єкти дослідження – дослідні зразки сиркової пасти з різним вмістом лляної олії, та контрольний зразок кисломолочного сиру нежирниого торгової марки «Молокія».

**Виклад основного матеріалу.** Органолептичні властивості кисломолочного сиру порівнювали з показниками ДСТУ 4554:2006 Сир кисломолочний. Загальні технічні умови [9], а зразків сиркової пасти з ДСТУ 4503:2005 Вироби сиркові. Загальні технічні умови [10] та удосконаленою нами 10 бальною шкалою (табл. 1).

Сенсорний аналіз зразків сиркової пасти з вмістом лляної олії проведено відповідно до ДСТУ ISO 6564:2005 Дослідження сенсорне. Методологія. Методи створювання спектра флейвору [11].

Для виготовлення сиркової пасти з лляною олією нами було вибрано як основу кисломолочний сир нежирний, виготовлений ПрАТ Тернопільським молокозаводом ТМ «Молокія».

Таблиця 1

*Шкала органолептичної оцінки сиркової пасти з вмістом лляної олії*

| **Назва показника** | **Характеристика показника** | **Оцінка в балах** |
|---|---|---|
| Смак і запах *(5 балів)* | Характерний кисломолочний, без зайвої кислотності, із ледь відчутним присмаком лляної олії | 5 |
| | Характерний кисломолочний, з вираженою кислотністю, із ледь відчутним присмаком лляної олії | 4 |
| | Характерний кисломолочний, без зайвої кислотності, з гірчичним присмаком лляної олії | 3 |
| | Характерний кисломолочний, з вираженою кислотністю, з гірчичним присмаком лляної олії | 2 |
| | Гіркий і кислий | 1 |
| Консистенція і структура *(3 бали)* | Однорідна, ніжна, пластична, пастоподібна, рівномірна мазка | 3 |
| | Однорідна, ніжна, не достатньо пластична, пастоподібна, помірна мазка | 2 |
| | Однорідна, не достатньо пластична, пастоподібна, крихка, не мазка | 1 |
| Колір і зовнішній вигляд *(2 бали)* | Привабливий для споживача – білий із ледь вираженим кремовим відтінком, рівномірний по всій масі | 2 |
| | Непривабливий для споживача – білий із ледь вираженим кремовим відтінком, не рівномірний по всій масі, з крапельками вологи | 1 |
| Загальна максимальна бальна оцінка | | 10 |

Виробництво кисломолочного сиру проводили за традиційною технологією кислотним способом із використанням закваски прямого внесення DelvoFrecs SC-600, яка містить три такі штами: *Lactococcus lactis subsp. lactis*, *Lactococcus lactis subsp. cremoris, Leconostoc mesenteroides subsp. cremoris*. У табл. 2 наведено органолептичні показники свіжовиготовленого кисломолочного сиру нежирний торгової марки «Молокія».

Таблиця 2

*Органолептичні показники свіжовиготовленого кисломолочного сиру нежирний торгової марки «Молокія», M±m, n=5*

| **Показники, що оцінюються** | **Характеристика показника, згідно з ДСТУ 4554:2006 [9]** | **Характеристика кисломолочного сиру ТМ Молокія** |
|---|---|---|
| Консистенція та зовнішній вигляд | М'яка, мазка або розсипчаста. Дозволено незначну крупинчастість та незначне виділення сироватки | М'яка, розсипчаста. Незначна крупинчастість без виділення сироватки |
| Смак та запах | Характерний кисломолочний без сторонніх присмаків і запахів | Чисті, ніжні, без зайвої кислотності, сторонніх присмаків і запахів |
| Колір | Білий або з кремовим відтінком, рівномірний за всією масою | Білий, рівномірний по всій масі, без сторонніх відтінків |

Органолептичні показники кисломолочних продуктів вважають основними при визначенні якості. Характерний кисломолочний смак і запах кисломолочних сирів формується під впливом ароматичних речовин при пастеризації молока, а також під час розвитку заквасочних культур молочнокислих мікроорганізмів, які продукують вуглекислий газ, ацетальдегід, диацетил, етанол, різні летючі жирні кислоти [12]. Таким чином, формування особливого смаку і запаху кисломолочного сиру відбувається переважно під час ферментації, дозрівання і зберігання продукту. Дані табл. 2 вказують, що виготовлений кисломолочний сир ТМ «Молокія» відповідав вимогам стандарту за всіма органолептичними показниками, тому був нами вибраний як основа для розробки сиркової пасти з лляною олією.

Новий харчовий продукт, в процесі його виготовлення, повинен бути ретельно дослідженим на стадії його розробки. Оцінювання дослідних зразків сиркової пасти з різним вмістом лляної олії спочатку проводили самостійно, а потім із залученням дегустаційної комісії створеної на кафедрі харчової біотехнології і хімії. Результати проведених досліджень наведено в табл. 3.

Таблиця 3

*Органолептичні показники дослідних зразків сиркової пасти з різним вмістом лляної олії*

| Назва показника | Сиркова паста з вмістом лляної олії | | |
|---|---|---|---|
| | Зразок № 1 (8 % лляної олії) | Зразок № 2 (10 % лляної олії) | Зразок № 3 (12 % лляної олії) |
| Колір | Білий з ледь вираженим кремовим відтінком, рівномірний за всією масою | Білий з кремовим відтінком, рівномірний за всією масою | Білий з вираженим кремовим відтінком, рівномірний за всією масою |
| Консистенція | Однорідна, пастоподібна | Однорідна, пастоподібна | Однорідна,пастоподібна |
| Смак і запах | Характерний кисломолочний без зайвої кислотності, з ледь відчутно гірчичним присмаком лляної олії | Характерний кисломолочний, без зайвої кислотності, з ледь відчутно гірчичним присмаком лляної олії | Характерний кисломолочний, без зайвої кислотності, з гірчичним присмаком лляної олії |

Крім вищезазначеної оцінки органолептичних властивостей дослідних зразків сиркової пасти з лляною олією, для надання більшої об'єктивності у визначенні кращого дослідного зразку нової сиркової пасти, було проведено бальне оцінювання згідно табл. 1. При цьому сиркова паста буде вважатися прийнятною для виробництва за органолептичними показниками при загальній кількості балів не менше 9. Результати досліджень наведено в табл. 4.

Таблиця 4

*Зведена дані бального оцінювання органолептичних властивостей дослідних зразків сиркової пасти з різним вмістом лляної олії, n = 10*

| **Дослідні зразки сиркової пасти** | **Показники, що оцінювалися** | **Бальна оцінка** | **Загальна кількість балів** |
|---|---|---|---|
| Зразок № 1 | Смак і запах | 4,6±0,2 | 9,6 |
| | Консистенція і структура | 3,0±0,1 | |
| | Колір і зовнішній вигляд | 2,0±0,1 | |
| Зразок № 2 | Смак і запах | 4,5±0,1 | 9,4 |
| | Консистенція і структура | 2,9±0,1 | |
| | Колір і зовнішній вигляд | 2,0±0,1 | |
| Зразок № 3 | Смак і запах | 3,1±0,1 | 7,7 |
| | Консистенція і структура | 2,8±0,1 | |
| | Колір і зовнішній вигляд | 1,8±0,1 | |

Дегустаційний аналіз дослідних зразків сиркової пасти виявив (табл. 3 та 4), що найбільшу кількість балів – 9,6 набрав зразок номер 1 з вмістом 8 % лляної олії. Сиркова паста з таким вмістом лляної олії характеризувалася пастоподібною рівномірно маз-

кою консистенцією однорідною по всій масі. За показником смак і запах, паста мала характерний кисломолочний, без зайвої кислотності, з ледь відчутним гірчичним присмаком лляної олії. Вміст лляної олії надавав пасті ніжно кремового відтінку, який рівномірно розподілявся по всій масі.

Зразок під номером 2 також виявився прийнятним, оскільки загальна сума балів – 9,4 перевищувала запропоновану нами межу у 9 балів і даний зразок характеризувався добрими смаковими властивостями. Збільшення вмісту лляної олії не позначилося негативно на консистенції і кольорі, так як вони практично відповідали першому зразку.

Найменшу кількість балів – 7,7 при дегустації отримав зразок під номером 3 з вмістом 12 % лляної олії. Збільшення кількості лляної олії значно відобразилося на його смакових властивостях. Зокрема, помітно відчувався гірчичний присмак лляної олії та дещо консистенція.

Наступним етапом нашої роботи було провести сенсорний аналіз дослідних зразків сиркової пасти з вмістом лляної олії. Адже на даний час визначення профілю флейвора харчового продукту дозволяє в описовій формі виразити його сенсорні показники. Флейвор – це сукупність відчуттів, які виникають в ротовій порожнині під час споживання і обумовлені смаком, запахом і консистенцією харчового продукту [13]. Методи визначення профілю флейвора ґрунтуються на концепції, що флейвор частково складається з нюхових і смакових властивостей, які ідентифікуються, і частково з основного комплексу властивостей, які не ідентифікуються окремо. Ідентифікуються тільки окремі властивості харчового продукту та оцінюється їхня інтенсивність для того, щоб було можливо описати їхній флейвор [12]. При сенсорному аналізі особливої уваги надається еталонному (гіпотетичному) зразку харчового продукту, який відповідає всім вимогам цільової групи споживачів [13].

Дослідження з визначення профілю флейвора дослідних зразків сиркової пасти з вмістом лляної олії наведено в табл. 5.

Таблиця 5

*Профільний аналіз флейвору дослідних зразків сиркової пасти з різним вмістом лляної олії*

| **Характеристика дескриптора** | **Інтенсивність характеристик, бали** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | еталон | контроль(сир кисломолочний) | Сиркова паста з вмістом лляної олії | | |
| | | | 8 % | 10 % | 12 % |
| *Смаку і запаху:* кисломолочний | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 |
| свіжий | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| лляний | 3 | 0 | 1 | 3 | 3 |
| гіркий | 2 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| чистий | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| *Консистенції і структури:* пастоподібна | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 |
| в'язка | 4 | 2 | 3 | 4 | 2 |
| *Кольору і зовнішнього вигляду:* привабливість | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Загальне враження | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| **Сума балів** | **35** | **25** | **28** | **33** | **28** |

За результати дослідження споживчих вподобань було визначено панель найбільш вагомих дескрипторів. До дескрипторів смаку і запаху було віднесено: кисломолочний, що відображає смак молочнокислого бродіння (накопичення продуктів метаболізму лактобактерій) і ферментативного розпаду вуглеводів і білку. Запропоновані дескриптори свіжий, лляний, гіркий і чистий повніше характеризують смак і запах як кисломолочного продукту, так і наявність лляної олії. Дескриптори консистенції і структури: пастоподібна і в'язка є важливими саме для сиркової пасти.

Як видно з даних табл. 5, що свіжий смак і запах властивий всім дослідним зразкам сиркової пасти (4 бали), що обумовлене використанням кисломолочного сиру високої якості. За дескриптором кисломолочний смак тільки зразок з вмістом 12 % лляної олії мав менше еталонного взірця балів (4 бали) завдяки цієї ж олії. Недостатньо виражений лляний смак відмічали у зразка з вмістом 8 % олії, що виразився на 2 бали нижче еталону. На 1 бал більше еталону виявилася оцінка гіркого смаку у взірця з 12 % олії, а у взірця з 8 % на 1 бал менше. Усі взірці мали чистий не властивий іншим продуктам смак, але на 1 бал нижче еталону, що обумовлене поєднанням кисломолочного сиру і лляної олії. За дескриптором пастоподібна і в'язка консистенція максимальну кількість балів отримав зразок з вмістом 10 % лляної олії, інші зразки мали на 1-2 бали менше еталону. За дескриптором привабливість і загальне враження тільки зразок з вмістом 12 % олії мав менше на 2 бали еталонного зразка.

Контрольний зразок – кисломолочний сир достатньо сильно відрізнявся від гіпотетичного еталону через відсутність у ньому лляної олії.

Отже, результати досліджень з визначення профілю сиркової пасти з різним вмістом лляної олії вказують на те, що найбільш наближена профілограма до гіпотетичного еталонного взірця була у сиркової пасти з 10 % лляної олії, тобто найбільш точно відповідає очікуванням цільової категорії споживачів.

З метою наочного сприйняття отриманих нами результатів сенсорного дослідження побудовано профілограми флейвору сиркової пасти з різним умістом лляної олії, які наведено на рис. 1.

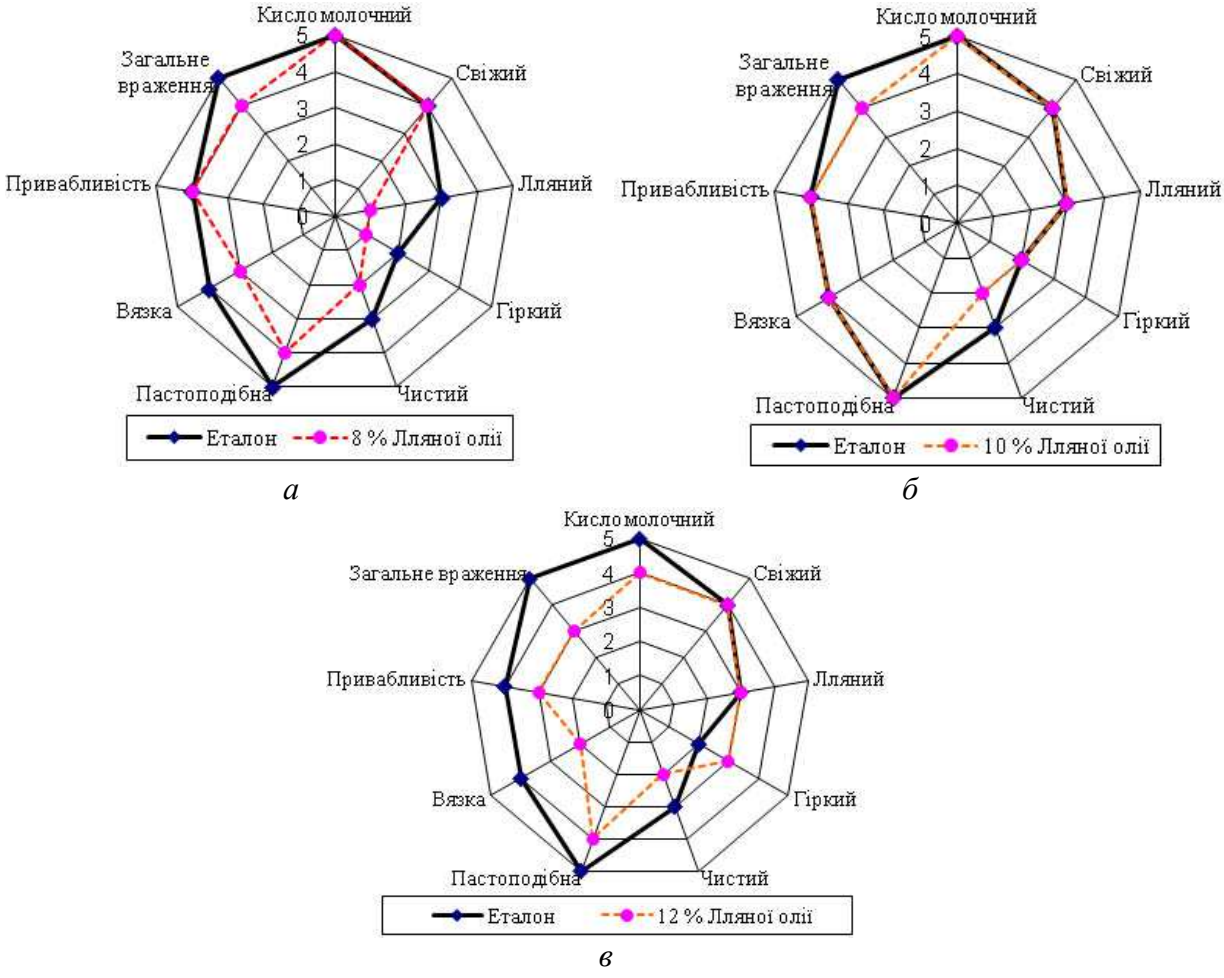



*Рис. 1. Профілограми флейвору дослідного зразка сиркової пасти з 8 % (а), 10 % (б) 12 % (в) вмістом лляної олії*

**Висновки відповідно до статті**. Органолептичний і сенсорний аналіз зразків сиркової пасти з вмістом лляної олії виявив унікальність і оригінальність продукту з вмістом 10 % олії. Органолептична оцінка встановила доцільність поєднання кисломолочного сиру, як основи сиркової пасти та додаванням лляної олії, як джерела омега-3 жирних кислот. Розроблені профілограми флейвору дослідних зразків виявили, що найбільше наближений до гіпотетичного еталонного взірця – це зразок з вмістом 10 % лляної олії, тобто найбільш точно відповідає очікуванням цільової категорії споживачів.

## Список використаних джерел

1. Віннікова В. О. Порівняльна характеристика споживчих властивостей сиркової пасти, збагаченої омега-3 та омега-6. *Праці ТДАТУ*. Миколаїв. 2014. Вип. 14, т. 1. С. 97–102.

2. Тютюкова Д.О., Гринченко Н.Г., Пивоваров П.П., Гринченко О.О. Аналіз тенологій продукції з сиру кисломолочного як передумова іноваційного задуму нової продукції. *Збірник наукових праць ХДУХТ*. 2017. Ч. 1. С. 103–117.

3. Лялик А. Т. Розробка та дослідження кисломолочного продукту – сиркова паста з лляною олією під час зберігання. *Науковий вісник ЛНУВМБС ім. С. З. Гжицького*. 2015. Т. 17. № 1 (61). С. 55–60

4. Рудакова Т. В. Технологія виробів сиркових для дитячого харчування з використанням продуктів переробки зерна. *Зернові продукти і комбікорми.* 2015. № 2 (58). С. 9–14.

5. Гачак Ю. Р. Розробка рецептур сиркових мас із кріопорошками «Морська капуста» та «Брокколі» та їх технологічні характеристики. *Науковий вісник ЛНУВМБС ім. С. З. Гжицького.* 2016. № 1 (65) С. 53–59.

6. Плотнікова Р. В. Наукові та практичні основи виробництва десертної продукції на основі молочної та плодово-ягідної сировини: монографія. Харків: ХДУХТ, 2015.170 с.

7. Lialyk A.T., Pokotylo O.S., Kukhtyn M.D.. Microbiological parameters of cheese paste with the content of flaxseed oil at different storage temperatures. *Науковий вісник ЛНУВМБ ім. С. З. Гжицького. Сер.: Харчові технології*. 2019. Т. 21, № 91. С. 124–129. DOI: 10.32718/nvlvet□f9121.

8. Криськова Л. П., Лялик А. Т. Лляна олія як джерело омега — 3 та омега -6 поліненасичених жирних кислот. *Стан і перспективи харчової науки та промисловості*: зб. матеріалів XX наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя. Тернопіль 2017. С. 198.

9 ДСТУ 4554:2006 Сир кисломолочний. Загальні технічні умови. Держспоживстандарт України, 2007. 10 с. (Національний стандарт України).

10. ДСТУ 4503:2005 Вироби сиркові. Загальні технічні умови. Держспоживстандарт України, 2006. 14 с. (Національний стандарт України).

11. ДСТУ ISO 6564:2005 ISO 6564:1985, IDT Дослідження сенсорне. Методологія. Методи створення спектра флейвору. [Чинний від 2005.05. 25]. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 9 с.

12. Грек О. В. Технологія сиру кисломолочного та сиркових виробів: навчальний посібник. Київ: НУХТ, 2009. 235 с.

13. Бошко Т., Павліш Л. Оцінювання якості лікерів за профілем флейвору. *Товари і ринки.* 2015. № 2. С. 57–63.

## References

1. Vinnikova, V. O. (2014). Porivnialna kharakterystyka spozhyvchykh vlastyvostei syrkovoi pasty, zbahachenoi omeha-3 ta omeha-6 [Comparative Characteristics of Consumer Properties of Omega-3 and Omega-6 Enriched Cheese Paste]. *Pratsi TDATU – Against TDAT, 14* (1), 97–102 [in Ukrainian].

2. Tiutiukova, D. O., Hrynchenko, N. H., Pyvovarov, P. P., Hrynchenko, O. O. (2017). Analiz tenolohii produktsii z syru kyslomolochnoho yak peredumova inovatsiinoho zadumu novoi produktsii [Analysis of technologies of produkts made of cottage cheese as a preconditionof development of innovative plan of new produkts]. *Zbirnyk naukovykh prats KhDUKhT – Collection of scientific works of CDHDT,* 1, 103-117 [in Ukrainian].

3. Lyalik, A. T. (2015). Rozrobka ta doslidzhennya kislomolochnogo produktu – sirkova pasta z llyanoyu olієyu pid chas zberigannia [Research and development of dairy products – cheese paste with linen oil during storage]. *Naukovyi visnyk LNUVMBS im. S. Z. Hzhytskoho – Scientific Journal LNUVMBS im. S.Z. Gzhickogo, 17* (1 (61)) (Vol. 4), 55–60 [in Ukrainian].

4. Rudakova, T. V. (2015). Tekhnolohiia vyrobiv syrkovykh dlia dytiachoho kharchuvannia z vykorystanniam produktiv pererobky zerna [Technology of cheese products for baby food using grain processing products]. *Zernovi produkty i kombikormy – Cereal products and compound feeds, 2 (58),* 9–14 [in Ukrainian].

5. Hachak, Yu. R. (2016) Rozrobka retseptur syrkovykh mas iz krioporoshkamy «Morska kapusta» ta «Brokkoli» ta yikh tekhnolohichni kharakterystyky [Formulation of cheese masses with crystalline powders "Sea Cabbage" and "Broccoli" and their technological characteristics]. *Naukovyi visnyk LNUVMBS im. S. Z. Hzhytskoho – Scientific Journal LNUVMBS im. S.Z. Gzhickogo, 1 (65),* 53–59 [in Ukrainian].

6. Plotnikova, R. V. (2015) Naukovi ta praktychni osnovy vyrobnytstva desertnoi produktsii na osnovi molochnoi ta plodovo-yahidnoi syrovyny [Scientific and practical bases of production of dessert products based on milk and fruit and berry raw materials]. Kharkiv: KhDUKhT [in Ukrainian].

7. Lialyk, A. T., Pokotylo, O. S., Kukhtyn, M. D. (2019). Microbiological parameters of cheese paste with the content of flaxseed oil at different storage temperatures [Microbiological parameters of cheese paste with the content of flaxseed oil at different storage temperatures]. *Naukovyi visnyk LNUVMBS im. S. Z. Hzhytskoho – Scientific Journal LNUVMBS im. S.Z. Gzhickogo, 21* (91), 124–129 [in Ukrainian].

8. Kryskova, L. P, Lialyk, A.T. (2017). Lliana oliia yak dzherelo omeha-3 ta omeha-6 polinenasychenykh zhyrnykh kyslot [Flaxseed oil as a source of omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids]. *Stan i perspektyvy kharchovoi nauky ta promyslovosti: zb. materialiv XX naukovoi konferentsii TNTU im. I. Puliuia – State and prospects of food science and industry: Coll. materials of the XX Scientific Conference of TNTU named after I. Pulia* (p. 198). Ternopil [in Ukrainian].

9. DSTU 4554:2006 Syr kyslomolochnyi. Zahalni tekhnichni umovy [Cottage cheese. General specifications].

10. DSTU 4503:2005 Vyroby syrkovi. Zahalni tekhnichni umovy [Cheese products. General specifications].

11. DSTU ISO 6564:2005 ISO 6564:1985, IDT Doslidzhennia sensorne. Metodolohiia. Metody stvorennia spektra fleivoru [The study is sensory. Methodology. Methods of creating a spectrum of flavors].

12. Hrek, O. V. (2009). *Tekhnolohiia syru kyslomolochnoho ta syrkovykh vyrobiv [Technology of dairy and curd cheese]*. Kyiv: NUKhT [in Ukrainian].

13. Boshko, T., Pavlish, L. (2015). Otsiniuvannia yakosti likeriv za profilem fleivoru [Assessment of the quality of liquors by the flavor profile]. *Tovary i rynky – Goods and markets,* 2, 57–63 [in Ukrainian].

*UDC 663.05*

*Anastasiya Lialyk, Oleg Pokotulo, Nikolay Kukhtyn, Liudmila Beyko*

## ORGANOLEPTIC AND SENSORY ANALYSIS OF FLAXSEED CHEESE PASTE

***Urgency of the research***. *Lack of fatty acids, such as polyunsaturated (linoleic and linolenic), omega-3s, is a serious problem in people's diets. To increase the biological value, in particular enrichment of essential fatty acids, whey paste, have developed new types of recipes for cheese products with the addition of linseed oil.*

***Target setting.*** *In the development of food, its fats, especially fatty acids such as polyunsaturated (linoleic and linolenic), omega-3, which are practically absent in animal fats, are of great importance. The high content of these acids in flax, nuts, fish, these products are useful for the prevention of cardiovascular diseases. Therefore, the development of new types of recipes for cheese products, which have ingredients rich in essential fatty acids and increase their biological value, are promising for introduction into production.*

***Actual scientific researches and issues analysis***. *Recent open access publications have been reviewed, including technologies for making cheese paste. Flaxseed oil is an important source of enrichment for food. Therefore, it is important to enrich foods with flaxseed oil and create balanced formulations of products of high nutritional value with improved fatty acid composition and enriched with fat-soluble vitamins. This is undoubtedly one of the important directions in the production of food, which are intended to preserve and improve health, to regulate certain processes in the body, to prevent the development of certain diseases.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *To improve the nutritional and biological value of the raw paste, ingredients rich in essential fatty acids were added, namely flaxseed oil. This is undoubtedly one of the important directions in the production of food, which are intended to preserve and improve health, to regulate certain processes in the body, to prevent the development of certain diseases. Creating such foods takes modern food production to a new level of development when they are between consumption and health foods and benefit human health.*

***The research objective.*** *Organoleptic evaluation and determination of flavor profile of cheese paste with different content of linseed oil.*

***The statement of basic materials****. According to DSTU 4503: 2005 "Cheese products. General specifications "determined the organoleptic properties of samples of cheese mass. The organoleptic properties of sour milk cheese were compared with those of DSTU 4554: 2006 Sour milk cheese. General specifications, and samples of cheese paste of DSTU 4503: 2005 Cheese products. General specifications and an improved 10 point scale. Sensory analysis of flaxseed oil paste samples was performed in accordance with DSTU ISO 6564: 2005 Sensory Study. Methodology. Methods for creating a spectrum of flavors.*

***Conclusions.*** *It was found that the best organoleptic parameters had a prototype containing 10% linseed oil. Organoleptic evaluation has established the feasibility of a combination of sour milk cheese, as the basis of cheese paste and flaxseed oil, as a source of omega-3 fatty acids. The flavoring profiles of the test specimens revealed that the closest to the hypothetical reference sample had a sample of 10% linseed oil.*

***Keywords:*** *cheese paste; linseed oil; organoleptic evaluation; sensory analysis; descriptor; flavoring profiles.*

*Fig.: 1. Table.: 5. References.: 13.*

**Лялик Анастасія Тарасівна** – асистент кафедри харчової біотехнології і хімії, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна).
**Lialyk Anastasiya** – assistant of the Department of Food Biotechnology and Chemistry, Ternopil Ivan Puluj National Technical University (56 Ruska Str., 46001 Ternopil, Ukraine).
**E-mail:** pru.tern@gmail.com
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-3013-1784

**Покотило Олег Степанович** – доктор біологічних наук, професор кафедри харчової біотехнології і хімії, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна).
**Pokotylo Oleg –** Doctor of Biological Science, Professor of the Department of Food Biotechnology and Chemistry, Ternopil Ivan Puluj National Technical University (56 Ruska Str., 46001 Ternopil, Ukraine).
**E-mail:** pokotylo_oleg@ukr.net
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-8693-8240

**Кухтин Микола Дмитрович** – доктор ветеринарних наук, професор кафедри харчової біотехнології і хімії, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна).
**Kukhtyn Nikolay –** Doctor of Veterinary Sciences, Professor of the Department of Food Biotechnology and Chemistry, Ternopil Ivan Puluj National Technical University (56 Ruska Str., 46001 Ternopil, Ukraine).
**E-mail:** kuchtynnic@gmail.com
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0195-0767

**Бейко Людмила Анатоліївна –** кандидат технічних наук, доцент кафедри харчової біотехнології і хімії, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна).
**Beyko Liudmila –** PhD in Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Food Biotechnology and Chemistry, Ternopil Ivan Puluj National Technical University (56 Ruska Str., 46001 Ternopil, Ukraine).
**E-mail:** beykol@ukr.net
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6211-8010

Лялик А., Покотило О., Кухтин М., Бейко Л. Органолептичний і сенсорний аналіз сиркової пасти з лляною олією. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 287-295.

# РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

*УДК 624.012.45*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-296-304*

*Диана Антонова*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГИБОВ ОБЫЧНЫХ И ПОВРЕЖДЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОМ

***Актуальность темы исследования.*** *Большинство пролетных железобетонных конструкций испытывают повторяющиеся нагрузки различные по величине и знаку, то есть сложного напряженно-деформационного состояния. При этом расчету прочности, деформативности и трещиностойкости нормальных сечений исследователями уделяется значительно большее внимание, чем расчетам их приопорных участков, включая наклонные сечения, из-за его сложности и недостаточной изученности.*

***Постановка проблемы.*** *В процессе эксплуатации или в ходе боевых действий пролетные железобетонные конструкции испытывают значительные повреждения и существенное снижения несущей способности, особенно при действии малоцикловой повторной нагрузки. В связи с этим возникает необходимость восстановления их работоспособности и/или увеличения несущей способности.*

***Анализ последних исследований и публикаций.*** *В действующих нормах проектирования отсутствуют рекомендации по определению остаточной несущей способности таких конструкций и расчета их усиления. Известны способы восстановления работоспособности и усиления конструкции за счет увеличения сечения путем присоединения к ним дополнительных металлических или железобетонных элементов. Но методики расчета такого усиления также несовершенны.*

***Выделение неисследованных частей общей проблемы.*** *Восстановление работоспособности указанных конструкций предлагается осуществлять путем усиления растянутых их частей ФАП, а выполненные экспериментальные исследования лягут в основу совершенствования авторами деформационного метода расчета их несущей способности.*

***Постановка задачи.*** *Основной задачей является выявить особенности напряженно-деформированного состояния обычных однопролетных балок, испытанных на действие ступенчато возрастающей нагрузки до наступления предельного состояния или разрушения (серия I), малоцикловой знакопостоянной (серия III), а также предварительно поврежденных и усиленных углепластиковыми обоймами (серия V) исследовательских элементов, доведенных до предельного состояния в предыдущих (серия III) экспериментах и сделать обобщенную оценку влияния указанного исследовательского фактора на их несущую способность.*

***Изложение основного материала.*** *Цель заключается в изучении влияния прочности (класса) бетона на прочность, деформативность и трещиностойкость усиленных углепластиком пролетных железобетонных конструкций с учетом влияния других конструктивных факторов, величины и уровня повторной малоцикловой нагрузки высоких уровней с совершенствованием деформационного метода их расчета и разработкой аналогов расчетных моделей их утомительного силового сопротивления действующим нагрузкам и учетом физической нелинейности использованных материалов.*

***Выводы в соответствии со статьей.*** *Значения прогибов железобетонных образцов-балок больше зависят от величины относительного пролета среза. При его увеличении прогибы растут на 43 и 40 % соответственно к сериям.*

***Ключевые слова:*** *бетон; арматура; углепластиковое полотно (ФАП); железобетонная балка; прогибы, деформации.*
*Рис.: 3. Табл.: 1. Библ.: 8.*

**Актуальность темы исследования.** Большинство пролетных железобетонных конструкций испытывают повторяющиеся нагрузки различные по величине и знаку, то есть сложного напряженно-деформационного состояния. При этом расчету прочности, деформативности, трещиностойкости нормальных сечений исследователями уделяется значительно большее внимание, чем расчетам их приопорных участков, включая наклонные сечения, из-за его сложности и недостаточной изученности. В действующих отечественных и зарубежных национальных нормах проектирования закладке методы расчета прочности наклонных сечений, далеки от совершенства по точности и надежности прогноза и значительно «отстают» в этом отношении от метода расчета прочности нормальных сечений. Накопленные в последние десятилетия экспериментальные и теоретические данные не позволяют решить эту задачу до конца потому, что они носят в целом выборочный характер.

**Постановка проблемы.** Сопротивление железобетонных элементов совместного действия поперечных сил и изгибающих моментов при действии малоцикловой знакопостоянной нагрузки высоких уровней является одной из наиболее важной и не до конца изученной проблемой как в теории железобетона, так и в реальном проектировании [1].

© Антонова Д. В., 2020

Неопределенное повторение в процессе эксплуатации и изменение знака нагрузки может привести к последствиям, качественно отличных от полученных при расчете на постоянную нагрузку максимальной интенсивности, на которое, собственно, ориентировано большинство действующих норм проектирования.

Если в действующих отечественных и зарубежных национальных нормах проектирования, даже при постоянной нагрузке заложены методы расчета прочности наклонных сечений пролетных конструкций далеки от совершенства по точности и надежности прогноза и значительно «отстают» в этом отношении от методов расчета прочности нормальных сечений, то влияние немногократной циклической знакопостояной нагрузки в них учитывается косвенно либо не учитывается вовсе, тем более высокого уровня.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Как показал обзор литературных источников, у исследователей еще не сложилось единое мнение о влиянии указанной нагрузки на несущую способность исследуемых элементов. Большинство из них указывает на её уменьшение при малоцикловой нагрузке. Однако часть из них [2; 3; 4] утверждает, что повторная циклическая нагрузка эксплуатационных уровней может привести к повышению прочности пролетных железобетонных элементов до 20 %, что требует дополнительных объяснений и экспериментального подтверждения.

Сопротивление поврежденных в процессе эксплуатации или в ходе боевых действий пролетных железобетонных конструкций, усиленных ФАП, от действия малоцикловой повторной нагрузки высоких уровней еще совсем не изучено. Поэтому исследования в указанном направлении важны и актуальны.

**Выделение неисследованных частей общей проблемы.** Данная тематика практически не изучена. Ранее никем не были изучены схемы разрушения приопорных участков усиленных углепластиком балок и не раскрыта его зависимость от соответствующего соотношения исследовательских факторов, что позволит усовершенствовать инженерную методику их расчета.

На основе проведенных экспериментально-теоретических исследований был усовершенствован инженерный метод их расчета по определению деформативности нормальных и наклонных сечений предварительно поврежденных и усиленных углепластиком балочных конструкций при действии малоциклового нагрузки высоких уровней относительно указанного фактора. Восстановление работоспособности указанных конструкций предлагается осуществлять путем усиления растянутых их частей углеволокном.

**Постановка задачи.** Выявить особенности напряженно-деформированного состояния однопролетных железобетонных балок, испытанных на действие, малоцикловой знакопостояной нагрузки, а также предварительно поврежденных и усиленных углепластиковыми обоймами. Сделать обобщенную оценку влияния указанного исследовательского фактора на их несущую способность. Экспериментально проверить возможность инженерного применения наиболее распространенных нормативных и авторских методик для прогноза прочности, трещиностойкости и деформативности обычных и усиленных пролетных железобетонных конструкций при действии циклических нагрузок высоких уровней. Усовершенствовать существующие инженерные методы расчета прочности приопорных участков, в том числе наклонных сечений, указанных балочных конструкций с учетом действия указанного нагрузки.

**Изложение основного материала.** Согласно принятой методологии натурный эксперимент выполняется четырёхфакторным трехуровневым планом Бокса-Бенкина В4. Варьирования факторов осуществляли по данным литературного обзора источников, который показал, что наиболее влиятельным фактором X1 является величина относительного пролета среза $a/h_0$, которая менялась на трех уровнях: $a = h_0$, $2h_0$ и $3h_0$. Вторым по величине воздействия, как правило, является такой конструктивный фактор, как класс тяжелого бетона: X2 → C16/20, C30/35, C40/55, а третьим – величина (количе-

ство) поперечного армирования на приопорных участках: X3 → $\rho_{sw}$ = 0, 0016; 0,0029; 0,0044. В качестве четвертого принят фактор внешнего воздействия X4 и уровень знакопеременной нагрузки: n = ± 0,50; ± 0,65; ± 0,80 от фактической несущей способности, то есть величины поперечной нагрузки, при котором ширина раскрытия наклонных трещин wk превышала 0,4 мм, а стрела прогибов f ≥ 1/150.

Опытные образцы-балки хранили в нормальных тепло-влажностных условиях при температуре (20 ± 2) °С и почти 100 % влажности воздуха в течении 100...110 дней. Перед испытанием на боковые поверхности балок наносили тонкий слой известкового раствора с целью облегчения фиксации образования и развития нормальных и наклонных трещины, а затем высушивали их в естественной влажности.

Деформации бетона, арматуры и прогибы опытных образцов измеряли с помощью индикаторов часового типа с ценой деления соответственно 0,001 и 0,01 мм.

Испытания опытных образцов осуществляли по схеме однопролетной свободно опертой балки, поочередно загруженной то сверху, то снизу двумя сосредоточенными силами без изменения её (балки) положения.

Перед основным экспериментом сначала поочередно испытывали 25 исследуемых балок (образцов-близнецов) первой серии на действие однократного кратковременного ступенчато возрастающей нагрузки практически до разрушения, когда ширина раскрытия наклонных трещин и стрела прогибов превышали допустимые значения (wk > 0,8 мм, f ≥ l / 150). После этого испытывали аналогичные исследуемые балки второй и третьей серий при воздействии знакопеременных и знакопостоянных малоцикловых поперечных нагрузок указанных уровней в соответствии с базой испытаний N = 20 циклов, после чего происходило нагружение образца практически до разрушения или достижения предельного состояния, если этого не произошло раньше на предыдущих циклах. Критериями разрушения опытных образцов служили достижения предельных значений деформаций в бетоне или арматуре, чрезмерно большое раскрытие (до 1 мм) наклонных (чаще) или нормальных (реже) трещин, существенное увеличение (до 15 мм) стрелы прогиба, отсутствие увеличения или спад (на 15 % и больше) показателей манометра насосной станции силовой установки. В четвертой серии опытные образцы-балки серии 2 после доведения их до предельного состояния были усилены металлической обоймой и испытаны при действии знакопеременной повторной нагрузки.

После доведения опытных образцов-балок серии 3 до предельного состояния по I и II группам, совершили усиления поврежденной нижней растянутой зоны и почти разрушенных приопорных участков арматурой ФАП из углепластикового полотна Sika® Wrap® -231C по установленной Sika Russie [5] технологии (серия 5). Конструкция указанного усиления приведена на рис. 1, 2, 3.

*Рис. 1. Схема усиления нижней растянутой зоны и приопорных участков поврежденных железобетонных балок серии 3 с большим пролетом среза*

*Рис. 2. Схема усиления нижней растянутой зоны и приопорных участков поврежденных железобетонных балок серии 3 с средним пролетом среза*

*Рис. 3. Схема усиления нижней растянутой зоны и приопорных участков поврежденных железобетонных балок серии 3 с малым пролетом среза*

Испытания усиленных внешней арматурой ФАП балок в серии 5 осуществляли по той же методологии, что и в серии 3 [6].

В процессе испытания установлено, что повторные малоцикловой нагрузки на заданных планом эксперимента уровнях негативно влияют на величину стрелы прогиба балок, что обусловлено накоплением остаточных деформаций в сжатой зоне бетона и растянутой арматуре [4; 7].

Результаты измерения стрелы прогибов в опытных образцах-балках [8] после их стабилизации при заданных планом эксперимента уровнях (ηFu) нагрузки, а также перед их разрушением (≈0,95Fu), обработка данных позволила получить следующие математические модели стрелы прогибов:

$$\hat{Y}f_1^{\eta F_u} = \begin{matrix} 4{,}5 + 0{,}8X_1 + 0{,}35X_2 + 0{,}25X_3 + 0{,}85X_4 - 0{,}35X_1^2 - \\ -0{,}15X_2^2 - 0{,}2X_4^2 + 0{,}3X_1X_3 + 0{,}2X_1X_4 \end{matrix}, \quad (1)$$
$$\mho = 6{,}0\%;$$

$$\hat{Y}f_3^{\eta F_u} = \begin{matrix} 5 + 0{,}85X_1 + 0{,}4X_2 + 0{,}25X_3 + 0{,}9X_4 - 0{,}4X_1^2 - \\ -0{,}15X_2^2 - 0{,}25X_4^2 + 0{,}3X_1X_3 + 0{,}2X_1X_4 \end{matrix}, \quad (2)$$
$$\mho = 6{,}4\%;$$

$$\hat{Y}f_5^{\eta F_u} = (3{,}5 + 0{,}5X_1 + 0{,}2X_2 + 0{,}5X_3 + 0{,}8X_4 + 0{,}3X_1X_4) \cdot 10^{-5}, \text{мм}$$
$$\mho = 8{,}1\%; \quad (3)$$

То же перед разрушением:

$$\hat{Y}\left(f_1^{0{,}95F_u}\right) = 6 + 1{,}5X_1 + 0{,}65X_2 + 0{,}7X_3 + 0{,}34X_4 - 0{,}5X_1^2 + 0{,}2X_1X_3,$$
$$\mho = 5{,}8\% \quad (4)$$

$$\hat{Y}\left(f_3^{0{,}95F_u}\right) = 6{,}5 + 1{,}5X_1 + 0{,}75X_2 + 0{,}75X_3 + 0{,}35X_4 - 0{,}55X_1^2 + 0{,}2X_1X_3$$
$$\mho = 5{,}1\%, \quad (5)$$

$$\hat{Y}\left(f_5^{0{,}95F_u}\right) = 13{,}4 + 5{,}2X_1 + 0{,}4X_4 - 0{,}4X_1X_2$$
$$\mho = 5{,}4\%, \quad (6)$$

Геометрическая интерпретация математических моделей показана на рис. 4. и рис. 5.

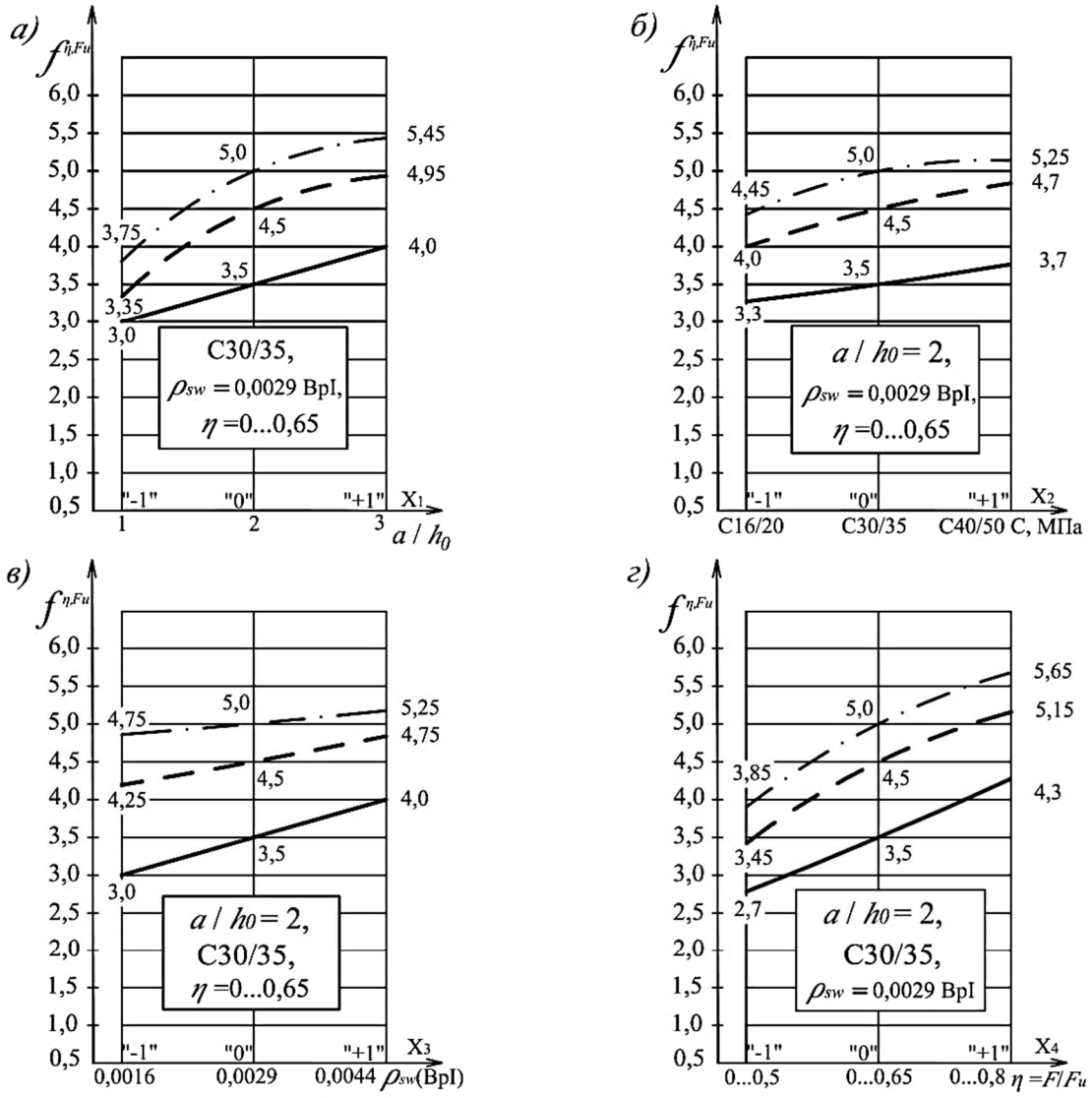



*Рис. 4. Зависимость прогибов обычных (серии 1,3) и усиленных углепластиком (серия 5) железобетонных балок от величины относительного пролета среза, $a/h_0$ (а), от класса бетона С (б), от количества поперечной арматуры $\rho_{sw}$ (в), уровня малоцикловой повторной нагрузки (г)*

Анализ математических моделей (1) и (3) и рис. 4 показывает, что значение прогибов опытных образцов 1, 3 и 5-й серий (табл. 1) на соответствующих уровнях нагрузки увеличиваются в среднем относительно средних значений 4,5; 5,0 и 3,5 мм при увеличении:

- относительного пролета среза $a/h_0$ от 1 до 3 на 36, 34 и 28 %;
- класса бетона от С16/20 до С40/50 на 16 и 11 %;
- количества поперечной арматуры $\rho_{sw}$ от 0,0016 до 0,0044 на 11 и 10 %;
- уровня поперечной нагрузки n от 0,5 до 0,8 на 38 и 14 %.

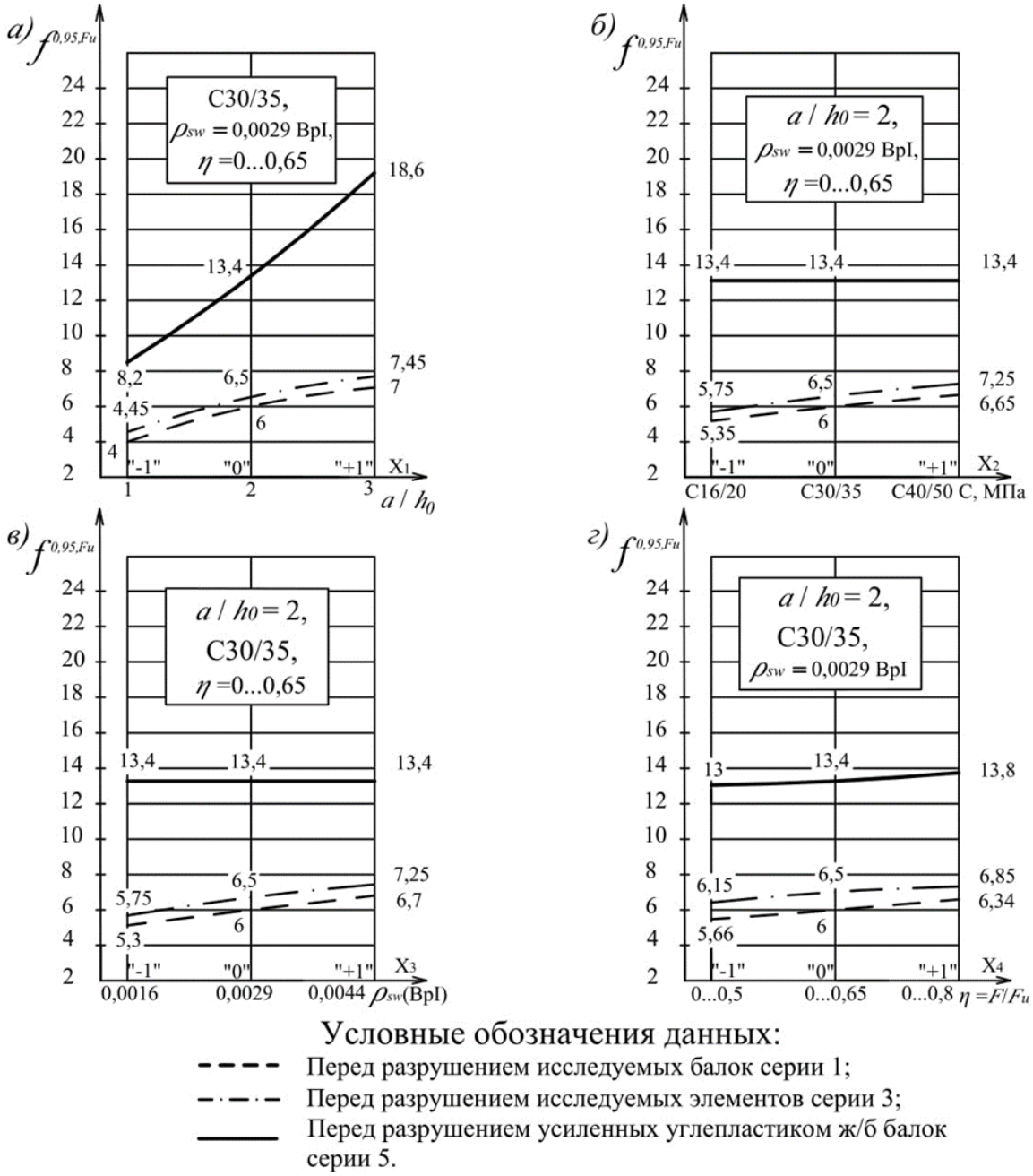



*Рис. 5. Влияние величины относительного пролета среза, $a/h_0$ (а), от класса бетона С (б), от количества поперечной арматуры $\rho_{sw}$ (в), от уровня малоцикловой повторной нагрузки (г), на прогибы обычных (серии 1,3) и усиленных углепластиком (серия 5) железобетонных образцов*

Сравнение моделей (4) и (6) и рис. 5 показывает, что прогибы образцов 1-й и 3-й серий перед разрушением увеличиваются в среднем на 8 % относительно средних значений 6,0 и 6,5 мм при увеличении:

- относительного пролета среза $a/h_0$ от 1 до 3 на 50 % и 46 %;
- класса бетона от С16/20 до С40/50 на 22 и 23%;
- количества поперечной арматуры $\rho_{sw}$ от 0,0016 до 0,0044 на 23 %;
- уровня поперечной нагрузки n от 0,5 до 0,8 на 12 и 11 %.

Таблица 1

*Стрела прогибов опытных образцов-балок*

| № опыта | Стрела прогибов балок, мм, при $\eta F_u$ | | | | | | Стрела прогибов балок, мм, перед разрушением | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $f_1^{\eta F_{u1}}$ exp | $\hat{f}_1^{\eta F_{u1}}$ 1 | $f_3^{\eta F_{u1}}$ exp | $\hat{f}_3^{\eta F_{u1}}$ 2 | $f_{3,f,5}^{\eta F_{u1}}$ exp | $\hat{f}_3^{\eta F_{u1}}$ 3 | $f_1^{0,95F_u}$ exp | $\hat{f}_1^{0,95F_u}$ 4 | $f_3^{0,95F_u}$ exp | $\hat{f}_3^{0,95F_u}$ 5 | $f_{3,f,5}^{0,95F_u}$ exp | $\hat{f}_{3,f,5}^{0,95F_u}$ 6 |
| 1 | 6,36 | 6,55 | 6,82 | 7,1 | 6,0 | 5,8 | 8,88 | 8,9 | 9,51 | 9,50 | 17,9 | 18,6 |
| 2 | 4,08 | 4,45 | 4,62 | 4,9 | 3,6 | 3,6 | 7,62 | 8,2 | 8,88 | 8,80 | 17,3 | 17,8 |
| 3 | 5,21 | 5,45 | 5,68 | 6,0 | 4,5 | 4,8 | 7,08 | 7,1 | 7,55 | 7,6 | 17,9 | 18,6 |
| 4 | 3,19 | 3,35 | 3,49 | 3,8 | 2,3 | 2,6 | 6,28 | 6,4 | 6,93 | 6,9 | 17,3 | 17,8 |
| 5 | 5,57 | 5,85 | 5,89 | 6,3 | 5,8 | 5,4 | 7,31 | 7,6 | 7,99 | 8,0 | 18,6 | 19,4 |
| 6 | 3,71 | 3,75 | 3,79 | 4,1 | 3,4 | 3,2 | 7,35 | 6,9 | 7,34 | 7,3 | 17,9 | 18,6 |
| 7 | 4,60 | 4,75 | 4,80 | 5,2 | 3,9 | 4,4 | 5,96 | 5,8 | 6,13 | 6,1 | 18,6 | 19,4 |
| 8 | 2,61 | 2,65 | 2,70 | 3,0 | 2,0 | 2,2 | 4,35 | 5,1 | 5,48 | 5,4 | 17,9 | 18,6 |
| 9 | 3,92 | 3,95 | 4,09 | 4,4 | 4,2 | 4,2 | 6,32 | 5,5 | 6,29 | 6,1 | 8,4 | 9,0 |
| 10 | 2,23 | 2,65 | 2,70 | 3,0 | 2,4 | 3,2 | 4,88 | 4,8 | 5,56 | 5,4 | 7,6 | 8,2 |
| 11 | 3,82 | 4,05 | 4,23 | 4,5 | 3,4 | 3,2 | 4,37 | 4,5 | 5,24 | 5,0 | 8,4 | 9,0 |
| 12 | 2,58 | 2,75 | 2,82 | 3,1 | 2,4 | 2,2 | 4,23 | 3,8 | 4,49 | 4,3 | 7,6 | 8,2 |
| 13 | 2,94 | 3,25 | 3,24 | 3,6 | 3,7 | 3,8 | 4,15 | 4,2 | 4,81 | 4,6 | 7,5 | 8,2 |
| 14 | 1,79 | 1,95 | 1,90 | 2,2 | 2,6 | 2,8 | 3,59 | 3,5 | 4,08 | 3,9 | 6,7 | 7,4 |
| 15 | 2,98 | 3,35 | 3,36 | 3,7 | 2,6 | 2,8 | 3,50 | 3,2 | 3,80 | 3,5 | 7,5 | 8,2 |
| 16 | 1,93 | 2,05 | 2,00 | 2,3 | 2,2 | 1,8 | 2,94 | 2,5 | 3,07 | 2,8 | 6,7 | 7,4 |
| 17 | 4,53 | 4,95 | 5,21 | 5,45 | 4,0 | 4,0 | 7,16 | 7,0 | 7,59 | 7,45 | 17,9 | 18,6 |
| 18 | 3,62 | 3,35 | 3,61 | 3,75 | 3,0 | 3,0 | 4,04 | 4,0 | 4,81 | 4,45 | 7,5 | 8,2 |
| 19 | 4,88 | 4,70 | 5,28 | 5,25 | 3,6 | 3,7 | 6,56 | 6,65 | 7,42 | 7,25 | 13,1 | 13,4 |
| 20 | 4,04 | 4,00 | 4,37 | 4,45 | 3,5 | 3,3 | 5,53 | 5,35 | 5,88 | 5,75 | 13,7 | 13,4 |
| 21 | 4,82 | 4,75 | 5,18 | 5,25 | 4,1 | 4,0 | 6,74 | 6,7 | 7,50 | 7,25 | 13,0 | 13,4 |
| 22 | 4,27 | 4,25 | 4,64 | 4,75 | 3,1 | 3,0 | 5,46 | 5,3 | 5,96 | 5,75 | 13,8 | 13,4 |
| 23 | 5,46 | 5,15 | 5,65 | 5,65 | 4,5 | 4,3 | 6,23 | 6,35 | 7,02 | 6,85 | 13,8 | 13,8 |
| 24 | 3,36 | 3,45 | 3,81 | 3,85 | 2,7 | 2,7 | 5,88 | 5,65 | 6,37 | 6,15 | 13,0 | 13,0 |
| 25 | 4,39 | 4,5 | 5,00 | 5,0 | 3,6 | 3,5 | 6,29 | 6,0 | 6,72 | 6,5 | 13,2 | 13,4 |
| $\sum(\bar{y}-\hat{y})^2$ | | 1,29 | 1,74 мм$^2$ | | 1,92 мм$^2$ | | 2,65 мм$^2$ | | 2,45 мм$^2$ | | 17,65 мм$^2$ | |
| $\sigma=\sqrt{\sum(\bar{y}\cdot\hat{y})^2/24}$ | | 0,23 | 0,27 мм | | 0,28 мм | | 0,33 мм | | 0,32 мм | | 0,86 мм | |
| $\Delta=(\sigma/b_0)100\%$ | | 6% | 6,4 % | | 8,1 % | | 5,8 % | | 5,1 % | | 6,4 % | |

**Выводы в соответствии со статьей.** Значения прогибов железобетонных образцов-балок больше зависят от величины относительного пролета среза. При его увеличении прогибы растут на 43 и 40 %, соответственно, к сериям. На втором месте находится уровень поперечной нагрузки. При его увеличении прирост прогибов составляет 38 и 12 %. Рост класса бетона и коэффициента поперечного армирования увеличивает прогибы на 23 %.

В целом, влияние малоцикловой знакопостоянной нагрузки на железобетонные образцы-балки существенно отличается от влияния однократной ступенчато возрастающей статической нагрузки. А именно, несущая способность образцов третьей серии на 10 % ниже по сравнению с 1-й серии. Также указанный вид нагрузки увеличивает ширину раскрытия нормальных и наклонных трещин до 15 %, размер относительных деформаций растянутой арматуры – на 8 %, размер относительных деформаций сжатого бетона - на 10%, размер прогибов – на 11 %.

**Список использованных источников**

1. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003). Москва, 2005. 217 с.

2. Бабич Е. М., Погореляк А. П. Прочность бетона после действия малоцикловой сжимающей нагрузки. *Изв. вузов. Сер. Строительство и архитектура*. Москва, 1976. № 4. С. 33–36.

3. Бабич Є. М., Кухнюк О. М. Деформаційні характеристики бетону при осьовому малоциклovому стиску. *Вісник Рівненського державного технічного університету: збірник наукових праць*. 1999. Вип. 2, ч. 3. С. 21–25.

4. Бабич Е. М., Крусь Ю. А., Панчук Ю. Н. Работа мелкозернистого бетона в условиях малоциклового статического нагружения. *Изв. вузов. Сер. Строительство*. Москва, 1995. № 9. С. 26–32.

5. СТО 13613997-001-2011. Стандарт организации. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами SikaR. Москва: ОАО «ЦНИИПромзданий», ООО «Зика», 2011. 61 с.

6. Karpiuk V., Kostiuk A., Maistrenko O., Somina Yu. Influence of intermittent cyclic loading on reinforced concrete resistance model. *Electronic journal of the faculty of civil engineering of Osijek*. 2017. Number 15. P. 59–74.

7. Карпюк В. М., Сьоміна Ю. А., Костюк А. І., Майстренко О. Ф. Особливості напружено-деформованого стану і розрахунку залізобетонних конструкцій за дії циклічного навантаження високих рівнів. Одеса, 2018. 236 с.

8. Satpute A. S. “Retrofitting of Concrete Beams Using Externally Bonded GFRP Wraps- an Overview”, *International Journal for Scientific Research & Development (IJSRD)*, Volume-03, Issue-12, 2016, pp.720-723.

## References

1. Posobie no proektirovaniiu betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksii iz tiazhelogo betona bez predvaritelnogo napriazheniia armatury (k SP 52-101-2003) [A guide for the design of concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete without prestressing reinforcement (to SP 52-101-2003)] (2005). Moscow [in Russian].

2. Babich, E. M., Pogoreliak, A. P. (1976). Prochnost betona posle deystviya malotsiklovoy szhimayuschey nagruzki [Strength of concrete after the action of low-cycle compressive load]. I*zv. vuzov. Ser. Stroitelstvo i arhitektura – Izv. universities. Ser. Construction and architecture,* 4, 33-36 [in Russian].

3. Babich, E. M., Kuhnyuk, O. M. (1999). Deformatsiini kharakterystyky betonu pry osovomu malotsyklovomu stysku [Deformation characteristics of concrete in axial low-cycle compression]. *Visnik Rivnenskogo derzhavnogo tehnichnogo universitetu – Bulletin of Rivne State Technical University*, 2 (3), 21-25 [in Ukrainian].

4. Babich, E. M., Krus, Yu. A., Panchuk, Yu. N. (1995). Rabota melkozernistogo betona v usloviyah malotsiklovogo staticheskogo nagruzheniya [The work of fine-grained concrete under conditions of low-cycle static loading]. *Izv. vuzov. Ser. Stroitelstvo – Izv. universities. Ser. Construction*, 9, 26-32 [in Russian].

5. *STO 13613997-001-2011. Standart organizatsii. Usilenie zhelezobetonnykh konstruktsii kompozitnymi materialami SikaR, OAO «TsNIIPromzdaniy», OOO «Zika» [STO 13613997-001-2011. Organization Standard. Reinforcement of reinforced concrete structures with SikaR composite materials]* (2011). Moscow [in Russian].

6. Karpiuk, V., Kostiuk, A., Maistrenko, O., Somina, Yu. (2017). Influence of intermittent cyclic loading on reinforced concrete resistance model. *Electronic journal of the faculty of civil engineering of Osijek*, 15, 59-74.

7. Karpiuk, V. M, Somina, Yu. A., Kostiuk, A. I., Maistrenko, O. F. (2018). Osoblyvosti napruzhenno-deformovanoho stanu i rozrakhunku zalizobetonnykh konstruktsii za dii tsyklichnoho navantazhennia visokih rivniv [Features of stress-strain state and calculation of reinforced concrete structures under the action of cyclic loading of high levels]. Odessa [in Ukrainian].

8. Satpute A. S. (2016). “Retrofitting of Concrete Beams Using Externally Bonded GFRP Wraps-an Overview”, *International Journal for Scientific Research & Development (IJSRD)*, Volume-03, Issue-12, pp.720-723.

*UDC 624.012.45*

*Diana Antonova*

# DETERMINATION OF DEFLECTIONS OF CONVENTIONAL AND DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH CARBON FIBER

***Urgency of the research.*** *Most reinforced concrete structures have repeated loads of varying magnitude and sign, that is, a complex stress-strain state. At the same time, the calculation of the strength and deformability of the fracture resistance of normal sections by researchers is paid much more attention than the calculation of their supporting sections, including inclined sections, because of its complexity and insufficient study.*

***Target setting.*** *During operation or in the course of hostilities, span reinforced concrete structures experience significant damage and a significant decrease in bearing capacity, especially when a low-cycle repeated load is applied. In this regard, there is a need to restore their performance and / or increase bearing capacity.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *The current design standards do not contain recommendations for determining the residual bearing capacity of such structures and calculating their amplification. Methods for restoring performance and strengthening the structure by increasing the cross section by attaching additional metal or reinforced concrete elements to them are known, but the methods for calculating this gain are also imperfect.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *It is proposed to restore the operability of these structures by reinforcing their extended parts of the FAA, and experimental studies will form the authors' basis to improve the deformation method for calculating their bearing capacity.*

***The research objective.*** *The main task is to identify the peculiarities of the stress-strain state of ordinary single-span beams, tested for stepwise increasing load before the onset of ultimate state or destruction (series I), low-cycle alternating sign (series III), as well as previously damaged and reinforced carbon-plastic clips (series V) of research elements brought to the limit in previous (series III) experiments and make a generalized assessment of the influence of the specified research factor on their bearing capacity.*

***The statement of basic materials.*** *The goal is to study the effect of concrete strength (class) on the strength, deformability and crack resistance of span reinforced concrete structures reinforced with CFRP taking into account the influence of other design factors, the magnitude and level of repeated low-cycle load of high levels with the improvement of the deformation method of their calculation and the development of analogues of calculation models of their tedious power resistance to existing loads and taking into account the physical nonlinearity of the materials used.*

***Conclusions.*** *The deflection values of reinforced concrete beam samples are more dependent on the relative span of the slice. With its increase, the deflections grow by 43 % and 40 %, respectively, to the series.*

***Keywords:*** *concrete; fittings; carbon fiber cloth (CFRP); reinforced concrete beam; deflections; deformations.*

*Fig.: 3. Table: 1. References: 8.*

**Антонова Диана Владимировна** – аспирантка Одесской государственной академии строительства и архитектуры (улица Дидрихсона, 4, г. Одесса, 65000, Украина).
**Antonova Diana** – PhD student of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (4 Didrihson Str., 65000 Odessa, Ukraine).
**E-mail:** antonova.dv@ukr.net
**SCOPUS Author ID:** 57211209696
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9021-857X

Антонова Д. Определение прогибов обычных и поврежденных железобетонных балок, усиленных углепластиком. *Технічні науки та технології.* 2020. № 1 (19). С. 296-304.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 528.482*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-305-314*

*Сергій Крячок*

# СУЧАСНИЙ СТАН ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ АЕРОДРОМНИХ ПОКРИТТІВ В УКРАЇНІ

***Актуальність теми дослідження.*** *В Україні нині діє Державна цільова програма розвитку аеропортів. Програмою передбачено стабільний розвиток авіаційної галузі в Україні, модернізацію та реконструкцію навних і будівництво нових аеродромів та аеродромних об'єктів, зокрема поверхонь, призначених для посадки, зльоту, руху, стоянки повітряних суден, руху наземного транспорту на території аеродрому, ґрунтових елементів аеродрому.*

***Постановка проблеми.*** *Нині значно розширився авіаційний парк в Україні та за її межами. З'явились тяжкі та надтяжкі повітряні судна. Збільшення ваги повітряних суден веде до підвищення навантаження на аеродромні покриття. Це, у свою чергу, призводить до більш швидкого зношення аеродромних покриттів та появи дефектів, які загрожують безпеці польотів, зміні профілю покриття. Тому проводиться постійний моніторинг за станом аеродромних покриттів.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, які присвячені моніторингові аеродромних покриттів.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Аналіз засобів та методів геодезичного моніторингу аеродромних покриттів дозволяє зробити висновок, що геодезичний моніторинг спрямований лише на визначення профілю покриттів. Дефекти аеродромних покриттів не є предметом геодезичного моніторингу.*

***Мета статті.*** *Головною метою цієї статті є виконати огляд конструкцій аеродромних покриттів та їхніх дефектів.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Наведено класифікації аеродромних покриттів та виконано огляд конструкцій жорстких, асфальтобетонних, полегшених, спрощених покриттів та ґрунтової частини льотного поля. Наведено особливості дефектів аеродромних покриттів і основні причини їх виникнення. Дефекти згруповані в окрему таблицю та виконано їх візуалізацію.*

***Висновки відповідно до статті.*** *У результаті аналізу засобів та методів геодезичного моніторингу стану аеродромних покриттів встановлено, що основним видом такого моніторингу є визначення лише нерівностей поверхні покриттів. Для виявлення більш широкого спектра дефектів аеродромних покриттів необхідне залучення безпілотних літальних апаратів, лазерного сканування та розробка новітніх засобів та методів моніторингу аеродромних покриттів.*

***Ключові слова:*** *злітно-посадкова смуга; аеродромні покриття; геодезичний моніторинг.*
*Табл.: 2. Рис.: 7 Бібл.: 14.*

**Актуальність теми дослідження.** В Україні нині діє Державна цільова програма розвитку аеропортів [1]. Програмою передбачено стабільний розвиток авіаційної галузі в Україні, модернізацію та реконструкцію наявних і будівництво нових аеродромів та аеродромних об'єктів, зокрема - поверхонь, призначених для посадки, зльоту, руху, стоянки повітряних суден, руху наземного транспорту на території аеродрому, ґрунтових елементів аеродрому.

**Постановка проблеми.** Практично всі аеродроми, розташовані на території України, дістались у спадок після розпаду СРСР (крім Донецького, побудованого у 2012 році, зруйнованого в результаті бойових дій на Сході України). За досить короткий проміжок часу значно розширився авіаційний парк в Україні та за її межами. З'явились тяжкі та надтяжкі повітряні судна (ПС), причому така тенденція продовжується (табл. 1) [2; 3].

Таблиця 1

*Вагові характеристики пасажирських ПС*

| Назва ПС | Ан-24 | Ан-158 | Ту-134 | Ту-204 | Боїнг-737 | Боїнг-777 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Вага, тони | 21,8 | 43,7 | 47,0 | 107,9 | 52,8 | 242,6 |

Збільшення ваги ПС веде до підвищення навантаження на аеродромні покриття під час руління, злету й посадки. Це, у свою чергу, призводить до більш швидкого зношення аеродромних покриттів та появи дефектів, які загрожують безпеці польотів, зміні профілю покриття. Тому проводиться постійний моніторинг за станом аеродромних покриттів [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Важливим показником стану аеродромного покриття є профіль його поверхні, іншими словами – нерівність покриття. Значення нерівності аеродромного покриття визначається кількома методами, які можна віднести до геодезичних, оскільки під час їх реалізації застосовуються геодезичні прилади та методи.

© Крячок С. Д., 2020

У першому випадку використовують рейку довжиною 3 м та клиновий промірник. Вимірюється просвіт між площиною покриття та нижньою гранню рейки за допомогою клинового промірника. Клиновий промірник має на косій грані поділки, за якими визначають відстань від площини рейки до поверхні покриття. Причому вимірювання виконують на кількох інтервалах довжини рейки. Вимірювання проводяться ділянками 300-400 м, а сумарна довжина ділянок повинна становити не менше ніж 10 % від загальної довжини покриття [5]. У такий спосіб визначають короткоперіодичні відхилення поверхні покриття від площини.

Нерівності поверхні аеродромного покриття можна визначати з використанням нівеліра та рейки. Метод ґрунтується на визначенні відхилення точок поверхні покриття, на які встановлюється рейка, від горизонтальної площини, заданої візирним променем нівеліра. Крок нівелювання становить 5 м вздовж покриття. Визначають відносні перевищення (відмітки) точок покриття та обчислюють відхилення $\delta h_i$ цих точок (крім першої та останньої на ділянці вимірювань) відносно прямої, яка проходить через попередню (*i-1*) та наступну (*i+1*) точки відносно *i* точки за формулою

$$\delta h_i = \frac{h_{i-1} - h_{i+1}}{2} - h_i.$$

Довжина ділянки вимірювань становить 400 м [5]. У такий спосіб визначають більш довгоперіодичні значення нерівностей, ніж попереднім методом.

Можна виконувати опрацювання результатів нівелювання аеродромних поверхонь і в інший спосіб. Початковій точці нівелювання присвоюється додатне значення відмітки, відносно якої і виконується обчислення перевищень $h_n$ на ділянках нівелювання. Потім обчислюються значення ухилів $i_a$ для відстаней між суміжними точками $a$ = 5 м, $a$ = 10 м, $a$ = 20 м за формулою

$$i_a = \frac{h_{i+1} - h_i}{a}.$$

За результатами обчислень будується поздовжній профіль на ділянках нівелювання. У такий спосіб визначають відхилення точок поверхні покриття з періодами 5 м, 10 м, 20 м та ухили поверхні на цих же інтервалах [6].

Наведені методи та засоби їх реалізації для визначення нерівностей аеродромних покриттів потребують значного часу на виконання польових вимірювань та великої групи виконавців. Тому розроблюються більш ефективні методи. До них належить автоматизована система геодезичного моніторингу злітно-посадкової смуги. До її складу входять: мобільні роботи-нівелювальники; мобільні нівелірні рейки, які розташовуються на злітно-посадковій смузі; керуючі пристрої, що знаходяться на центральній станції керування технічними системами аеропорту на диспетчерській вежі. Дистанційне ГІС/GPS керування мобільними роботами-нівелювальниками та мобільними нівелірними рейками виконується за закодованими радіосигналами. Нівелювання проводиться в автоматичному режимі за заздалегідь складеною програмою. Опрацювання результатів нівелювання виконується в режимі реального часу. Запропонована система геодезичного моніторингу злітно-посадкової смуги дозволяє отримати значення висот точок аеродромних покриттів в автоматичному режимі на заданій поверхні з регульованим кроком сканування [7]. За результатами нівелювання будується профілі аеродромних покриттів із використанням комп'ютерних технологій.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз засобів та методів геодезичного моніторингу аеродромних покриттів дозволяє зробити висновок, що геодезичний моніторинг спрямований лише на визначення нерівностей (профілю) покриття для встановлення його відступу від нормативних значень [4]. Дефекти аеродромних покриттів не є предметом геодезичного моніторингу.

**Мета статті.** Головною метою цієї статті є виконати огляд конструкцій аеродромних покриттів та їх дефектів.

**Виклад основного матеріалу.** Аеродромні покриття належать до досить трудомістких та дорогих споруд. Їх площа становить близько 15 % від загальної площі аеропорту, а вартість їх оцінюється у 25 % від повної вартості всіх його споруд та обладнання [8].

Під час стоянки або переміщення ПС передає свою вагу через колеса (пневматики) на поверхню аеродрому. Колісне навантаження через малу площу дотику спричинює значний тиск на аеродромну поверхню. Тому для забезпечення цілорічної безперебійної роботи аеропорту з прийому та відправлення ПС використовують тверді (штучні) аеродромні покриття. Їх облаштовують на злітно-посадкових смугах (ЗПС), руліжних доріжках (РД), місцях стоянок (МС) ПС, перонах і спецмайданчиках [8].

На рис. 1 наведено класифікацію аеродромних покриттів [2; 8].

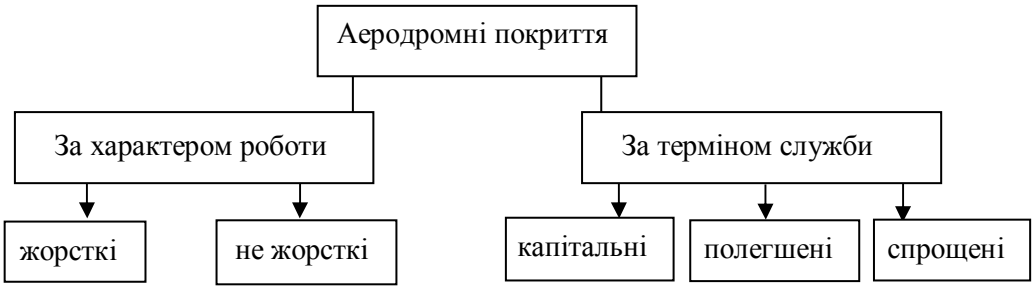


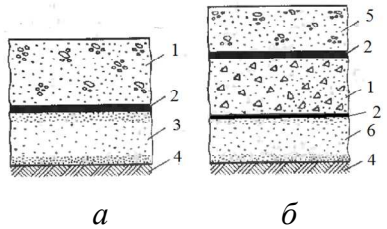

*Рис. 1. Класифікація аеродромних покриттів*

За ступенем удосконалення та строком служби аеродромні покриття поділяються на капітальні (покриття жорсткого типу та асфальтобетонні), полегшені (нежорсткі покриття, крім асфальтобетонних) та спрощені (з матеріалів без оброблення в'яжучими речовинами) [8; 10].

Для жорсткого покриття використовують плити зі звичайного чи попередньо напруженого залізобетону, армобетону, бетону, фібробетону. Попередньо напружені плити є збірними і монолітними, решта – тільки монолітними. Монолітні плити виготовляють за проєктом безпосередньо під час укладання, збірні плити доставляють із місць виготовлення. Жорсткі покриття встановлюють для експлуатації під тяжкі ПС [8].

Жорсткі покриття виготовляють одношарові та двошарові (рис. 2). Товщину шарів підбирають розрахунком, але не менше 14–16 см. Монолітний шар підсилення має товщину не менше 20 см. Максимальна товщина шарів є залежно від технічних характеристик бетоноукладача та не перевищує здебільшого 40 см [8].

Збірні плити типу «ПАГ №» є попередньо напруженими (№ – товщина плити в сантиметрах) та дозволяють виконувати монтаж у стислі терміни. Це особливо стає в пригоді за необхідності монтажу при від'ємних температурах, у випадку неможливості застосування бетоноукладачів та під час ремонту покриття. Ці плити мають розміри в плані 6 м на 2 м. Під час укладання під плити кладуть прошарок піскоцементної суміші завтовшки 2–4 см [8].




*а* *б*

*Рис. 2. Приклади жорстких аеродромних покриттів:*
*а – одношарове покриття; б – двошарове покриття;*
*1 – бетон; 2 – розділювальний прошарок із рулонного матеріалу; 3 – ґрунтоцемент;*
*4 – природний ґрунт; 5 – армобетон; 6 – пісок*

Під час зміни температури та вологості в монолітних жорстких покриттях виникають напруження: стиснення, розтягування, згину. Для зменшення цих зусиль та запобігання розтріскування бетону в покриттях із бетону, армобетону, залізобетону роблять поперечні та поздовжні деформаційні шви. У такий спосіб покриття розчленовують на окремі плити [8].

Деформаційні шви за призначенням поділяють на шви розширення та стиснення, а за конструкцією – наскрізні та удавані (рис. 3). В удаваному шві виникає тріщина в результаті всідання бетону, яка і відіграє надалі роль шва. Над швами нарізають борозни та заповнюють їх герметиком. Шви стиснення забезпечують стискання (скорочення) бетону під час його усадки, а самі шви розширюються. Шви розширення звужуючись, компенсують розширення бетону з підвищенням температури [8; 9].

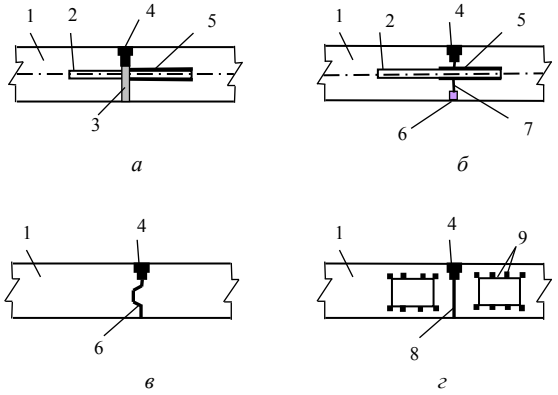



*Рис. 3. Принципові конструкції деформаційних швів у монолітних жорстких покриттях:*
*а – наскрізний шов розширення; б – удаваний шов стиснення; в – наскрізний шпунтовий (технологічний) шов стиснення; г – наскрізний шов стиснення з армуванням крайових ділянок плит;*
*1 – плита покриття; 2 – сталевий штир; 3 – дошка з отворами; 4 – герметик; 5, 8 – бітумна мастика; 6 – дерев'яний брусок; 7 – тріщина в бетоні; 9 – арматура*

Поперечні та поздовжні шви формують жорстке аеродромне покриття у вигляді масивів плит.

Армобетонні плити армують сталевою сіткою у верхній площині на глибині 0,33–0,5 товщини плити. Таке армування підвищує стійкість плити до утворення тріщин, збільшує їхню міцність та експлуатаційну довговічність. Плити мають довжину 10–15 м [8; 9].

Плити армують у двох ярусах, а довжина їх не перевищує 20 м. Перспективними є різновид залізобетонних плит – безперервно армовані безшовні покриття (БАБП) завширшки 7 м та завдовжки 3000 м і більше. БАБП не мають поперечних швів, а їх функцію виконують природні тріщини із шириною розкриття до 0,4 мм підбором відповідного армування [8].

Одним із найраціональніших типів жорсткого покриття є монолітні попередньо напружені плити. Витрати арматурної сталі в них скорочується до 35 %, а бетону – до 17 % в порівнянні із залізобетонними. Поперечні шви є швами розширення, а ширина плит – 2 м [8].

Збірні попередньо напружені плити (ПАГ) дозволяють виконати монтаж покриття в стислі терміни та за від'ємних температур. Покриття швидко розбирається під час ремонту. Випуски арматури, які виступають із граней плит, зварюють під час монтажу, утворюючи безперервні шви по периметрах плит. Верхні частини швів заповнюють герметиком, нижню – піскоцементною сумішшю. У покритті роблять поздовжні та поперечні деформаційні шви – без зварювання арматури. Шви розташовують поперек та вздовж перекриття через кожні 12, 18 та 24 м. На покриті ЗПС та РД, виконаному з ПАГ, поздовжні деформаційні шви не утворюють [8].

Фібробетонні (волокнобетонні) тверді плити є ефективними як верхній шар двошарового покриття чи шар підсилення. Вони мають підвищену стійкість до стирання, динамічного навантаження та утворення тріщин. До складу фібробетону входить відрізки сталевого дроту довжиною 25–35 мм та діаметром 0,2–0,3 мм, які рівномірно розпорошені в товщі бетону. Такі плити мають товщину 8–20 см та довжину 15 м [8].

Нежорсткі покриття мають кілька шарів, що дозволяє гасити вертикальні та горизонтальні навантаження в глибину, які виникають під час стоянки, злету та посадки ПС, коливання вологості та температури в підстильному ґрунті. Матеріали для нежорстких покриттів поділяються на ті, що заповнюють (інертні), та ті, що склеюють (в'яжучі) [8; 9].

Асфальтобетонні покриття є одним із найпоширеніших видів нежорсткого аеродромного покриття. Як інертні матеріали використовують: щебінь, гравій чи великозернистий пісок. За в'яжучі застосовують, переважно, нафтові бітуми з мінеральним порошком (тонкомеленим вапняком чи доломітом або доменним шлаком). Армування сіткою з металу або полімерів виконують під верхнім шаром асфальтобетонного покриття, що передбачено для аеродромів класів А, Б, В у місцях систематичного запуску та прогрівання двигунів ПС [8; 9].

Класифікація асфальтобетонних покриттів наведено на рис. 4. Верхні шари виготовляють зі щільних асфальтобетонних сумішей, нижні шари – з пористих чи щільних асфальтобетонних сумішей. Гарячі асфальтобетонні суміші виготовляють з в'язких бітумів та укладають у покриття при температурі 120–160 °С. Теплі асфальтобетонні суміші мають у складі в'язкі чи рідкі бітуми та укладаються за температури 80–130 °С. Холодні асфальтобетонні суміші виготовляють з рідких бітумів і укладають у покриття за температури 5–40 °С. Холодні асфальтобетонні суміші не знаходять поширення в будівництві покриттів, але часто використовуються під час ремонту [8].

За розміром фракцій мінеральних матеріалів асфальтобетонні суміші поділяють на великозернисті з розмірами часток до 40 мм, середньозернисті з розміром частинок до 20 мм, мілкозернисті – розмір частинок до 15 мм та пісок із розміром найбільших частинок 5 мм [8].

Залежно від залишкової пористості асфальтобетон поділяють на щільний – із залишковою пористістю 3–5 % та пористий – із залишковою пористістю 5–10 % [8].

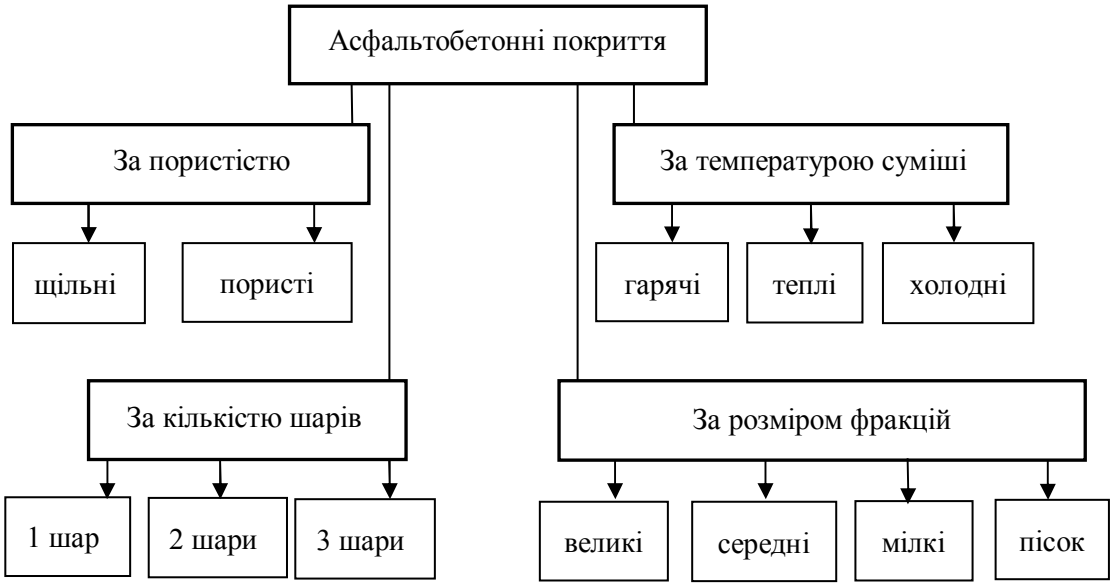



*Рис. 4. Класифікація асфальтобетонних покриттів*

На ділянках із найбільшими гальмівними зусиллями під час руху ПС асфальтобетон укладають в два чи три шари. На рис. 5 наведено приклади конструкцій асфальтобетонних покриттів. Одношарові, двошарові та тришарові покриття мають відповідно товщину: 6, 12 та 18 см [8; 9].

Асфальтобетонні покриття мають досить рівні поверхні, гарну пластичність, не утворюють пил, мають гарне зчеплення з пневматиками ПС, є водотривкими та дозволяють здійснювати будівництво у стислі терміни з повною механізацією та не потребують нарізки швів. Основними недоліками є низька термостійкість до високих літніх температур та реактивних струменів двигунів ПС, що приводить до хвилястості покриття, напливів, а за низьких температур стають крихкими та мають слабку опірність пролитим паливно-мастильним матеріалам [8; 9].

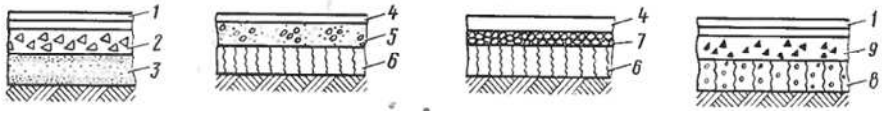
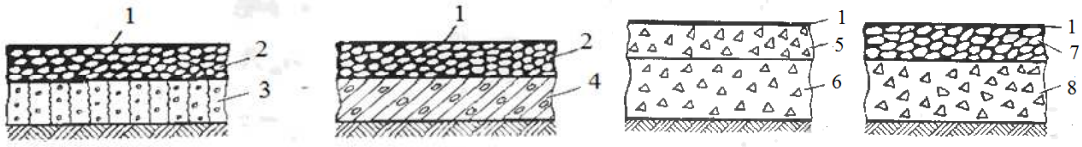



*Рис. 5. Конструкції асфальтобетонних покриттів:*
*1 – двошаровий асфальтобетон; 2 – щебінь; 3 – пісок; 4 – одношаровий асфальтобетон;*
*5 – цементобетон; 6 – ґрунт; 7 – чорний щебінь; 8 –ґрунтогравійна суміш;*
*9 – чорний гравій (або ґрунтогравійна суміш, оброблена бітумом)*

Покриття зі щебеню належать до полегшених нежорстких покриттів, які зводять підсипанням пошарово. Для цього конструктивний шар поділяють на кілька технологічних прошарків товщиною 8–15 см та ущільнюють їх важкими котками. Попередньо насичують технологічні шари в'яжучим з в'язкого бітуму або кам'яновугільного дьогтю з поверхневим розігріванням до 180 °С. Товщина покриттів залежить від маси ПС, характеристик ґрунтової основи та в середньому складає 10–40 см. Наприкінці покриття зі щебеню обробляють поверхнево бітумом, утворюючи таким чином стійкий до зносу бітумно-кам'яний захисний килим. Утворене покриття є водотривким, не створює пилу, має значну довговічність, яка наближається за термінами служби до асфальтобетонного покриття. Конструкції покриттів зі щебеню наведено на рис. 6 [8; 9].




*а* *б*

*Рис. 6. Конструкції покриттів зі щебеню:*
*а – з чорного щебеню; б – з маломіцних кам'яних порід;*
*1 – поверхнева обробка; 2 – чорний щебінь; 3 – ґрунтогравійна суміш;*
*4 – чорний гравій або ґрунтогравійна суміш, оброблена бітумом; 5 – щебінь міцних порід;*
*6 – щебінь слабких порід; 7 – щебінь слабких порід із насиченням органічними в'яжучими*

Спрощені покриття влаштовують шляхом укріплення місцевих ґрунтів. До таких належать цементоґрунтові. Цеметроґрунтове покриття влаштовують одношарове завтовшки не менше ніж 15 см чи двошарове, завтовшки 30–35 см. Використовують портландцемент марки не нижче 400, а для основи – не нижче 300. Замість цементу може бути використане вапно. Конструкції цементоґрунтових покриттів наведено на рис. 7 [9].

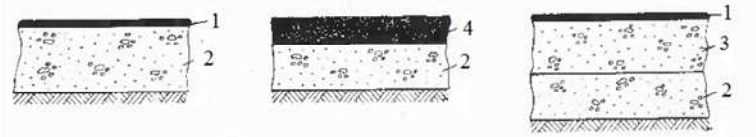



*Рис. 7. Цементоґрунтові покриття:*
*1 – поверхнева обробка; 2 – цементоґрунт;*
*3 – цементоґрунт із підвищеним вмістом цементу; 4 – асфальтобетон*

Ґрунтові смуги облаштовують переважно обабіч твердих покриттів, хоча їх місцеположення може змінюватись у межах льотного поля залежно від його конфігурації та розмірів, повітряних підходів, напрямку вітру та в міру появи деформацій на поверхні діючої ґрунтової смуги. Ґрунтова смуга повинна мати дерновий покрив. За його допомогою утворюється немов би арматура, яка зв'язує між собою структурні елементи ґрунту. Дернина укріплює ґрунт, підвищує його експлуатаційні властивості, зменшує появу пилу, утворення канав від дощових вод та зменшує глибину колії від пневматиків ПС.

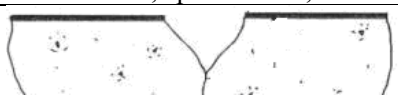
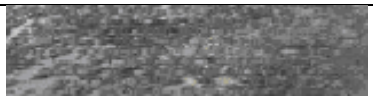
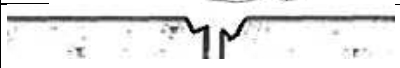
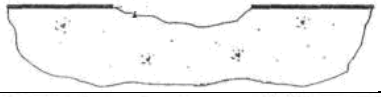
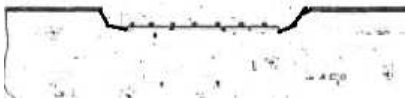
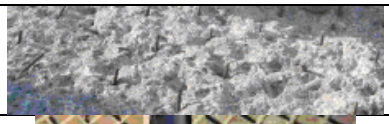
Огляд конструкцій аеродромних покриттів дозволяє підвести до розуміння особливостей їхніх дефектів.

У процесі експлуатації аеродромних покриттів виникають такі дефекти: відшарування та лущення поверхні покриття через цикли заморожування / відтанення та механічних навантажень; вибоїни й раковини через динамічні навантаження; тріщини через вплив сульфатів або лужно-силікатної реакції; ерозія поверхні в жаркому кліматі; відшарування та лущення верхнього шару покриття та усадкові тріщини через бетонування при високих температурах і неправильному догляді, які мають властивості поступово збільшуватися в глибину та довжину й часто розгалужуються в різних напрямках; відшарування верхнього шару покриття через вплив на нього солей та сумішей для розморожування; відколи крайок плит і руйнування швів через цикли заморожування / танення і механічних навантажень, впливу розливів пального та масляних хімікатів; руйнування плит у результаті силових навантажень; уступи у швах і тріщини через підняття плит; осідання та проломи плит через втрату несучої здатності основи або ґрунту, а також оголення арматури через руйнування захисного шару бетону; руйнування заповнювача швів через його низьку температурну стійкість [11].

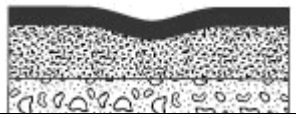
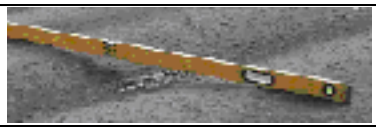
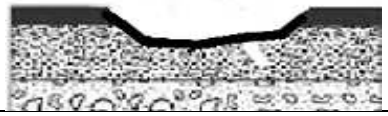
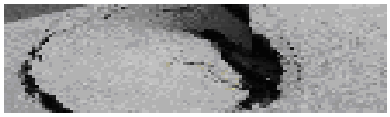
У табл. 2 наведено основні дефекти аеродромних покриттів, показано розрізи покриттів із дефектами та їх візуалізація [12-14].

Таблиця 2

*Дефекти аеродромних покриттів*

| **Назва дефекту** | **Розріз покриття з дефектом** | **Візуалізація дефекту** |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Монолітні бетонні, армобетонні, залізобетонні, збірні покриття | | |
| Тріщини |  | |
| Волосяні тріщини | | |
| Злущення поверхні плит | |  |
| Відколи бетону біля швів |  | |
| Раковини і вибоїни на поверхні плит |  | |
| Оголенням стрижнів арматури |  |  |
| Перевищення граней суміжних плит у швах | | |

Закінчення табл. 2

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| Асфальтобетонні покриття | | |
| Колії, хвилі |  |  |
| Зсуви | | |
| Прогалини | | |
| Просідання |  |  |

Дефектами ґрунтової частини льотного поля є нерівності у вигляді колій та вибоїн, а також прогалини дернового покриву різних розмірів [9].

Наведені дефекти визначаються систематичним візуальним оглядом аеродромних покриттів із проведенням необхідних замірів [9]. Така процедура займає багато часу на її проведення.

Водночас геодезичні методи візуалізації та координування стрімко удосконалюються. До перспективних геодезичних методів слід віднести застосування безпілотних літальних апаратів, лазерне сканування, які особливо ефективні для знімання лінійних об’єкті, якими є ЗПС, РД. Крім того, важливим є розробка нових інноваційних методів для виявлення та координування саме дефектів аеродромних покриттів. Це є підґрунтям для розробки більш ефективних методик геодезичного моніторингу аеродромних покриттів, крім визначення нерівностей поверхонь покриттів.

**Висновки відповідно до статті.** Наведено класифікацію та конструктивні особливості аеродромних покриттів і основні їхні дефекти. У результаті аналізу засобів та методів геодезичного моніторингу стану аеродромних покриттів в Україні встановлено, що основним видом такого моніторингу є визначення лише нерівностей поверхні покриттів. Тому для виявлення більш широкого спектра дефектів аеродромних покриттів необхідне залучення безпілотних літальних апаратів, лазерного сканування та розробка новітніх засобів та методів моніторингу аеродромних покриттів.

**Список використаних джерел**

1. Про затвердження Державної цільової програми розвитку аеропортів на період до 2023 року: Постанова Кабінет Міністрів України від 24.02.2016 № 126. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/126-2016-п.

2. Аэродромные покрытия. Современный взгляд / Кульчицкий В.А. и др. Москва, 2002. 528 с.

3. Крячок С. Д. Топографо-геодезичне забезпечення аеропортів. *Технічні науки та технології*. 2018. № 1 (11). С. 239-251.

4. СНиП 32-03-96. Аэродромы. [Взамен СНиП 2.05.08-85 и СНиП 3.06 06-88]. Москва: ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект», 2005. 27 с.

5. ДСТУ Б В.2.3-3-2000 (ГОСТ 30412-96). Дороги автомобільні та аеродроми. Методи вимірювань нерівностей основ і покриттів. [Чинний від 23-02-2000]. Київ, 2000. 10 с. (Стандарт Держбуду України).

6. Про затвердження Інструкції з експлуатації аеродромів державної авіації України: Наказ Міністерства оборони України від 1 липня 2013 р. № 441. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1229-13.

7. Бурачек В., Крячок С., Малік Т., Мамонтова Л., Немих В. Автоматизована система геодезичного моніторингу злітно-посадкової смуги. *Технічні науки та технології*. 2018. № 4 (14). С. 248-257.

8. Таланов Г. П. Аеропорти та їх експлуатація: підручник. Київ: НАУ, 2001. 116 с.

9. Изыскания и проектирование аэродромов / Глушков Г.И. и др.; под ред. Г. И. Глушкова. Москва, 1992. 463 с.

10. СП 121.13330.2012. Аэродромы. [Актуализированная редакция СНиП 32-03-96]. Москва: ФГУП ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект», 2012. 27 с.

11. Филимонова О. Н., Енютина М. В., Никулин С. С., Костылева Л. Н. Оценка состояния аэродромных покрытий и анализ материалов для их улучшения. *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. 2017. № 2. URL: chrome-extension://mhjfbmdgcfjbbpaeojofohoefgiehjai/index.html.

12. Каримова А. А., Парамонова М. И. Разрушения и ремонт искусственных покрытий взлетно-посадочных полос. *Alfabuild*. 2019. № 2(9). С. 17-28. URL: alfabuild.spbstu.ru_index_2019_9.

13. Деформации и разрушения аэродромных покрытий. ИДТ-НВЕСТ: веб-сайт. URL: http://www.idt-invest.ru/aerodrom.htm.

14. Дефекты асфальтобетонного покрытия: виды, способы устранения. BETON-HOUSE: веб-сайт. URL: https://beton-house.com/rabota/remont/defekty-asfaltobetonnogo-pokrytiya-267.

## References

1. Pro zatverdzhenia Derzhavnoi tsilovoi prohramy rozvytku aeroportiv na period do 2023 roku [On Approval of the State Target Program for the Development of Airports for the period up to 2023]. № 126 (February 24, 2016) [in Ukrainian].

2. Vasilev, N. B., Kulchicky, V. A., Makagonov, V. A (2002). *Aerodromnyye pokrytiya. Sovremennyy vzgliad [Airfield coverings. Modern look]*. Moscow*:* Fiziko-matematicheskaya ltreratura [in Russian].

3. Kryachok, S. D. (2018). Topohrafo-heodezychne zabezpechennya aeroportiv [Topographic and geodesic security airports]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi – Technical Sciences and Technologies*, 1, 239-251 [in Ukrainian].

4. Aerodromy [Airfields]. (1996). SNiP 32-03-96 from January 1, 1996. Moscow: GPI i NII GA «Aeroproyekt». Retrieved from https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294854/4294854740.pdf.

5. Dorohy avtomobilni ta aerodromakh. Metody vymiryuvan′ nerivnostey osnov y pokryttiv [Roads of automobile and aerodromes. Methodi vimiryuvan irregularities of the basics and pokrittiv]. (2000). DSTU B V.2.3-3-2000 (HOST 30412-96) from February 23, 2000. Kyiv: Standart Derzhbudu Ukrayiny. Retrieved from http://profidom.com.ua/v-2/v-2-3/1583-dstu-b-v-2-3-3-2000-gost-30412-96-dorogi-avtomobilni-ta-ajerodromi-metodi-vimiruvan-nerivnostej-osnovi-pokrittiv.

6. Pro pidtrymku v ekspluatatsiyi aerodromiv, shcho zdiysnyuyut′ aerodrom Ukrayiny: nakaz M-va oborony Ukrayiny [On Approval of the Instruction on Operation of State Aviation Airports of Ukraine: Order of the Defense Ministry of Ukraine]. № 441 (July 1, 2013). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1229-13.

7. Burachek, V., Kryachok, S., Malik, T., Mamontova, L., Nemykh, V. (2018). Avtomatyzovana systema heodezychnoho monitorynhu zlitno-posadkovoyi smuhy [Automated system of geodetic monitoring of the runway]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi – Technical Sciences and Technologies*, 4, 248-257 [in Ukrainian].

8. Talanov, H. P. (2001). *Aeroporty ta yikh ekspluatatsiya: [Airports and their operation]*. Kyiv: NAU [in Ukrainian].

9. Glushkov, G. I. (Ed.). (1992). *Izyskaniia i proiektirovaniye aerodromov [Researches and design of airdromes]*. Moscow: Transport [in Russian].

10. Aerodromy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 32-03-96 [Airfields. Updated edition of SNiP 32-03-96]. (2012). Moscow: FGUP GPI i NII GA «Aeroproyekt». Retrieved from http//www.know-house.ru/gost/sp 2013/sp 121.13330.2012.pdf.

11. Filimonova, O. N., Yenyutina, M. V., Nikulin, S. S., Kostyleva, L. N. (2017). Otsenka sostoyaniya aerodromnykh pokrytiy i analiz materialov dlya ikh uluchsheniya [Assessment of the condition of airfield coatings and analysis of materials to improve them]. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika – Aerospace forces. Theory and practice,* 2, 62-74 Retrieved from http://академия-ввс.рф/images/data/zhurnal_vks/2-2017/61-75.pdf.

12. Karimova, A. A., Paramonova, M. I. (2019) Razrusheniya i remont iskusstvennykh pokrytiy vzletno-posadochnykh polos [Destruction and repair of artificial surfaces of runways]. *Alfabuild – Alfabuild,* 2, 17-28 Retrieved from http://alfabuild.spbstu.ru_index_2019_9.

13. *Deformatsii i razrusheniya aerodromnykh pokrytiy. IDT-NVEST [Deformation and destruction of airfield coatings. IDT-NEST].* Retrieved from http://www.idt-invest.ru/aerodrom.htm.

14. *Defekty asfaltobetonnogo pokrytiya: vidy, sposoby ustraneniya. BETON-HOUSE [Defects in asphalt concrete pavement: types, methods of elimination. BETON-HOUSE]* Retrieved from https://beton-house.com/rabota/remont/defekty-asfaltobetonnogo-pokrytiya-267.

*UDC 528.482*

*Serhiy Kryachok*

## CURRENT STATUS OF AERODROME COATINGS GEODETIC MONITORING IN UKRAINE

***Urgency of the research.*** *Ukraine has a National Target Program for Airport Development. The program envisages stable development of the aviation industry in Ukraine. It is necessary to carry out the modernization and reconstruction of existing and construction of new airfields and airfield facilities, as well as surfaces for landing, take-off, movement, parking of aircraft, movement of ground transport in the airfield, ground elements of the airfield.*

***Target setting.*** *Aviation fleet has expanded significantly in Ukraine and beyond. Heavy and very heavy aircraft appeared. Increasing the weight of aircraft is the cause of increased load on airfields. This in turn leads to faster wear of the airfield coatings and the appearance of defects. Coverage defects threaten flight safety and cause a change in coverage profile. Therefore, constant monitoring of the condition of airfield coatings is carried out.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Recent open access publications on airfield coatings monitoring have been reviewed.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *An analysis of the means and methods of geodetic monitoring of aerodrome coatings allows us to conclude that geodetic monitoring is aimed only at determining the profile of coatings. Defects in airfield coatings are not subject to geodetic monitoring.*

***The research objective.*** *The main purpose of this article is to consider the designs of airfield coatings and their defects.*

***The statement of basic materials.*** *Classifications of airfield coatings are given and a review of the structures of rigid, asphalt concrete, lightweight, simplified coatings and the soil part of the airfield is performed. The features of defects in airfield coatings and the main causes of their occurrence are indicated. Defects are grouped into a separate table and visualized.*

***Conclusions.*** *As a result of the analysis of the means and methods of geodetic monitoring of the state of airfield coatings in Ukraine, it was possible to find out that the main type of such monitoring is to determine only surface roughness. To identify a wider range of defects in airfield coatings, it is necessary to use unmanned aerial vehicles, laser scanning and the development of the latest tools and methods for monitoring airfield coatings.*

***Keywords:*** *runway; airfield coverings; geodetic monitoring.*

*Table: 2. Fig.: 7. References: 14.*

**Крячок Сергій Дмитрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Kryachok Serhiy** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of geodesy, cartography and land management, Chernihiv national University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** geodesist2015@gmail.com
**ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-5633-1501
**ResearcherID:** N-3061-2016

Крячок С. Сучасний стан геодезичного моніторингу аеродромних покриттів в Україні. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 305-314.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 69.059;72.025.5*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-315-320*

*Тетяна Дубельт*

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ТРИВАЛІСТЬ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

***Актуальність теми дослідження.*** *Тема дослідження присвячена вивченню можливостей реконструкції житлових будинків перших масових серій. Незначна кількість реалізованих об'єктів реконструкції та відсутність інформації в літературних джерелах не дозволяє проаналізувати зміни тривалості робіт при впливі різних організаційно-технологічних факторів: кількості робочих годин на тиждень, суміщення робіт.. Проведення досліджень дозволило виявити зони ефективних організаційно-технологічних рішень, що впливають на скорочення тривалості реконструкції подібних об'єктів.*

***Постановка проблеми.*** *Вивчення фактичної реконструкції житлового будинку вимагає значних коштів та не дає змогу прослідкувати вплив факторів, оскільки представляє одну модель реконструкції житлового будинку.*

***Аналіз останніх досліджень та публікацій.*** *Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, по реконструкції подібних будинків, визначені серії житлових будинків та перелік робіт.*

***Виділення недослідженої раніше частини загальної проблеми.*** *Вивчення та опис впливу організаційно-технологічних факторів на тривалість реконструкції.*

***Постановка завдання.*** *Створення абстрактних моделей реконструкції житлових будинків та визначення впливу факторів на тривалість робіт за допомогою комп'ютерних програм. Визначення областей ефективних рішень, за графічним зображенням.*

***Виклад основного матеріалу.*** *На основі обраної типової серії житлового будинку були створені абстрактні моделі реконструкції при різному поєднанні факторів та отримані чисельні показники тривалості робіт. Виконано експериментально-статистичне моделювання, побудовані діаграми залежностей впливу факторів на тривалість реконструкції. Визначені чисельні межі значення факторів що впливають на скорочення тривалості робіт .*

***Висновки відповідно до статті.*** *Уперше були отримані результати дослідження впливу організаційно-технологічних факторів на тривалість реконструкції житлових будинків перших масових серій. Отримане графічне зображення залежностей факторів від тривалості реконструкції, що дозволяє виявити поєднання факторів при яких тривалість реконструкції не перевищує допустиму.*

***Ключові слова:*** *організаційно-технологічні рішення; моделі реконструкції; кількість робочих годин на тиждень; коефіцієнт суміщення робіт; зони ефективних рішень.*

*Табл.: 1. Рис.: 2. Бібл.: 8.*

**Актуальність теми дослідження.** Після постанови від 31.06.1957 «Про розвиток житлобудівництва в СРСР», починаючи з 1956 р. на території колишнього СРСР почалося масове будівництво чотирьох -, п'ятиповерхових типових житлових будинків, яке отримало подальший розвиток у 60-80-х роках. Таких будинків за офіційними даними на території України було побудовано близько 47 тисяч [1].Вони мають загальну назву житлові будинки перших масових серій. Термін їх експлуатації був розрахований на 25-30 років, оскільки житло проєктувалося як тимчасове. Будинки мають певні конструктивні недоліки, низький рівень комфорту, значний фізичний знос та аварійний стан окремих елементів [2] і потребують термінової реконструкції. Представлені дослідження дозволяють вибрати ефективні організаційно-технологічні рішення реконструкції, які впливають на тривалість робіт.

**Постановка проблеми.** Дослідження реконструкції подібних об'єктів пов'язане з такими проблемами: пілотний характер реконструкції подібних проєктів, різноманітність типових серій, реконструкція одного проєкту проходить при фіксованих значеннях організаційно-технологічних факторів. Для визначення впливу факторів необхідно дослідити велику кількість об'єктів реконструкції.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Більшість публікацій присвячена описанню конструктивних особливостей житлових будинків перших масових серій [3,4] та переліку можливих робіт із реконструкції, а саме: поліпшення планування, підвищення комфорту і т. ін. [5; 6; 7]. При описанні реалізованих проєктів реконструкції приводиться лише перелік виконаних робіт та фактичний термін їх виконання. З іншого боку, в інформаційних джерелах відсутній аналіз впливу організації та технології проведення робіт на показники реконструкції.

**Виділення недослідженої частини загальної проблеми.** Опис в інформаційних джерелах показав, що реконструкція 80 % пілотних проєктів проходить без відселення мешканців, тому одним із головних показників реконструкції є тривалість робіт. Основні

© Дубельт Т. М., 2020

фактори, що впливають на тривалість реконструкції пов'язані з організацією та суміщенням робіт, кількістю робочих годин. Дослідження присвячено визначенню впливу факторів на тривалість реконструкції за умови проживання мешканців під час реконструкції.

**Постановка завдання.** Вирішення поставленої задачі реалізується шляхом створення абстрактних моделей що імітують реконструкцію житлового будинку в різних умовах, та їх дослідження з використанням програмних продуктів. Кінцевий результат дослідження – отримання ефективних рішень для скорочення терміну реконструкції. Дослідження впливу цих факторів дозволяє в подальшому створити рекомендації до організації та технології робіт на подібних об'єктах.

**Виклад основного матеріалу.** Для проведення чисельного експерименту по визначенню залежності між факторами та показником тривалості реконструкції ($Y_1$) використовувалася математична теорія планування експерименту, яка є основою теорії експериментально-статистичного моделювання. Відповідно до класичної теорії планування скороченого експерименту, варійовані фактори повинні знаходитися в діапазоні -1; 0; +1. Нижче детально представлений кожен фактор та діапазони варіювання.

Перший фактор – кількість робочих годин на тиждень ($X_1$) прийнято відповідно до [8] і залежить від кількості робочих днів у тиждень і кількості робочих годин у день. Проведення робіт без відселення мешканців впливає на комфортне проживання й коливається від 40 до 60 годин.

Прийнята кількість робочих годин:

- 5 днів в 1 зміну по 8 годин = 40 годин (9:00-18:00);
- 6 днів в 1 зміну по 8 годин = 48 годин (9:00-18:00);
- 5 днів у 2 зміни по 6 годин = 60 годин (9:00-15:00, 16:00-22:00).

Другий фактор – ступінь суміщення робіт ($X_2$) безпосередньо впливає на тривалість реконструкції і розраховується за формулою 1.:

$$X_2 = k_{\text{сов}} = \frac{T_c}{\sum_1^N * \sum_1^n t_i}, \quad (1)$$

де Тс – тривалість періоду реконструкції, дн;

N – кількість процесів;

n – кількість захватів при організації потоку;

$t_i$ – тривалість і-го потоку, дн.

Тривалість робіт реалізованих проєктів реконструкції в середньому складає 2 роки тому прийняте значення коефіцієнта суміщення робіт при реконструкції від 0,15 до 0,25 (при суміщенні робіт 75-85 %). Зменшення показника збільшує термін виконання робіт і призводить до збитковості реконструкції.

Вплив обох факторів на тривалість можна прослідити при побудові математичної моделі у вигляді полінома (відрізок Тейлора). Відповідно до кількості факторів були складені 9 моделей (точок) дослідження (табл. 1).

Для їх створення були розроблені 3 абстрактних моделі.

На основі результатів аналізу серій житлових будинків був обраний житловий будинок однієї з розповсюджених серій 1-$438_{2.5}$-7. Він складався з 5 поверхів та мав 4 під'їзди. Візуальний огляд будинку дозволив скласти перелік основних робіт по реконструкції , а саме : реконструкція даху з надбудовою мансардного поверху; облаштування сміттєпроводу і ліфта; заміна комунікацій і прорізів; утеплення стін. Відповідно до обсягів робіт була створена інформаційна модель у вигляді кошторису в програмі АВК-5(3.2.2). Графічні моделі реконструкції житлового будинку у вигляді лінійного графіку будувалися з урахуванням впливу обох факторів згідно з табл. 1, з використанням програми Microsoft Project. Чисельні значення тривалості реконструкції представлені в табл. 1, з якої видно, що реконструкція житлового будинку може тривати від 500 до 800 днів.

Таблиця 1

*План експерименту та вплив варійованих факторів $X_1$ і $X_2$ на показник тривалості реконструкції житлового будинку ($Y_1$), без відселення мешканців*

| № точки | Кодований фактор | | Натурний фактор | | Показник |
|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ – кількість робочих годин на тиждень | $X_2$- коефіцієнт суміщення робіт | $X_1$ - кількість робочих годин на тиждень (год) | $X_2$- коефіцієнт суміщення робіт | $Y_1$ - Тривалість реконструкції, (дн) |
| 1. | -1 | -1 | 40 | 0,15 | 483 |
| 2. | -1 | 0 | 40 | 0,2 | 651 |
| 3. | -1 | 1 | 40 | 0,25 | 821 |
| 4. | -0,2 | -1 | 48 | 0,15 | 402 |
| 5. | -0,2 | 0 | 48 | 0,2 | 542 |
| 6. | -0,2 | 1 | 48 | 0,25 | 673 |
| 7. | 1 | -1 | 60 | 0,15 | 322 |
| 8. | 1 | 0 | 60 | 0,2 | 518 |
| 9. | 1 | 1 | 60 | 0,25 | 547 |

Для дослідження впливу факторів на тривалість реконструкції за допомогою з програми COMPEX була побудована математична модель яка описана аналітичну залежність факторів від тривалості реконструкції за формулою 2 :

$$Y_1 = 538{,}528 - 96{,}0X_1 + 37{,}361X_1^2 - 29{,}638X_1X_2 + 135{,}691X_2 - 30{,}333X_2^2. \quad (2)$$

При: Критерій Fisher = 2.6000

Критерій Fkr = 2.6000

Kzm = 1.000 NSe = 20.853

Аналіз отриманої аналітичної залежності (формула 2) показує, що фактори чинять різний вплив на тривалість реконструкції ($Y_1$) житлового будинку. У програмі COMPEX були отримані графічні зображення залежності впливу факторів на тривалість реконструкції у вигляді одно- та двохфакторних діаграм (рис. 1, 2).

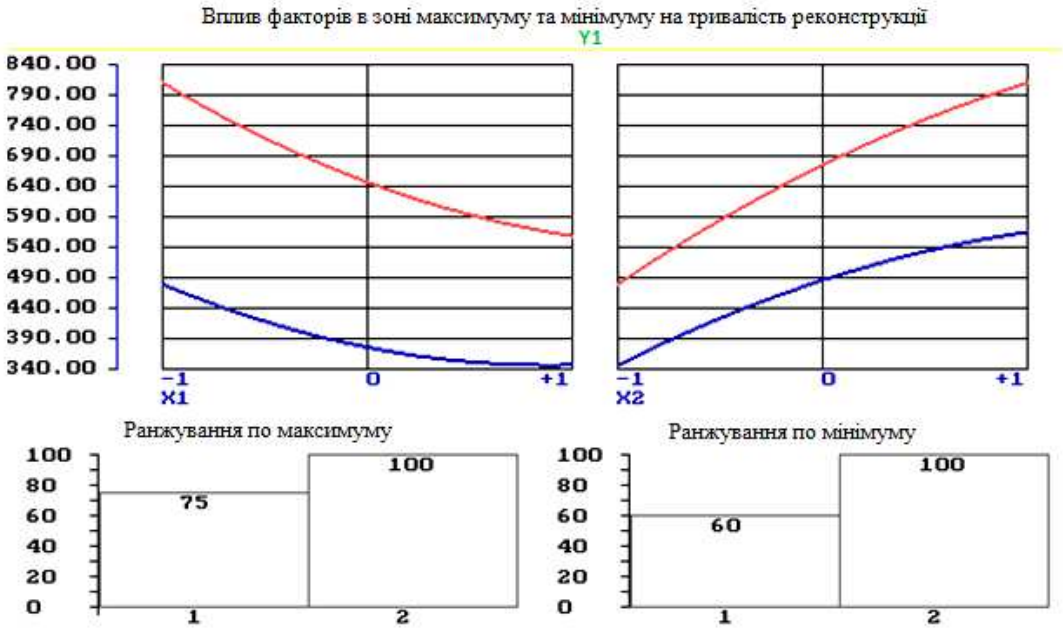



*Рис. 1. Однофакторна діаграма впливу факторів ($X_1$, $X_2$) на тривалість реконструкції житлового будинку ($Y_1$) без відселення мешканців.*

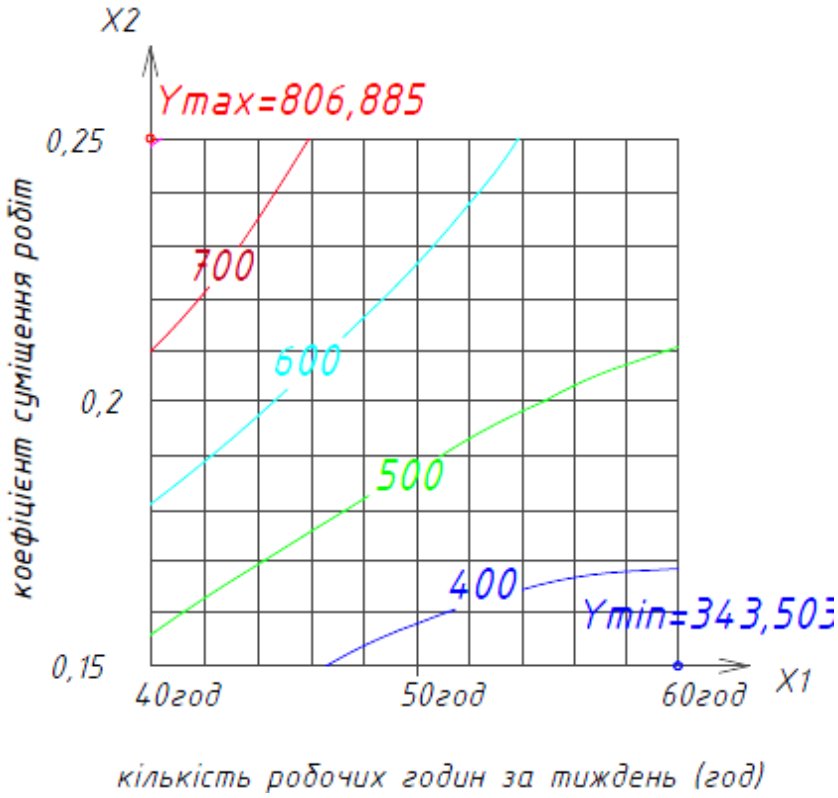



*Рис. 2. Двохфакторна діаграма впливу факторів ($X_1$, $X_2$) на тривалість реконструкції житлового будинку ($Y_1$) без відселення мешканців*

Побудова однофакторних моделей виконана у двох граничних екстремальних варіантах. Верхні криві , при цьому побудовані в площинах (Y, $X_i$), що проходять через точку з максимальним значенням функції Y. У цьому випадку всі інші фактори, фіксуються на рівні мінімального значення показника Y. Криві, у нижній частині графіка побудовані в тих самих площинах, але через точку з мінімальним значенням функції Y.

Аналіз графіків впливу показав, що фактор $X_1$ (кількість робочих годин на тиждень) в зоні мінімальних значень найменш впливає на тривалість реконструкції ($Y_1$). Суттєва зміна фактору $X_1$ спостерігається в діапазоні від -1 до +1 (від 40 до 60 робочих годин на тиждень), тривалість реконструкції зменшується від 480 дн. до 350 дн.

У зоні максимальних значень вплив фактору $X_1$ виражено сильніше. Причому на відрізку $X_1$ від -1 до 0 (від 40 годин до 50 робочих годин на тиждень) тривалість реконструкції ($Y_1$) зменшується вдвічі більше, ніж на відрізку від 0 до +1 (від 50 годин до 60 робочих годин на тиждень).

У зоні мінімальних значень $X_2$ (коефіцієнт суміщення робіт) чинить менший вплив на показник тривалості реконструкції ($Y_1$). При зміні значення фактору $X_2$ від -1 до +1 (коефіцієнт суміщення робіт від 0,15 до 0,25) тривалість збільшується в 1,5 раза більше, ніж на відрізку $X_2$ від 0 до +1 (коефіцієнт суміщення робіт від 0,2 до 0,25). Вплив фактору $X_2$ у зоні максимальних значень виражено сильніше. Так при змінах $X_2$ від -1 до +1 (коефіцієнт суміщення робіт від 0,15 до 0,25) тривалість реконструкції ($Y_1$) збільшується в 1,5 раза швидше, ніж у зоні мінімальних значень..

Діаграми ранжирування (рис. 1) показують, що фактор $X_2$ (коефіцієнт суміщення робіт) має максимальний вплив як в зоні максимуму, так і в зони мінімуму (100%). Фактор $X_1$ (кількість робочих годин на тиждень) впливає менше, причому в зоні максимуму цей вплив найбільше (75 %), а в зоні мінімуму становить 60 %.

Графічне зображення одночасного впливу обох факторів представлено на двохфакторній діаграмі (рис. 2). Зміна тривалості реконструкції житлового будинку зображена ізолініями з кроком 100 дн. На діаграмі видно що тривалість реконструкції коливається в межах 344-807 днів.

Аналіз графічного зображення впливу факторів на тривалість реконструкції при умові проживання мешканців в будинку дозволяє зробити висновок, що проведення реконструкції протягом 1-2 років (365-730 днів) можливе при поєднанні факторів: коефіцієнта суміщення робіт від 0,15 до 0,22 та кількості робочих годин на тиждень від 40 до 60 годин.

**Висновки відповідно до статті.** Уперше були отримані результати впливу організаційно-технологічних факторів на тривалість реконструкції житлових будівель перших масових серій. Результати дослідження показали, що реконструкцію житлової будівлі без відселення мешканців можна провести протягом 344-808 дн. Скорочення тривалості реконструкції до 2 років (до 700 днів) являється ефективним рішенням проведення робіт. Воно може бути досягнуто при одночасному впливі факторів: коефіцієнта суміщення робіт у межах від 0,15 до 0,22 та кількості робочих годин на тиждень від 40 до 60 годин. Аналогічну методику дослідження можна використати для дослідження інших показників реконструкції подібних житлових будинків.

## Список використаних джерел

1. Житловий фонд України у 2010 році: статистичний бюлетень / Державна служба статистики України. Київ, 2011.
2. Диагностика технического состояния жилых зданий / Куркин А. П. и др. Луганск: Янтарь, 2012. 368 с.
3. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. Какие серии домов подлежат сносу в Москве. URL: https://spbnovo.ru/kak/kakie-serii-domov-podlezhat-snosu-v-moskve.html.
4. Современный подход к реконструкции «хрущевок»: Материал предоставлен пресс-службой компании ROCKWOOL Russia – ЗАО «Минеральная Вата». *Журнал СОК*. 2002. № 11. URL: https://www.c-o-k.ru/articles/sovremennyy-podhod-k-rekonstrukcii-hruschevok.
5. TipDoma.com. Серии домов и планировки. Серии домов Украина. URL: https://tipdoma.com/serii-domov-ukraina.
6. LIVEJOURNAL.STROITEL. Хрущевки 26. Серии I-464, 480, 438: веб-сайт. URL: https://stroitel.livejournal.com/471221.html.
7. Информационное агентство «Репортер» «Хрущевки» Одессы: Есть ли будущее у истории? 17.02.2019. URL: http://reporter.com.ua/articles/kd5.
8. Кодекс законів про працю України від 19.09.2019 г. №322-VIII.

## References

1. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [Public service of Ukrainian statistics]. (2011). *Zhytlovyi fond Ukrainy u 2010 rotsi [Housing facilities of Ukraine in 2010]*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Kurkin, A. P., Rozenfeld, M. S., Neverov, A. G., Voloshko, M. N. (2012). *Diagnostika tekhnicheskoho sostoynia zhilykh zdaniy. [Diagnostics of technical conditions of dwellings]*. Luhansk: Yantar [in Russian].
3. *Kompleks gradostroitelnoy politiki i stroitelstva goroda Moskvy. Kakie serii domov podlezhat snosu v Moskve [Complex of town planning policy and building of Moscow. What series of houses are to be demolished?]*. Retrieved from https://spbnovo.ru/kak/kakie-serii-domov-podlezhat-snosu-v-moskve.html.
4. Press-sluzhba kompanii ROCKWOOL Russia-ZAO'Mineralnaya vata' (2002). Sovremennyy podhod k rekonstrukcii hruschevok.[Modern approach to hruschevkas' reconstruction]. *Zurnal Sok*, 11. Retrieved from https://www.c-o-k.ru/articles/sovremennyy-podhod-k-rekonstrukcii-hruschevok.
5. TipDoma.com. *Serii domov i planirovki.Serii domov Ukraina [Houses' series and planning. Houses'series Ukraine]*. Retrieved from https://tipdoma.com/serii-domov-ukraina.
6. LIVEJOURNAL.STROITEL. Xhruschevkas 26. Serii I-464, 480, 438 [Xhruschevkas 26. Series I-464,480,438]. Retrieved from https://stroitel.livejournal.com/471221.html.

7. Informatsionnoe ahenstvo Reporter (2019). *Khruschevki odessy. Est li budushchee u istorii? [Xhruschevkas of Odessa. Does history have future?]*. Retrieved from http://reporter.com.ua/ articles/kd5.
8. Kodeks zakoniv pro pratsyu Ukrainy [Labour Code of Ukraine]. № 322-VIII (19.09.2019).

*UDC 69.059;72.025.5*

*Tatiana Dubelt*

# THE STUDY OF IMPACT OF TECHNOLOGICAL AND ORGANIZATIONAL FACTORS ON THE DURABILITY OF THE RECONSTRUCTION OF THE DWELLINGS

***Urgency of the research.*** *The subject of the investigation is dedicated to the study of capacities of reconstruction of the dwellings of first mass series. Minute quantity of implemented objects of reconstruction and the lack of information in the literature sources does not allow to analyze changes in durability of operations considering the impact of different technological and organizational factors. Pursuance of research allowed to detect zones of efficient technological and organizational solutions that have an impact on reducing of the durability of reconstruction of such objects.*

***Target setting.*** *The study of practical reconstruction of dwelling demands a great amount of funds and this factor does not allow to retrace factors' impact because it represents one model of reconstruction of dwelling.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *The latest publications in public access on reconstruction of such dwellings were studied, the series of dwellings were defined and basic items of work were listed.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *The study and description of impact of technological and organizational factors on the durability of reconstruction.*

***The research objective.*** *Making abstract models of dwellings reconstruction and defining the impact of factors on the durability of operations with the help of computer programs. Defining the areas of efficient solutions by graphic images.*

***The statement of basic materials.*** *Based on the given typical series of dwelling, abstract models of reconstruction were made considering different combination of factors and multiple parameters of operations durability were obtained. Experimental and statistical modeling was carried out, charts of dependencies of factors on durability of construction were made. Multiple limits of definition of factors that have impact on reducing the durability of operations.*

***Conclusions on the article.*** *The results of the study of impact of technological and organizational factors on the durability of the reconstruction of dwellings of first mass series have been obtained for the first time. Graphical image of factors' dependencies on reconstruction durability was obtained that allows to define the combination of factors under which the durability of reconstruction does not exceed the acceptable rate.*

***Keywords:*** *technological and organizational solutions; model of reconstruction; number of working hours per week; coefficient of operations overlapping; areas of efficient solutions.*

*Table: 1. Fig.: 2. References: 8.*

**Дубельт Тетяна Михайлівна** – аспірант кафедри технології будівельного виробництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури (вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65000, Україна).
**Dubelt Tatiana** – PhD student of Chair of Technology of Construction Operations, Odesa State Academy of Building and Architecture (4 Didrichson Str., 65000 Odesa, Ukraine).
**E-mail:** madam.tatiana3009@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-2853-5704

Дубельт Т. Дослідження впливу організаційно-технологічних факторів на тривалість реконструкції житлових будинків. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 315-320.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 624.011*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-321-328*

*Андрій Бідаков, Оксана Пустовойтова, Євген Распопов, Богдан Страшко*

# ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЧИСЕЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ МІЦНОСТІ ВКЛЕЄНИХ СТРИЖНІВ У CLT ПАНЕЛЯХ

***Актуальність теми дослідження.*** *Позитивний досвід використання вклеєних сталевих стрижнів у дерев'яних конструкціях спостерігається протягом тривалого періоду в Східній Європі і вважається за необхідне застосування даного типу з'єднань в панелях з поперечної клеєної деревини (ПКД або CLT).*

***Постановка проблеми.*** *Міцність вклеєних стрижнів на висмикування, які встановлені у поперечному перерізі ПКД або CLT панелі показали нові результати, які важко було передбачити з урахуванням значної практики використання вклеєних стрижнів у цільній та клеєній деревині. ПКД панель є складною багатошаровою системою дошок зі взаємно перпендикулярним їх розташуванням у суміжних шарах, то виникли нові граничні умови для стрижнів, коли вони можуть бути розташованими на межі повздовжньої та поперечної дощок.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Аналіз міцності вклеєних стрижнів на висмикування залежно від положення в поперечному перерізі аналогічно випробуванням, описаним в роботі проф. H. J. Blass при дослідженні міцності гвинтів на висмикування, де місце встановлення гвинтів варіювалося*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Не вирішено питання впливу місця розташування стрижня в поперечному перерізі ПКД панелі на величину його несучої здатності.*

***Постановка завдання.*** *Провести порівняльний аналіз експериментальних досліджень та чисельних розрахунків міцності вклеєних стрижнів у CLT панелях.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Для оцінки достовірності отриманих експериментальних даних виконані аналітичні дослідження в програмному комплексі Ansys для всіх можливих місць розташування стрижнів у поперечному перерізі ПКД панелі, що можуть впливати на величину міцності, з урахуванням пружної моделі анізотропії деревини. Виконані дослідження вказують на те, що небажано виконувати вклеювання стрижнів у крайні дошки, навіть при встановлені групи вклеєних стрижнів, що також потребує додаткових комплексних варіативних експериментальних досліджень для формулювання конструктивних вимог щодо компоновки вузлів на вклеєних стрижнях у ПКД панелях.*

***Висновки відповідно до статті.*** *На основі експериментальних досліджень міцності вклеєних стрижнів у поперечному перерізі ПКД або CLT панелі встановлено зміну міцності залежно від діаметра металевого стрижня та його місця розташування у поперечному перерізі, якому характерно чергування взаємно поперечних шарів дошок.*

***Ключові слова:*** *вклеєні сталеві стрижні; збірні панелі; міцність на висмикування; поперечна клеєна деревина; ПКД; CLT; з'єднання; скінчені елементи; розрахунок; Ansys.*

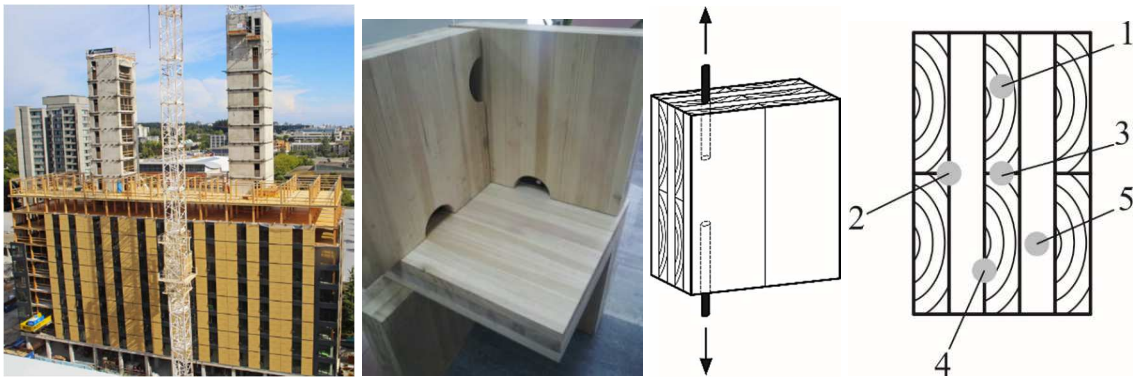
*Рис.: 7. Табл.: 1. Бібл.: 14.*

**Актуальність теми дослідження.** Позитивний досвід використання вклеєних сталевих стрижнів у дерев'яних конструкціях спостерігається протягом тривалого періоду в Східній Європі і вважається за необхідне застосування даного типу з'єднань у панелях із поперечної клеєної деревини (ПКД або CLT). У цій статті показано порівняння результатів випробувань на висмикування вклеєних стрижнів, встановлених у торцевій поверхні ПКД панелей у різних можливих варіантах та результатів чисельних розрахунків. Аналіз міцності вклеєних стрижнів на висмикування залежно від положення в поперечному перерізі аналогічний випробуванням, описаним в роботі [12] проф. H. J. Blass (2007) при дослідженні міцності гвинтів на висмикування, де місце встановлення гвинтів варіювалося.

**Постановка проблеми.** Оскільки ПКД панель є як стіновим, так і елементом перекриття багатоповерхових будівель, то при розробці вузлових з'єднань необхідно враховувати тип з'єднувальних панелей. У Європейських країнах найбільш розповсюдженими є з'єднання на гвинтах, через незначну трудомісткість у порівнянні з вклеєними стрижнями, які мають велику популярність у пострадянських країнах і є більш вигіднішим конструктивним рішенням, ніж використання гвинтів. Для впровадження системи вклеєних стрижнів для з'єднання ПКД панелей запропоновано універсальне з'єднання на вклеєних стрижнях, показане на рис. 1, *б*, для якого були виконані дослідження стрижнів на висмикування (рис. 1, *в*) у п'яти різних характерних точках поперечного перерізу (рис. 1, *г*). Досліджені точки розташування стрижня можуть впливати на величину міцності, що було досліджено на 75 зразках для трьох діаметрів вклеєних стрижнів з однаковою глибиною вклеювання стрижня.

© Бідаков А. М., Пустовойтова О. М., Распопов Є. А., Страшко Б. О., 2020

Розрахунок напружень і деформацій експериментально досліджених зразків з ПКД або CLT виконувались у програмному комплексі ANSYS. При моделюванні зразків дотримувалися всі геометричні параметри та структура ПКД панелі з її технологічними особливостями, а саме склеювання бокових граней дошок та їх взаємно перпендикулярне розташування у суміжних шарах дощок. Відповідно пружні характеристики дошок задавалися з урахуванням напряму волокон, що спостерігається в результатах розрахунків напружень і деформацій. Пружні характеристики деревини зразків із ПКД панелей були прийняті аналогічно досліджень B. Azinovic, E. Serrano [1], та дисертаційної роботи C. Sandhaas [4] для деревини хвойних порід, а саме сосни: модуль пружності вздовж волокон $E_1 = 11000$ МПа, модуль пружності поперек волокон $E_2 = 370$МПа, $E_3 = 370$ МПа, модуль зсуву $G_1 = G_2 = 690$ МПа та $G_2 = 50$МПа, коефіцієнти Пуассона $\nu_1 = 0{,}4$, $\nu_2 = 0{,}4$ та $\nu_3 = 0{,}45$. Пружні характеристики клею також були запозичені з багатьох робіт і мали такі значення: $E = 7000$ МПа, $G = 2600$ МПа, $\nu = 0{,}25$. Пружні характеристики сталі приймалися за сертифікатом, значення яких були підтверджені при перевірочних випробуваннях шпильок.




*а* *б* *в* *г*

*Рис. 1. Багатоповерхова будівля з ПКД панелей та вузол на вклеєних стрижнях і схема виконаних досліджень:*
*а – будівля з ПКД панелей; б – вузол на вклеєних стрижнях;*
*в – схема випробувань; г – досліджені точки вклейки стрижнів*

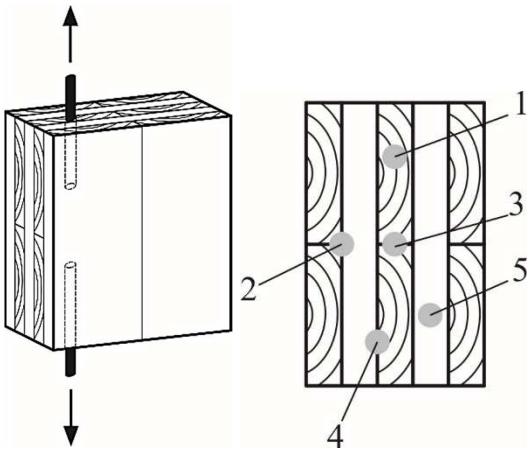
**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Міцність вклеєних стрижнів на висмикування в цільній деревині, ЛВЛ брусі та клеєній деревині досить детально виконані, і лише протягом останніх двох років з'єднання на вклеєних стрижнях почали досліджуватись у ПКД панелях, які є новим будівельним матеріалом для будівництва багатоповерхових житлових будівель. У цій статті розглядається робота тільки одиночних стрижнів при двосторонній симетричній вклейці в зразки. Крім того, міцність на висмикування вклеєних стрижнів необхідна для виконання підсилень різних частин ПКД панелей, а також для посилення вузлових з'єднань. На сьогодні відомі дослідження вклеєних стрижнів у ПКД панелях в дипломній роботі M. Andersen та M. Høier [8], а також у публікаціях B. Azinovic [1; 9; 10].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Питання, розглянуті у цих публікація, не вирішують питання впливу місця розташування стрижня в поперечному перерізі ПКД панелі на величину його несучої здатності.

**Мета статті.** Провести порівняльний аналіз експериментальних досліджень та чисельних розрахунків міцності вклеєних стрижнів у CLT панелях.

**Виклад основного матеріалу.** Розглядається вплив локалізації вклеєного стрижня в поперечному перерізі ПКД панелей на величину максимальної міцності при висмикуванні. Діаметр усіх розглянутих сталевих стрижнів був менше, ніж товщина дощок, на яку припадало 30 мм у зразках ПКД з 5 шарами без зазорів між дошками в шарі й без компенсаційних пропилов в дошках. Глибина вклеювання стрижнів у всіх зразках була

прийнята 100 мм і використовувався двухкомпонентний епоксидний клей. Величина отвору була прийнята на 4 мм більше діаметра вклеюваних сталевих стрижнів. Зміст вологи в деревині становило близько 12 %. Схема випробувань зразків і розташування вклеєних стрижнів показані на рис. 2, де *1* – вздовж волокон в одній дошці; *2* – на межі двох паралельних і однієї перпендикулярної дошки; *3* – на межі двох паралельних дощок, уздовж волокон; *4* – на межі однієї паралельної і однієї перпендикулярної дошки; *5* – перпендикулярно волокон, в одній дошці. Відмінності між зразками були в положеннях вклеєних стрижнів (згідно зі схемою на рис. 2) і діаметрах стрижнів, наведених у таблиці.




*а* *б*

*Рис. 2. Схема навантаження зразків (а) та місця встановлення вклеєних стрижнів (б)*

В якості вклеєних стрижнів використовувалися сталеві шпильки з метричною різьбою М10, М12 і М14 класом міцності 5.8. Метод випробування відповідав вимогам стандарту EN 1382:1999 [13]. Швидкість навантаження була постійною до руйнування і перебувала в інтервалі від 0,5 до 1,5 мм/хв. При проведенні випробувань велика увага приділялася характеру руйнування зразків. Загальна кількість зразків на висмикування було 75. У таблиці показана програма випробувань і параметри для кожної з трьох серій зразків. Для кожної розглянутої точки вклейки стрижнів було випробувано по 5 зразків, відповідно кожного діаметру. Як показано на рис. 2, *б*, були розглянуті всі можливі випадки встановлення стрижнів, які могли б вплинути на отримані результати. Очевидно, великий інтерес представляють результати міцності стрижнів на висмикування, розташованих на лініях склеювання двох суміжних поперечно орієнтованих дощок. Хоча для стрижнів вклеєних поперек волокон схема руйнування і величини міцності дещо відрізняються від результатів, одержуваних за класичною схемою випробувань.

Таблиця

*Програма випробувань*

| Серії зразків | Глибина вклеювання $l_{ad}$ [mm] | Діаметр стрижня d [mm] | Товщина клейового шару e [mm] | Кількість зразків | Номера локацій |
|---|---|---|---|---|---|
| GiR-10 | 100 | 10 | 2 | 25 | 1-5 |
| GiR -12 | 100 | 12 | 2 | 25 | 1-5 |
| GiR -14 | 100 | 14 | 2 | 25 | 1-5 |

На рис. 3 показані результати випробувань зразків різного діаметра вклеєних стрижнів (10, 12 і 14 мм) залежно від номера позиції вклеювання в поперечному перерізі і від величини руйнівного навантаження. Очевидно, що зі збільшенням діаметра стрижня буде збільшуватися і величина міцності, як було показано вище в натуральному вираженні (1).

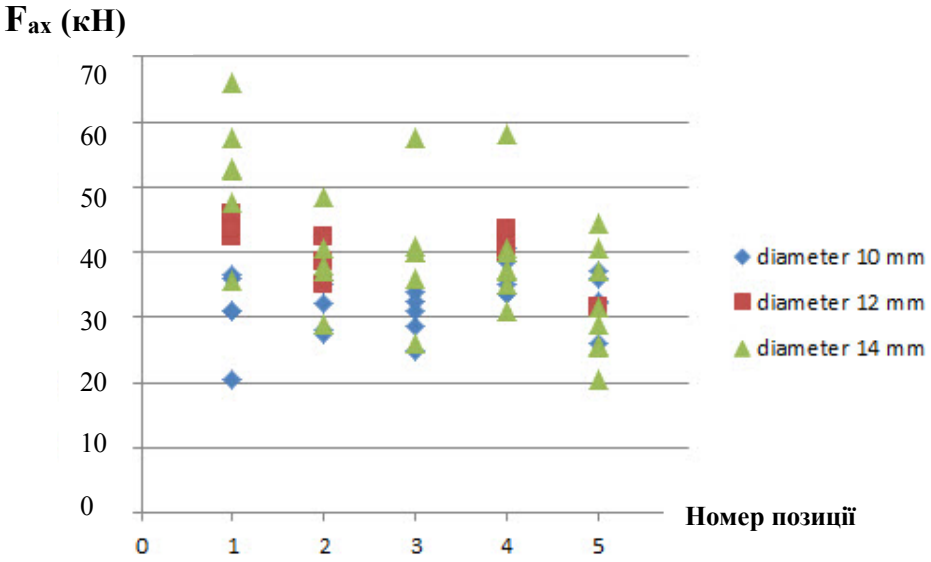



*Рис. 3. Результати випробувань для стрижнів різного діаметра встановлених у поперечному перерізі ПКД*

Найбільша величина деформацій при однаковому рівні навантаження з різними точками локації в поперечному перерізі ПКД, відповідає стрижням встановленим у дошки поперек волокон, що також зазначено в E. Serrano [14]. Крива навантаження-деформація для вклеєних стрижнів встановлених на кордонах поздовжньої і поперечної дощок мали проміжні криві між кривою для стрижнів встановлених уздовж волокон і стрижнів встановлених поперек волокон.

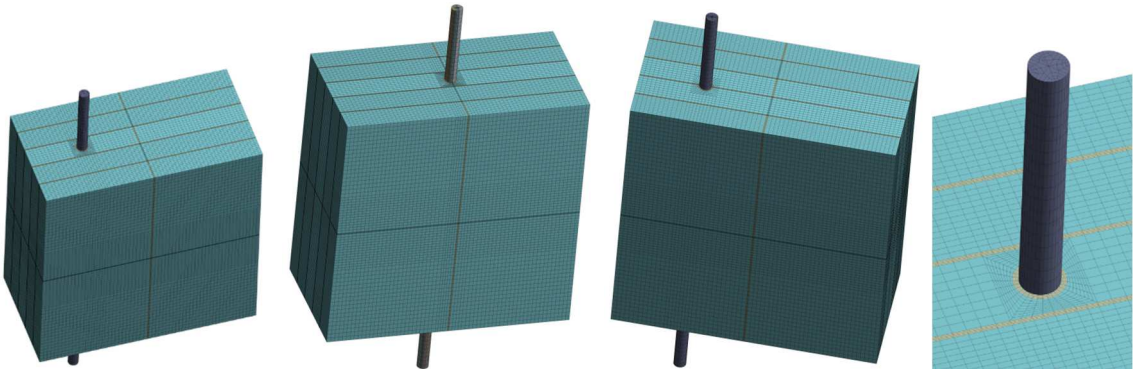
Руйнування стрижнів мало типовий характер для даного виду з'єднання у вигляді сколювання деревини навколо стрижнів як із малим обсягом деревини близьким до клейового шару, так і зі значною частиною деревини конічної форми. На рис. 4 показаний характер руйнування випробуваних зразків із різними варіантами локацій вклеювання стрижня.

*Рис. 4. Характер руйнування зразків*

Отримання кількісних та якісних величин розподілу напружень і деформацій у ПКД панелях при висмикуванні вклеєних стрижнів, що встановлені в різні характерні точки поперечного перерізу панелі. Для досягнення поставленої мети виконані аналітичні розрахункові моделі з використанням об'ємних скінчених елементів та використані пружні характеристики деревини виходячи з анізотропії матеріалу, а саме розглядається трансторопна пружна модель деревини.

Чисельний аналіз виконувався для всіх 5 запропонованих і досліджених місць розташування вклеювання стрижня у поперечному перерізі ПКД панелі. Дані, отримані в результаті розрахунку, залежать від таких параметрів, як розмір сітки і виду її розбиття, тип скінченого елементу тощо. Також важливим аспектом є набір пружних характеристик матеріалів, що входять до складу конструкції, а саме, їх відповідність реальності даної конструкції. Схеми деяких моделей зразків та схема розбиття сітки об'ємних скінчених елементів показано на рис. 5. При створенні моделей та виконанні розрахунків врахову-

вались досліди та методики сформульовані закордонними колегами [2; 3] при дослідженні різних факторів, що впливають на величини міцності з'єднань на вклеєних стрижнях. Також при створенні аналітичної розрахункової моделі з об'ємних скінчених елементів бралася до уваги праця E. Serrano [7; 8] та дипломна робота [5] спеціаліста.

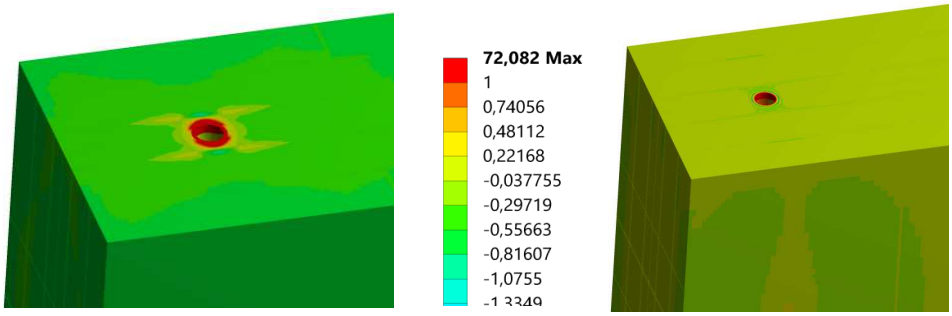


*а* *б* *в* *г*

*Рис. 5. Схеми моделей зразків із різними місцями розташування вклеєних стрижнів та схема розбиття сітки об'ємних скінченних елементів навколо стрижня:*
*а – схема 1 – вздовж волокон в одній дошці; б – схема 3 – на межі двох паралельних дошок; в – схема 4 – на межі паралельної і перпендикулярної дошки; г – схема розбиття сітки біля стрижня*

У розрахунковій моделі балки використовувався восьмивузловий просторовий анізотропний скінчений елемент SOLID 64. Розмір сітки генерувався не автоматично, а з заданими параметрами. Були використані скінченні елементи у вигляді паралелепіпедів зі сторонами 4×2×2 см. У зоні вклеювання стрижнів, на ділянці 30×30 мм виконувалось згущення сітки за радіальними напрямами до центру стрижня (рис. 5, *г*).

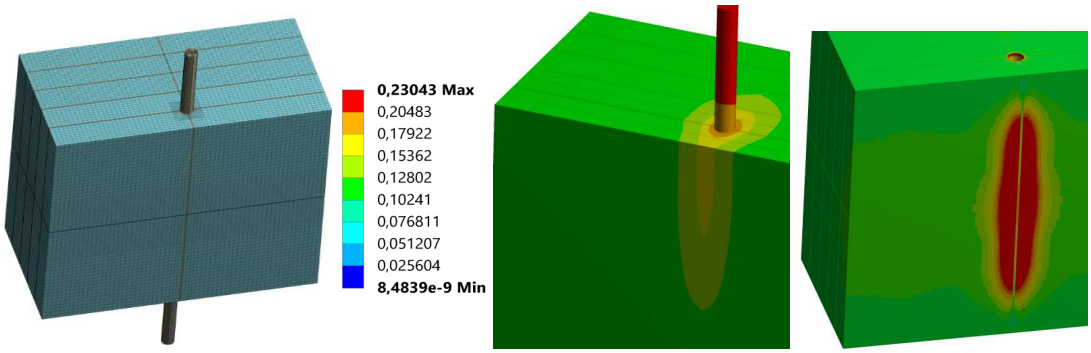
Величина деформації при руйнуванні вклеєних стрижнів у різних матеріалах на основі деревини складає до 2 мм і залежить від такого ряду факторів, як діаметр стрижня, глибина вклеювання та товщина клейового шару. Оскільки руйнування з'єднань на вклеєних стрижнях реалізується при сколюванні деревини вздовж стрижня, (див. розподіл напружень рис. 6), і має крихкий характер, що небажано та можливо його уникати шляхом поперечних підсилень вклеєними стрижнями або гвинтами. Руйнування металевого стрижня не допустиме, тому несуча здатність з'єднання повинна бути меншою, ніж міцність металевого стрижня на розтяг. Деформативність усіх розглянутих стрижнів при випробуваннях відрізнялась на всьому інтервалі навантаження до руйнування становила не більше ніж 10-15 %. Аналогічні дані отримані при аналітичних розрахунках.




*а* *б*

*Рис. 6. Характер розподілу нормальних напружень для зразка з розташуванням вклеєного стрижня за схемою 1:*
*а – нормальні напруження по осі Y; б – нормальні напруження по осі Z*

Для складання технічних рекомендацій, щодо проєктування вузлових з'єднань на вклеєних стрижнях у поперечному перерізі ПКД панелі при навантаженні вздовж осі стрижня, розглядалися додаткові ситуації локації стрижнів, порушуючи вимоги мінімальних відстаней між осями стрижнів та від осі стрижня до бічних граней, які визначені для цього типу з'єднання в клеєній та цільній деревині. Як правило, мінімальні відстані є кратними діаметрам вклеєних стрижнів або діаметрам отворів у деревині, та становлять від 2 до 5 діаметрів залежно від матеріалу на основі деревини (цільна деревина, клеєна деревина, ЛВЛ брус). На рис. 7 показано випадок близького розташування стрижня до бічної грані ПКД панелі та напруження які виникають у такому випадку.




*а* *б* *в*

*Рис. 7. Розподіл напружень і деформацій для стрижня, розташованого близько до бічної грані:*
*а – геометрична модель; б – розподіл деформацій; в – нормальні напруження по осі Z*

Аналіз розподілу напружень для стрижнів, встановлених у крайні дошки, є важливим питанням, оскільки розподіл напружень у поперечному перерізі ПКД панелі значно залежить від напряму дошок, в які вклеєний стрижень та товщини дошок суміжних поперечних шарів. Виконані дослідження вказують на те, що небажано виконувати вклеювання стрижнів у крайні дошки, навіть при встановленні групи вклеєних стрижнів, що також потребує додаткових комплексних варіативних експериментальних досліджень для формулювання конструктивних вимог щодо компонування вузлів на вклеєних стрижнях у ПКД панелях.

**Висновки відповідно до статті.** На основі експериментальних досліджень міцності вклеєних стрижнів у поперечному перерізі ПКД або CLT панелі [11] встановлено зміну міцності залежно від діаметра металевого стрижня та його місця розташування у поперечному перерізі, якому характерно чергування взаємно поперечних шарів дощок. Різниця між результатами, отриманими при випробуваннях натурних моделей зразків ПКД панелей із вклеєними стрижнями, і результатами отриманими в програмному комплексі ANSYS, не перевищують 13 %, що показує високу збіжність даних для дерев'яних конструкцій і підтверджує правильність обраної розрахункової моделі. Така висока збіжність між експериментальними та аналітичними розрахунковими даними дає можливість використовувати розрахункові комплекси для оцінки несучої здатності та деформативності вклеєних стрижнів. Для впровадження вклеєних стрижнів у вузлових з'єднаннях ПКД панелей необхідно виконання досліджень міцності групи вклеєних стрижнів і відповідно розробка рекомендацій про мінімальні відстані між стрижнями і від стрижнів до граней поперечного перерізу ПКД.

**Список використаних джерел**

1. Azinović B. "Glued-in rods in CLT". Short Term Scientific Mission (STSM) Report. COST Action FP1402: Basis of Structural Timber Design – from research to standards. 2018. 40 p.
2. Stepinac M., Bidakov A., Jockwer R., Rajcic V. Review and evaluation of design approaches for glued-in rods in East and West Europe. *World Conference on Timber Engineering*, August 20–23. Seoul, Republic of Korea. 2018.

3. Stepinac, M., Hunger, F., Tomasi, R., Serrano, E., Rajcic, V. & van de Kuilen, J. Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in European standards. Vancouver: International Council for Research and Innovation in Building and Construction. 2013.
4. Sandhaas C. Mechanical behavior of timber joints with slotted-in steel plates. Dissertation, University of Technology Delft, The Netherlands, 2012.
5. Feldt P., Thelin A. Gluer-in rods in timber structures. Finite element analyses of adhesive failure. Master's thesis in structural engineering. Department of architectural and civil engineering, Charmels university of technology, Gothenburg, Sweden, 2018.
6. Serrano E. Adhesive joints in timber engineering – modelling and testing of fracture properties. Doctoral Thesis, Department of Mechanics and Materials, Structural Mechanics, Lund University, Sweden, 2000. 193 p.
7. Serrano E. Glued-in rods for timber structuresa 3D model and finite element parameter studies. *Int J Adhes Adhes*. 2001. 21(2). P. 115–127.
8. M. Andersen, M. Høier, Glued-in Rods in Cross Laminated Timber, Master's Thesis, Aarhus University, 2016.
9. B. Azinovic´, E. Serrano, M. Kramar, T. Pazlar, Experimental investigation of the axial strength of glued-in rods in cross laminated timber, Mater. Struct. 51 (2018). DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-018-1268-y.
10. Azinovic´ B., Danielson H., Serrano E., Kramar M. Glued-in rods in cross laminated timber – Numerical simulations and parametric studies. *Construction and building materials*/ 2019. Vol. 212-Jul 10.
11. Bidakov A., Raspopov I., Strashko B. Withdrawal resistance of glued-in steel rods by pull-pull tests in CLT. Proceedings of the 1st *Eastern Europe Conference on Timber Constructions*. Kharkiv, 2018. P. 87–97.
12. Uibel, T., Blaß, H. J. Edge joints with dowel type fasteners in cross laminated timber. In *Proceedings, CIB-W18 Meeting 2007*, Bled, Slovenia, 2007. P. 40-7-2.
13. EN1382 (1999) Timber structures—test methods—withdrawal capacity of timber fasteners.
14. Serrano E. Glued-in rods for timber structures – An experimental study of softening behaviour. *Materials and Structures*, Vol. 34, May 2001. P. 228–234.

## References

1. Azinović, B. (2018). Glued-in rods in CLT". Short Term Scientific Mission (STSM) Report. COST Action FP1402: Basis of Structural Timber Design – from research to standards.
2. Stepinac, M., Bidakov, A., Jockwer, R., Rajcic, V. (2018). Review and evaluation of design approaches for glued-in rods in East and West Europe. *World Conference on Timber Engineering* (August 20-23, 2018). Seoul, Republic of Korea.
3. Stepinac, M., Hunger, F., Tomasi, R., Serrano, E., Rajcic, V. & van de Kuilen, J. (2013). Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in European standards, Vancouver: International Council for Research and Innovation in Building and Construction.
4. Sandhaas, C. (2012). Mechanical behavior of timber joints with slotted-in steel plates. Dissertation, University of Technology Delft, The Netherlands.
5. Feldt, P., Thelin, A. (2018). Gluer-in rods in timber structures. Finite element analyses of adhesive failure. Master's thesis in structural engineering. Department of architectural and civil engineering, Charmels university of technology, Gothenburg, Sweden.
6. Serrano, E. (2000). Adhesive joints in timber engineering – modelling and testing of fracture properties. Doctoral Thesis, Department of Mechanics and Materials, Structural Mechanics, Lund University, Sweden.
7. Serrano, E. (2001). Glued-in rods for timber structuresa 3D model and finite element parameter studies. *Int J Adhes Adhes,* 21(2), 115–127.
8. Andersen, M., Høier, M. (2016). Glued-in Rods in Cross Laminated Timber, Master's Thesis, Aarhus University.
9. Azinovic´, B., Serrano, E., Kramar, M., Pazlar, T. (2018). Experimental investigation of the axial strength of glued-in rods in cross laminated timber. *Mater. Struct.* 51, Retrieved from https://doi.org/10.1617/s11527-018-1268-y.
10. Azinovic´ B., Danielson H., Serrano E., Kramar M. (2019). Glued-in rods in cross laminated timber – Numerical simulations and parametric studies. *Construction and building materials*, 212-Jul 10.

11. Bidakov, A., Raspopov, I., Strashko, B. (2018). Withdrawal resistance of glued-in steel rods by pull-pull tests in CLT. Proceedings of the *1st Eastern Europe Conference on Timber Constructions* (pp. 87-97). Kharkiv.

12. Uibel, T., Blaß, H. J. (2007). Edge joints with dowel type fasteners in cross laminated timber. In *Proceedings CIB-W18 Meeting 2007.* Bled, Slovenia, 40-7-2.

13. EN1382 (1999). Timber structures—test methods—withdrawal capacity of timber fasteners.

14. Serrano, E. (May 2001). Glued-in rods for timber structures – An experimental study of softening behaviour. *Materials and Structures*, 34, 228–234.

*UDC 624.011*

*Andrii Bidakov, Oksana Pustovoitova, Ievgenii Raspopov, Bogdan Strashko*

# COMPARATIVE ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESEARCH AND NUMERICAL CALCULATIONS OF GLUED-IN STEEL RODS STRENGTH IN CLT PANELS

***Urgency of the research.*** *Positive experience in the use of glued steel rods in wooden structures is observed for a long period in Eastern Europe and is considered necessary for the use of this type of joints in panels of cross-glued wood (PKD or CLT).*

***Target setting.*** *The strength of the glued pull-out rods installed in the cross section of the PKD or CLT panel showed new results that were difficult to predict given the considerable practice of using the glued rods in solid and glued wood. PKD panel is a complex multilayer system of boards with mutually perpendicular to their location in adjacent layers, new boundary conditions have arisen for the rods, when they can be located on the border of longitudinal and transverse boards.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *The analysis of the strength of glued pull-out bars depending on the position in cross-section is similar to the tests described in the work of Prof. H. J. Blass in the study of the strength of the screws to pull, where the location of the screws varied*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *The influence of the location of the rod in the cross section of the PKD panel on the value of its bearing capacity is not resolved.*

***The purpose of the article.*** *To perform a comparative analysis of experimental studies and numerical calculations of the strength of the glued rods in CLT panels.*

***The presentation of the main material.*** *In order to evaluate the reliability of the experimental data obtained, analytical studies were performed in the Ansys software for all possible locations of rods in the cross section of the panel of the panel, which may affect the strength values, taking into account the elastic model of wood anisotropy. The performed studies indicate that it is undesirable to adhere the rods to the end boards, even with the installed groups of glued rods, which also requires additional complex variational experimental studies to formulate design requirements for the arrangement of the nodes on the glued rods in the PKD panels.*

***Conclusions and suggestion.*** *Based on experimental studies of the strength of the glued rods in the cross section of the PKD or CLT panel, the change in strength depending on the diameter of the metal rod and its location in the cross section, which is characterized by alternation of mutually transverse layers of boards.*

***Keywords:*** *glued-in steel rods; prefabricated panels; shear strength; cross laminated timber; CLT; connections; finite element modeling; calculation; Ansys software.*

**Бідаков Андрій Миколайович –** кандидат технічний наук, доцент кафедри будівельні конструкції Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова (вул. Бажанова, 26, м. Харків, 61000, Україна).
**Bidakov Andrii –** PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Building Construction Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy (26 Bazhanova Str., 61000 Kharkiv, Ukraine).
**E-mail:** bidakov@kname.edu.ua
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6394-2247

**Пустовойтова Оксана Михайлівна** – кандидат технічний наук, доцент кафедри будівельні конструкції Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова (вул. Бажанова, 26, м. Харків, 61000, Україна).
**Pustovoitova Oksana** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Building Construction Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy (26 Bazhanova Str., 61000 Kharkiv, Ukraine).
**E-mail:** oksana_pustov@ukr.net
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4078-4834

**Распопов Євген Анатолійович** – аспірант кафедри будівельні конструкції Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова (вул. Бажанова, 26, м. Харків, 61000, Україна).
**Raspopov Ievgenii –** PhD student of Building Construction Departmen, O. M. Beketov National University of Urban Economy (26 Bazhanova Str., 61000 Kharkiv, Ukraine).
**E-mail:** raspopovkm@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5084-5533

**Страшко Богдан Олександрович –** аспірант кафедри будівельні конструкції Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова (вул. Бажанова, 26, м. Харків, 61000, Україна).
**Strashko Bogdan** – PhD student of Building Construction Department, O. M. Beketov National University of Urban Economy (26 Bazhanova Str., 61000 Kharkiv, Ukraine).
**E-mail:** bogdanstrashko@outlook.com

Бідаков А., Пустовойтова О., Распопов Є., Страшко Б. Порівняльний аналіз експериментальних досліджень та чисельних розрахунків міцності вклеєних стрижнів у CLT панелях. *Технічні науки та технології.* 2020. № 1 (19). С. 321-328.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 624 057 (477.51)*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-329-336*

*Володимир Іванишин, Віктор Бугай, Микола Корзаченко*

# ВИВЧЕННЯ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВ ДІЛЯНКИ ПІД БУДІВНИЦТВО ДВОПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ МАГАЗИНУ КВІТІВ НА ПАЛЬОВОМУ ФУНДАМЕНТІ НА ВУЛИЦІ НЕЗАЛЕЖНОСТІ

***Актуальність теми дослідження.*** *Інженерно-геологічні дослідження під будівництво будь-якого об'єкта є обов'язкові, а тому завжди актуальні.*

***Постановка проблеми.*** *Територія Чернігова вкрита четвертинними відкладами. Їх товщина, літологія часто змінюється на площі та в розрізі, що є негативним фактором при будівництві різних об'єктів. Тому перед початком будівництва цих об'єктів потрібно детально вивчати інженерно-геологічні умови відповідних ділянок для забезпечення стійкості збудованих будівель чи споруд.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Публікації по темі статті відсутні.*

***Виділення недослідженої частини загальної проблеми.*** *Недостатньо вирішеною складною проблемою на території Чернігівської області та Чернігова є поширення, товщини та літологія четвертинних відкладів.*

***Постановка завдання.*** *Детальне дослідження інженерно-геологічних умов ділянки під будівництво двоповерхової будівлі магазину квітів на пальовому фундаменті на вулиці Незалежності в ІІІ мікрорайоні житлового масиву «Масани».*

***Виклад основного матеріалу.*** *Досліджувана ділянка за результатами вивченої геоморфології знаходиться на Чернігівсько-Городнянській морено-зандровій рівнині в приводороздільній частині рік Стрижень та Білоус, яка відноситься до басейну р. Білоус. За тектонічною схемою – це північно-західна частина Дніпровсько-Донецької западини. Рельєф ділянки полого рівнинний з нахилом на південь і абсолютними відмітками поверхні землі від 142 до 143,4 м. Ділянка є найнижчою на території мікрорайону. Через неї відбувається поверхневий стік. Інженерно-геологічна модель її будови ґрунтується на геологічних розрізах 1-1' – 4-4', в яких виділені інженерно-геологічні елементи (ІГЕ) І – XVI. Геологічний розріз до глибини 15 м представлений сучасними техногенними, верхньочетвертинними, середньочетвертинними і неогеновими відкладами. Ґрунтові води безнапірного типу знаходяться на глибинах 1,5–1,6 м.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Товща відкладів на ділянці неоднорідна. У ній виділено 12 інженерно-геологічних елементів. У багатоводні періоди рівень ґрунтових вод може піднятися до денної поверхні, тому потрібно передбачити гідроізоляцію фундаментів і підлог підвалів, регулювання поверхневого стоку. Вода неагресивна.*

***Ключові слова:*** *відклади; ґрунти; горизонти; інженерно-геологічні елементи; свердловина; статичне зондування; ґрунтові води.*

*Рис.: 7. Бібл.: 5.*

**Актуальність теми дослідження.** Інженерно-геологічні дослідження під будівництво будь-якого об'єкта є обов'язкові, а тому завжди актуальні.

**Постановка проблеми.** Територія Чернігова вкрита четвертинними відкладами. Їх товщина, літологія часто змінюється на площі та в розрізі, що є негативним фактором при будівництві різних об'єктів. Тому перед початком будівництва цих об'єктів потрібно детально вивчати інженерно-геологічні умови відповідних ділянок для забезпечення стійкості збудованих будівель чи споруд.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Публікації по темі статті відсутні.

**Виділення недослідженої раніше частини загальної проблеми.** Недостатньо вирішеною складною проблемою на території Чернігівської області та Чернігова є поширення, товщини та літологія четвертинних відкладів.

**Постановка завдання.** Детальне дослідження інженерно-геологічних умов ділянки під будівництво двоповерхової будівлі магазину квітів на пальовому фундаменті на вулиці Незалежності в ІІІ мікрорайоні житлового масиву «Масани».

**Виклад основного матеріалу.** Ділянка, на якій проводилися інженерно-геологічні дослідження ЗАТ «Чернігівбудрозвідування», знаходиться в північній частині м. Чернігова, на вулиці Незалежності в ІІІ мікрорайоні житлового масиву «Масани». Завданням виконуваних робіт було вивчення геологічних умов ділянки для проєкту будівництва двоповерхової будівлі магазину квітів на пальовому фундаменті. Винесення в натуру геологічних виробок та точок проведення дослідних робіт виконувалося на основі топографічного плану масштабу 1:500 та генерального плану масштабу 1:1000 мірною рулеткою та теодолітом (рис. 1).

© Іванишин В. А., Бугай В. Г., Корзаченко М. М., 2020

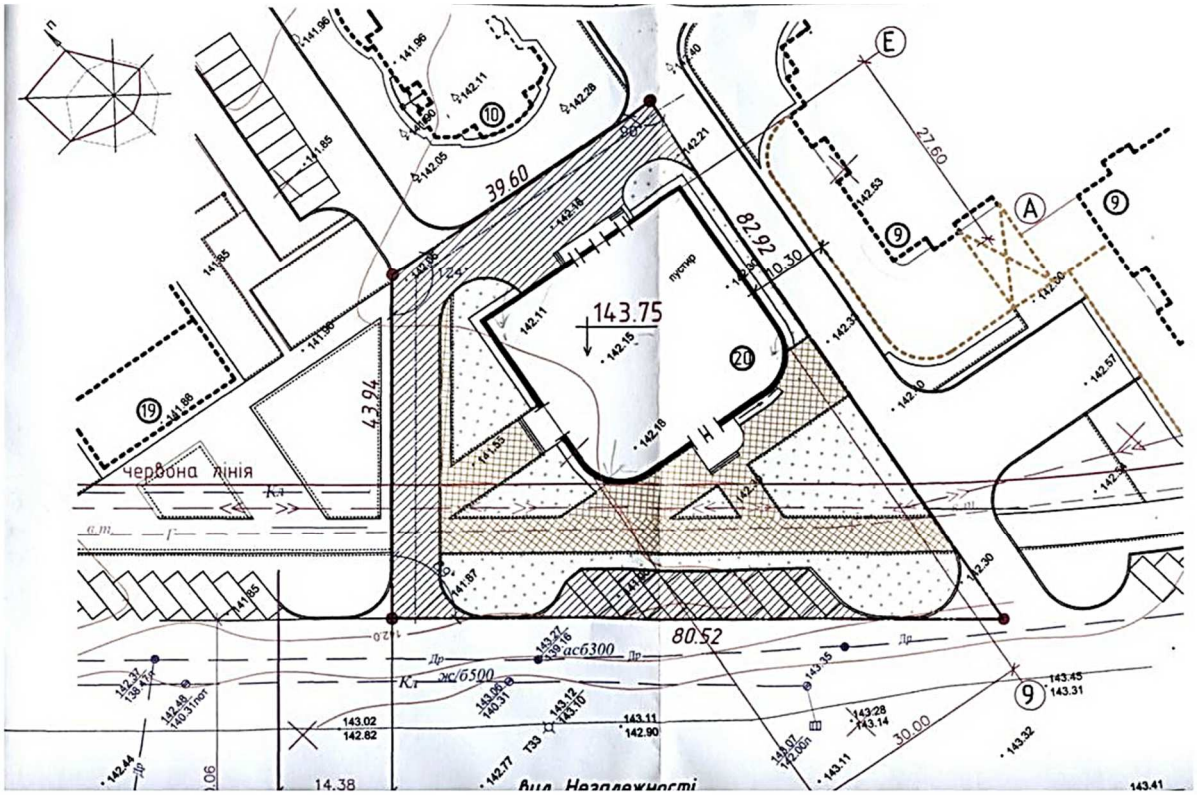



*Рис. 1. Схема генерального плану*

При виконанні робіт враховані результати інженерно-геологічних досліджень, які проводилися на цій ділянці у 2008 році при інженерно-геологічних вишукуваннях для обґрунтування проєкту будівництва кварталу багатократних житлових будинків на пальових фундаментах у мікрорайоні «Масани».

Інженерно-геологічні вишукування на стадії технічного проєкту забудови III мікрорайону за генеральним планом №1 виконані Чернігівським відділом комплексних вишукувань «УкрГИИНТИЗ» у 1990 році. Під час цих досліджень територія мікрорайону була розбурена за сіткою 100×100 м, виконано статичне зондування ґрунтів за сіткою 100×50 м і радіокаротажні роботи за сіткою 100×200 м.

Крім цього, у чотирьох точках виконані штамподосліди, в трьох – дослідження еталонними палями, геодезичні роботи (вертикальне електричне зондування, виміри питомого електричного опору ґрунтів, дослідження наявності блукаючих струмів «земля-земля») тощо.

У 1992 році на території, складовою якої є ділянка під магазин квітів, виконувалися інженерно-геологічні вишукування для робочої документації забудови I та II містобудівних комплексів мікрорайону за генеральним планом № 1.

Вишукування проведені державним підприємством «Чернгігівбудрозвідування», яке було створено на базі відділу комплексних вишукувань УкрГИИНТИЗу. Під час цих вишукувань безпосередньо на досліджуваній ділянці та поблизу неї пробурено 5 свердловин і розміщено 3 точки статичного зондування. Свердловина 768 пробурена в центральній частині ділянки, а свердловина 769 за 10 м від неї, точка статичного зондування (ТСЗ) 669 – на краю північної частини ділянки.

Усього пробурено 31 свердловину, пройдено 2 шари для відбору монолітів ґрунтів, здійснено статичне зондування в 38 точках, радіоактивний каротаж у 19 свердловинах, 12 досліджень ґрунтів статичною палею, 11 досліджень статичним навантаженням на штамп.

Результати раніше виконаних робіт на ділянці та поблизу неї використані при вишукуваннях 2012 р. Згідно з [1; 2] додатково виконано статичне зондування ґрунтів у чотирьох точках.

За геоморфологічними ознаками досліджувана ділянка розташована на Чернігівсько-Городнянській моренно-зандровій рівнині в приводороздільній частині рік Стрижень та Білоус і належать до басейну р. Білоус.

Рельєф ділянки полого-рівнинний із загальним нахилом на південь та абсолютними відмітками поверхні землі від 142 до 143,4 м. Вона є найнижчою на території мікрорайону. Через неї формується поверхневий стік. Під час вишукувань ділянка була не забудована. У південній частині підсипана насипними ґрунтами на висоту 1,2 м. Глибина промерзання ґрунту становить до 1,5 м.

За тектонічною схемою Дніпровсько-Донецької западини ділянки знаходиться в її північно-західній частині.

Інженерно-геологічна будова ділянки ґрунтується на геологічних розрізах 1-1' – 4-4' (рис. 2-5) та результатах статичного зондування (рис. 6).

В геологічних розрізах виділені інженерно-геологічні елементи (ІГЕ) I – XVI на основі номенклатурного виду ґрунтів з урахуванням результатів лабораторних досліджень, статичного зондування та вишукувань минулих років.

Вивчений геологічний розріз до глибини 15 м складений насипним ґрунтом нерівномірної щільності з вмістом будівельного сміття; ґрунтово-рослинним шаром загальною товщиною до 1,2 м; верхньочетвертинними еоло-делювіальними пилуватими пісками та супісками причорноморського горизонту (ІГЕ I); еоло-делювіальними ґрунтами бузького горизонту (ІГЕ V); елювіальними відкладами прилуцького горизонту (ІГЕ VII); середньочетвертинними флювіогляціальними суглинками дніпровського горизонту напівтвердої та тугопластичної консистенції (ІГЕ X-XI); супісками озерно-льодовиковими пластичними (ІГЕ XII) та суглинками напівтвердими (ІГЕ XIII); суглинками твердими з прошарками глини (ІГЕ XV).

Неоген представлений глинами твердої консистенції (ІГЕ XVI).

Виділення інженерно-геологічних елементів (ІГЕ) здійснено згідно [3] та перевірено на підставі оцінки просторової змінності меж та числа пластичності, ступеня вологості та коефіцієнтів щільності, механічних властивостей, що були визначені під час результатів статичного зондування на цьому етапі робіт, представлено в зведеній інженерно-геологічній колонці з таблицею нормативних та розрахункових значень показників властивостей ґрунтів (рис. 7).

Інженерно-геологічні елементи відповідають літологічним горизонтам.

Частина ґрунтів (верства, 8) знаходиться в текучому стані. Для них механічні властивості зменшені порівняно з даними раніше виконаних досліджень.

Ґрунтові води на ділянці безнапірні, знаходяться на глибині 1,5–1,6 м. Потік цих вод направлений з півночі на південь. Ділянка відноситься до підтоплюваних та затоплюваних при значних атмосферних опадах і при сніготаненні. Підтоплення можливе і при витоках із гідрокомунікацій.

Згідно з [4] та посібника до них [5] вода для всіх марок бетонів і цементів, а також до арматури залізобетонних конструкцій неагресивна.

Тип ґрунтових вод гідрокарбонатний, кальцієвий. Можливі зміни за рахунок витоків з каналізації.

За результатами вивчення інженерно-геологічних умов ділянки можна прогнозувати, що під час її забудови, асфальтування істотно зменшиться природне випаровування, яке становить близько 520 мм за рік. Через це виникне надлишок вологи, що може спричинити підняття рівня ґрунтових вод, зумовити зміну консистенції глибинних порід і погіршення їх механічних властивостей. Ці обставини вимагають облаштування водовідведення, гідроізоляції фундаментів та підвалин.

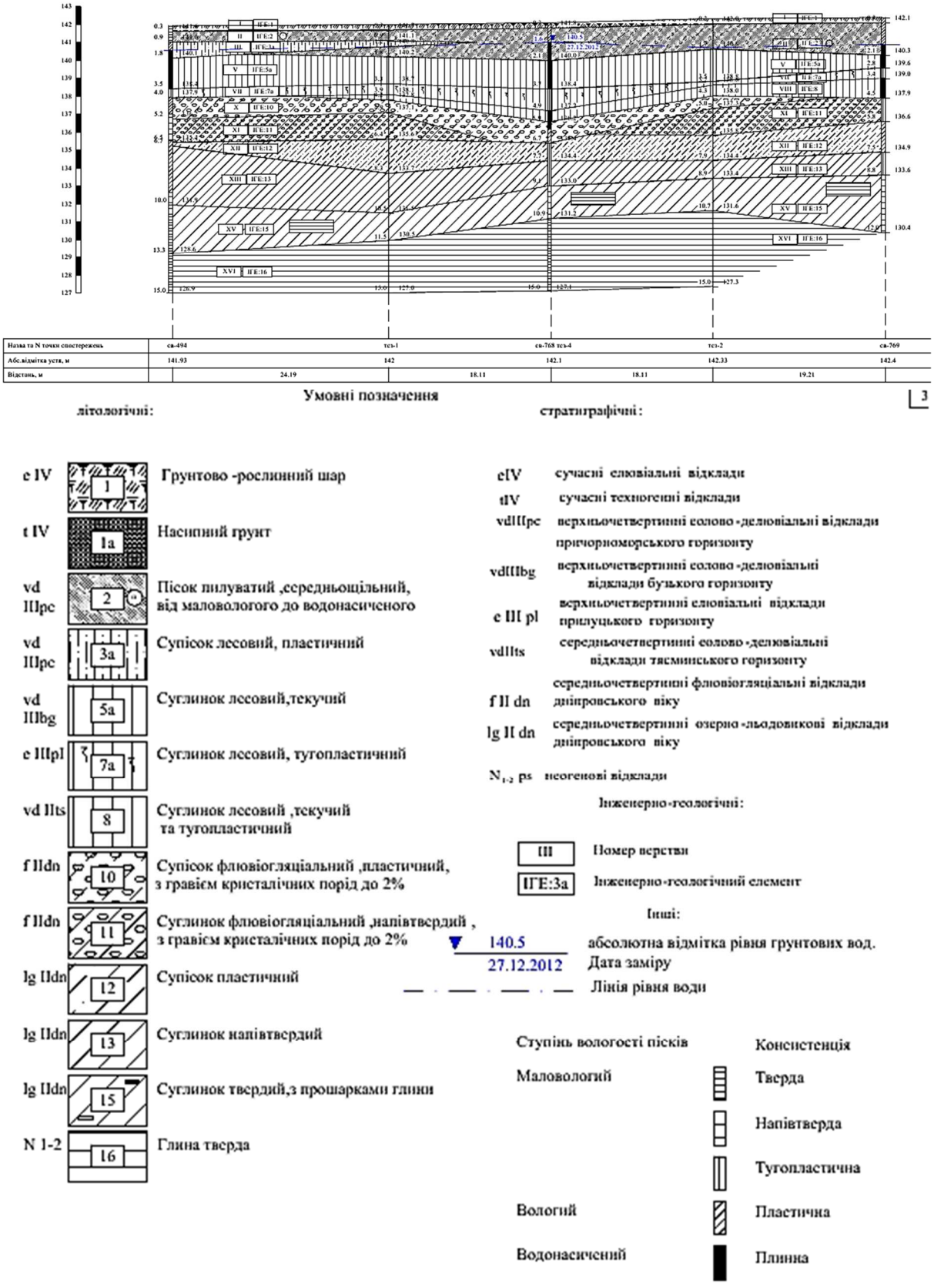



*Рис. 2. Інженерно-геологічний розріз I-I'' з умовними позначеннями*

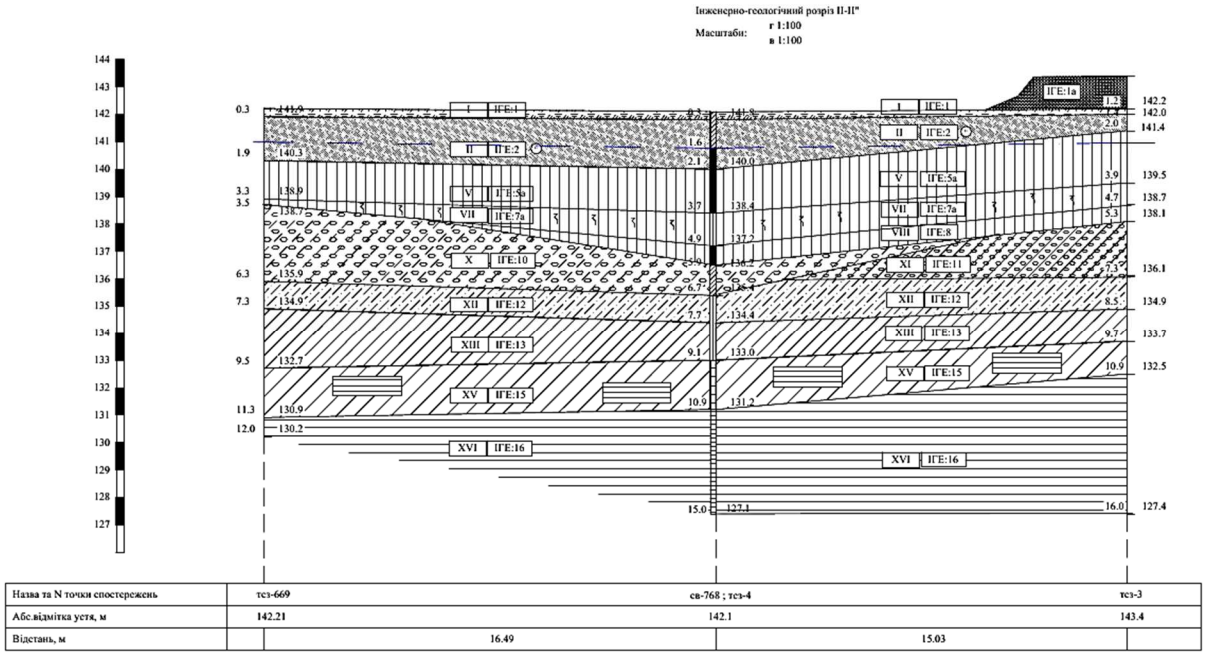



*Рис. 3. Інженерно-геологічний розріз II-II"*

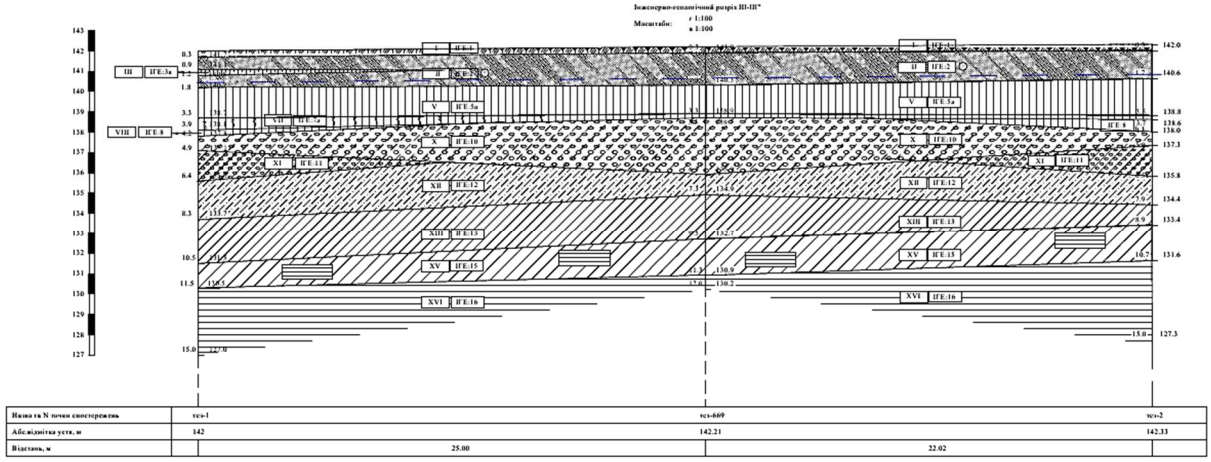



*Рис. 4. Інженерно-геологічний розріз III-III"*

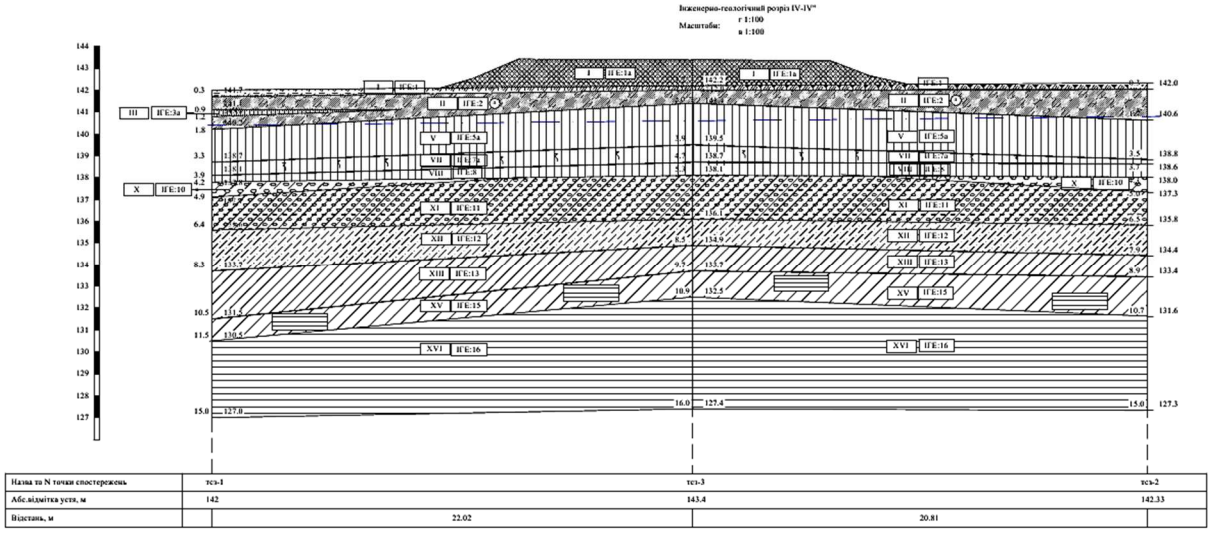



*Рис. 5. Інженерно-геологічний розріз IV-IV"*

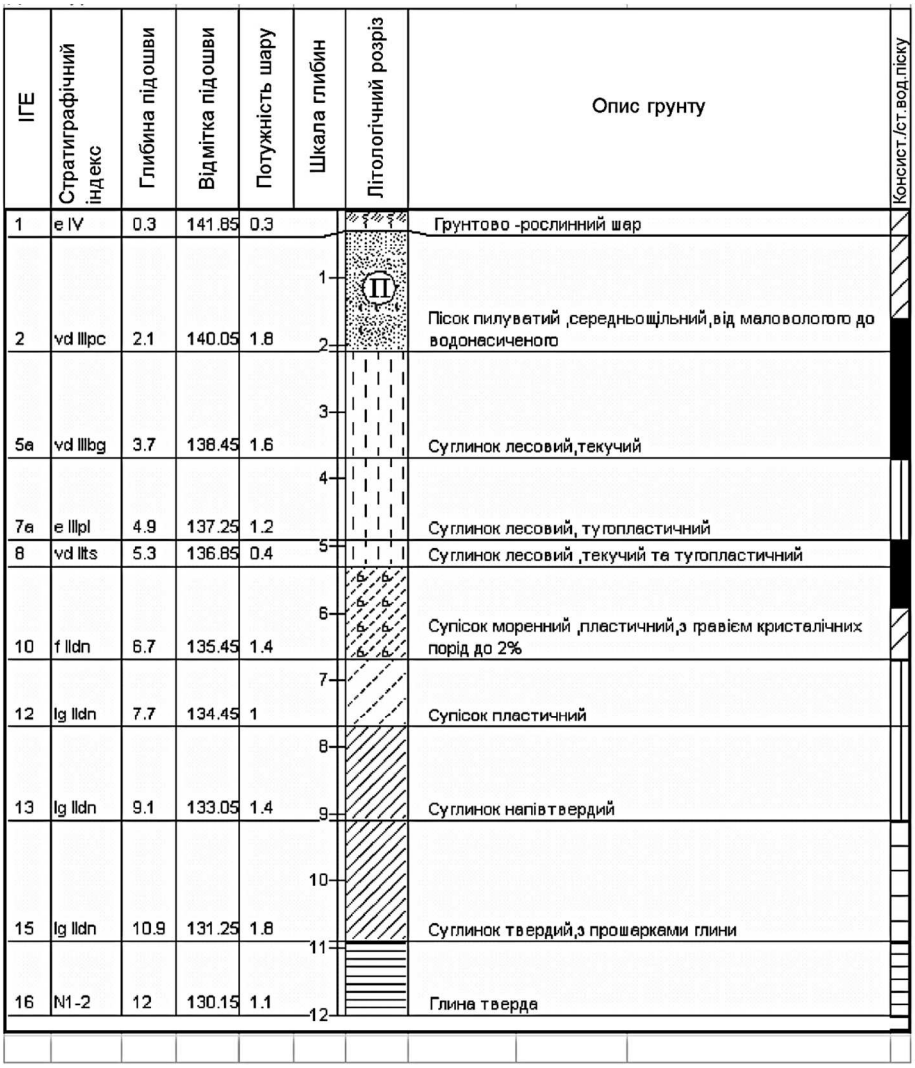



*Рис. 6. Інженерно-літологічна колонка свердловини №768*

| Індекс генезису і віку грунту | Літологічний розріз, номер верстви та інженерно-геологічного елементу | Назва грунту (згідно з ГОСТ 25100-82 ДСТУ Б.В.2.1-2-96) | Нормативні значення: Природна вологість W | Границя текучості $W_L$ | Границя розкочування $W_p$ | Число пластичності $I_p$ | Показник консистенції $I_L$ | Щільність часток грунту $\rho_s$ | Щільність грунту $\rho$ | Щільність сухого грунту $\rho_d$ | Пористість n | Коефіцієнт пористості e | Ступінь вологості S, | Вологоємність повна $W_{вол}$ | Кут внутрішнього тертя $\varphi^n$ | Питоме зчеплення $c^n$ | Модуль деформації $E_{мод}$ | Розрахункові значення: Щільність $\rho^{II}$ | Кут внутрішнього тертя $\varphi^{II}$ | $\varphi^{I}$ | Питоме зчеплення $c^{II}$ | $c^{I}$ | Умовний розрахунковий тиск $R_0$ | Початковий просадочний тиск S | Відносна просадка при P=3,0 кг S | №№ пунктів ДБН В.2.1-10-2009 в залежності від трудності розробки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Долі одиниці | | | | | г/см³ | | | Долі одиниці | | | | град. | кПа | мПа | кН/м³ | град | | кПа | | | % | | |
| tIV | 1a I | Насипний грунт: грунт з будівельним сміттям | | | | | | | | | | | | | | | | 14,0 | | | | | | | | 9В |
| eIV | 1 I | грунтово-рослинний шар | 0,14 | | | | | 2,66 | 1,91 | 1,68 | 0,37 | 0,590 | 0,62 | | | | | 19,1±0,6 | | | | | | | | 9А |
| vdIIIpcII | 2 II | пісок пилуватий, середньощільний | 0,13 | | | | | 2,66 | 1,83 | 1,62 | 0,39 | 0,640 | 0,54 | 0,24 | 29 | 3 | 23 | 18,3±1,0 | 29 | 26 | 3 | 2 | 100 | | | 29А |
| vdIIIpcIII | 3a III | супісок лесовий,пластичний | 0,21 | 0,24 | 0,18 | 0,06 | 0,50 | 2,68 | 1,74 | 1,44 | 0,46 | 1,00 | 0,57 | 0,37 | 18 | 5 | 10/3 | 17,4±1,0 | 17 | 17 | 4 | 3 | 165 | 70 | 7,0 | 36Б |
| vdIIIbg | 5a V | суглинок лесовий,текучий | 0,31 | 0,31 | 0,20 | 0,11 | 1,0 | 2,68 | 1,91 | 1,46 | 0,45 | 0,870 | 1,0 | 0,31 | 18 | 12 | 4 | 19,1±0,2 | 17 | 17 | 10 | 8 | 190 | | | 35А |
| eIIIpl | 7a VII | суглинок лесовий, гумусований тугопластичний | 0,24 | 0,29 | 0,21 | 0,08 | 0,40 | 2,68 | 1,92 | 1,56 | 0,42 | 0,720 | 0,88 | 0,27 | 22 | 27 | 10 | 19,2±0,4 | 21 | 20 | 23 | 21 | 200 | | | 35А |
| vdIIIs | 8 VIII | суглинок лесовий,текучий та тугопластичний | 0,26 | 0,28 | 0,19 | 0,09 | 0,78 | 2,68 | 2,05 | 1,63 | 0,39 | 0,700 | 1,0 | 0,26 | 20 | 14 | 5,5 | 20,5±0,2 | 18 | 18 | 12 | 10 | 230 | | | 35А |
| fIIdn | 10 X | супісок флювіогляціальний пластичний, з гравієм кристалічних порід до 2% | 0,21 | 0,22 | 0,16 | 0,06 | 0,83 | 2,69 | 2,00 | 1,65 | 0,39 | 0,630 | 0,91 | 0,23 | 18 | 9 | 7 | 20,0±0,6 | 18 | 15 | 9 | 6 | 240 | | | 36Б |
| fIIdn | 11 XI | суглинок флювіогляціальний напівтвердий, з гравієм кристалічних порід до 2% | 0,21 | 0,29 | 0,19 | 0,10 | 0,20 | 2,70 | 2,06 | 1,70 | 0,37 | 0,590 | 0,95 | 0,22 | 16 | 16 | 10 | 20,6±1,0 | 16 | 13 | 16 | 10 | 210 | | | 35Б |
| lgIIdn | 12 XII | супісок ,пластичний | 0,26 | 0,27 | 0,21 | 0,06 | 0,83 | 2,69 | 1,95 | 1,55 | 0,42 | 0,730 | 0,96 | 0,27 | 20 | 10 | 11 | 19,5±1,0 | 20 | 17 | 10 | 6 | 180 | | | 36А |
| lgIIdn | 13 XIII | суглинок напівтвердий | 0,25 | 0,34 | 0,22 | 0,12 | 0,25 | 2,71 | 1,99 | 1,59 | 0,41 | 0,700 | 0,96 | 0,26 | 21 | 25 | 12 | 19,9±1,0 | 21 | 18 | 25 | 16 | 210 | | | 35В |
| lgIIdn | 15 XV | суглинок твердий | 0,25 | 0,43 | 0,26 | 0,17 | <0 | 2,72 | 1,99 | 1,59 | 0,42 | 0,710 | 0,96 | 0,26 | 23 | 27 | 17 | 19,9±0,7 | 23 | 20 | 27 | 18 | 250 | | | 35В |
| N 1-2 | 16 XVI | глина тверда | 0,21 | 0,47 | 0,26 | 0,21 | <0 | 2,72 | 2,06 | 1,70 | 0,38 | 0,600 | 0,95 | 0,22 | 26 | 75 | 24 | 20,6±0,1 | 26 | 22 | 75 | 50 | 500 | | | 8Д |

*Рис. 7. Зведена інженерно-геологічна колонка з таблицею нормативних та розрахункових значень показників властивостей грунтів*

Згідно з класифікацією [1] виконана така оцінка категорій складності інженерно-геологічних умов ділянки вишукувань: за геоморфологічними ознаками до I категорії; за геологічною будовою до III категорії; за гідрогеологічними умовами до I категорії; за наявністю специфічних фізико-геологічних процесів до II категорії; за наявністю специфічних ґрунтів до II категорії.

Загалом ділянка вишукувань за складністю інженерно-геологічних умов відноситься до III категорії.

**Висновки відповідно до статті.**

1. За результатами виконаних робіт встановлено, що товща ґрунтів на ділянці неоднорідна. У розрізах свердловин, які пробурені на ній виділено дванадцять інженерно-геологічних елементів. Нумерація їх відповідає загальноприйнятій для мікрорайону № 3.

2. Через підтоплення та можливе сезонне затоплення при проєктуванні необхідно передбачити гідроізоляцію фундаментів і підлог фундаментів, регулювання поверхневого стоку, облаштування несучих комунікацій, які виключають втрати води та ізолюють промислові стоки.

3. Вода до всіх марок бетонів і цементів, залізобетонних конструкцій неагресивна.

## Список використаних джерел

1. ДБН А.2.1-1-2008. Вишукування, проектування і територіальна діяльність. Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва. [Чинний від 2008-07-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 72 с. (Державні будівельні норми України).

2. ДБН В.2.1-10:2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. [Чинні від 01.07.2009]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 90 с. (Державні будівельні норми України).

3. ДСТУ Б В. 2.1-5-96. Основи та підвалини будинків і споруд. Грунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань. [Чинний від 1997-01-01]. Київ, 1997. 28 с. (Державний стандарт України).

4. СНиП 2.03.11-85. Захист будівельних конструкцій від корозії. [Чинний від 1986-01-01]. Київ, 1985. 56 с. (Будівельні норми і правила).

5. Посібник з проектування захисту від корозії бетонних і залізобетонних будівельних конструкцій / Науково дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут бетону та залізобетону. Москва: Стройиздат, 1989. 51 с.

## References

1. *DBN A.2.1-1-2008. Vyshukuvannia, proektuvannia i terytorialna diialnist. Vyshukuvannia. Inzhenerni vyshukuvannia dlia budivnytstva [DBN A.2.1-1-2008. Surveying, designing and territorial activity. Refinement. Engineering research for construction]* (2008). Kyiv: Minregionstroy of Ukraine.

2. *DBN V.2.1-10:2009. Osnovy ta fundamenty sporud. Osnovni polozhennia proektuvannia [DBN B.2.1-10: 2009. Basis and foundations of structures. Basic design principles]*. (2009). Kyiv: Minregionstroy of Ukraine).

3. *DSTU B V. 2.1-5-96. Osnovy ta pidvalyny budynkiv i sporud. Hrunty. Metody statystychnoi obrobky rezultativ vyprobuvan [DSTU B. V. 2.1-5-96. Foundations and foundations of buildings and structures. Soils. Methods of statistical processing of test results]. (*1997). Kyiv.

4. SNyP 2.03.11-85. Zakhyst budivelnykh konstruktsii vid korozii [SNIP 2.03.11-85. Corrosion protection of building structures]. (1985). Kyiv.

5. Naukovo doslidnyi, proektno-konstruktorskyi ta tekhnolohichnyi instytut betonu ta zalizobetonu [Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete]. (1989). *Posibnyk z proektuvannia zakhystu vid korozii betonnykh i zalizobetonnykh budivelnykh konstruktsii – Guide to the design of corrosion protection of concrete and reinforced concrete structures*. Moscow: Stroiizdat.

*UDC 624 057 (477.51)*

*Volodymyr Ivanyshyn, Viktor Buhay, Mykola Korzachenko*

# STUDY OF THE ENGINEERING AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF THE SITE FOR THE CONSTRUCTION OF A TWO-STORY BUILDING OF A FLOWER SHOP ON PILE FOUNDATIONS ON NEZALEZHNOSTI STREET

***Urgency of the research.*** *Engineering and geological surveys for the construction of any object are mandatory, and therefore always relevant.*

***Target setting.*** *The territory of Chernihiv is covered with Quaternary sediments. Their thickness, lithology often changes on the area and in the section, which is a negative factor in the construction of various objects. Therefore, before starting the construction of these facilities, it is necessary to study in detail the engineering and geological conditions of the respective sections in order to ensure the sustainability of the constructed buildings or structures.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *There are no publications on the topic of the article.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *The problem of distribution, thickness and lithology of Quaternary sediments is not sufficiently solved in the territory of Chernihiv region and Chernihiv.*

***The research objective.*** *A detailed study of the engineering and geological conditions of the site for the construction of a two-story flower shop building on a pile foundation on Independence Street in the 3rd microdistrict of the Masany housing estate.*

***The statement of basic materials.*** *According to the results of the studied geomorphology, the studied area is located on the Chernihiv-Gorodnyansky moraine-sandur plain in the drive-inland part of the Strizhen and Belous rivers, which belong to the river Belous basin. According to the tectonic pattern, this is the northwestern part of the Dnieper-Donets Rift. The relief of the plot is flat with a slope to the south and absolute elevations of the ground's surface from 142 to 143,4 m. The plot is the lowest in the microdistrict. Through it surface runoff occurs. Engineering-geological model of the structure is based on geological sections 1-1'-4-4', in which engineering-geological elements (EGE) I - XVI are highlighted. The geological section to a depth of 15 m is represented by modern technogenic, upper Quaternary, mid-quarter and neogenic sediments. Non-pressure ground water is located at depths 1,5-1,6 m.*

***Conclusions.*** *The thickness of depositions in the site is heterogeneous. It identifies 12 engineering and geological elements. In high-water periods, the groundwater level may rise to the daily surface, therefore, it is necessary to provide waterproofing of the basement foundations and floors, and regulation of surface runoff. Water is non-aggressive.*

***Keywords:*** *depositions; soil; horizons; engineering geological elements; well; static sounding; groundwater.*

*Fig.: 7. References: 5.*

**Іванишин Володимир Андрійович** – доктор геологічних наук, професор, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Ivanyshyn Volodymyr** – Doctor of Geological Sciences, Professor, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** gkz.kaf@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-2394-1837

**Бугай Віктор Григорович** – начальник відділу, ТОВ «Чернігівбудрозвідування» (просп. Миру, 233а, м. Чернігів, 14006, Україна).
**Buhay Viktor** – Head of Department, Ltd. «Chernihivbudrozviduvannya» (223a Myru Av., 14006 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** 691040@ukr.net

**Корзаченко Микола Миколайович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри промислового і цивільного будівництва, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).
**Korzachenko Mykola** – PhD in Technical Sciences, lecturer of Department of Civil and Industrial Construction, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).
**E-mail:** korzachenko_87@meta.ua
**Researcher ID:** F-5177-2016
**ORCID:** https:// orcid.org/0000-0002-5674-8662

Іванишин В., Бугай В., Корзаченко М. Вивчення інженерно-геологічних умов ділянки під будівництво двоповерхової будівлі магазину квітів на пальовому фундаменті на вулиці Незалежності. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 329-336.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
*УДК 624.137*
*DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-337-344*

*Іван Менейлюк, Віктор Руссий*

# БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДЛЯ ВИБОРУ РІШЕННЯ УКРІПЛЕННЯ СХИЛУ

***Актуальність теми дослідження.*** *Нині одним із найрозвинутіших узбереж Одеси є курортно-рекреаційна зона уздовж Великого Фонтану, яка характеризується як зсувонебезпечна. Будівництво протизсувних споруд потребує залучення значних фінансових та трудових ресурсів. У нормативних документах відсутні вказівки щодо вибору оптимальних за критеріями вартості та трудомісткості рішень для подібних об'єктів. Тому вибір найбільш раціональних конструктивно-технологічних рішень є актуальним.*

***Постановка проблеми.*** *У процесі вибору конструктивно-технологічних рішень для укріплення схилу стає питання щодо їх відповідності конкретним умовам будівельного майданчика. Це відповідність технологій влаштування підпірних стін ґрунтовим умовам та обґрунтованість за вартісними та технологічними критеріями. Існує велика кількість різних протизсувних конструктивно-технологічних рішень. Унаслідок цього в процесі вибору остаточного рішення для укріплення схилу виникає необхідність використання багатокритеріального аналізу.*

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** *Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, включаючи відомі методи зміцнення схилів та методику вибору оптимальних рішень за допомогою багатокритеріального аналізу.*

***Виділення недосліджених частин загальної проблеми.*** *Попри велику кількість публікацій, що містять опис конструктивно-технологічних рішень зміцнення схилу, існує недостатньо праць, що проводять порівняння та вибір найбільш раціонального варіанту для конкретних ґрунтових умов.*

***Постановка завдання.*** *Вибір найменш трудомісткого та витратного рішення зміцнення верхньої частини схилу від обвалу масивів ґрунту на 13-ст Великого Фонтану в м. Одеса.*

***Виклад основного матеріалу.*** *Вибір оптимальних конструктивно-технологічних рішень виконувалася згідно з методикою багатокритеріального аналізу. У процесі відбору рішення для зміцнення схилу застосовувалися кількісні та якісні критерії: вартість, трудомісткість, обмеження по ґрунтах в заданих умовах. Дослідження виконувалося за допомогою функцій «зведена таблиця» та «зведена діаграма» в програмному комплексі Microsoft Excel, що дозволило виконати підбір необхідного рішення зміцнення схилу.*

***Висновки відповідно до статті.*** *Запропоноване конструктивно-технологічне рішення по зміцненню схилу від обвалень масивів ґрунту є найбільш раціональним із шести досліджуваних.*

***Ключові слова:*** *багатокритеріальний аналіз; підпірні стіни; зсувонебезпечні райони; протизсувні споруди; підпірні стіни; шпунт Ларсена; палі.*

*Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 22.*

**Актуальність теми дослідження.** Нині у зв'язку з тимчасовою окупацією Криму відбувається переправлення туристичних потоків. Унаслідок цього туристичний потенціал м. Одеса постійно зростає. Йде активне будівництво нових об'єктів курортно-рекреаційної інфраструктури.

Найчастіше будівництво подібних об'єктів відбувається в прибережній смузі. Як правило, ці будівельні майданчики розташовуються на зсувонебезпечних ділянках схилів. Вони потребують зміцнення від обвалів та випора ґрунтових масивів. Подібні заходи істотно підвищують вартість та тривалість будівництва.

У зв'язку з тим, що для кожного з таких об'єктів існують певні обмеження (географічне та адміністративне розташування об'єкта, природні й техногенні фактори, специфіка робіт) у нормативних документах відсутні вказівки з вибору оптимальних за критеріями вартості та трудомісткості конструктивно-технологічних рішень для зміцнення схилів.

Вибір найбільш раціональних рішень дозволяє максимально скоротити тривалість проведення робіт, знизити трудомісткість та витрати на матеріально-технічні ресурси.

Тому вибір оптимальних конструктивно-технологічних рішень для зміцнення схилу є актуальним і потребує рішення шляхом наукових досліджень і аналізу їх результатів.

**Постановка проблеми.** Будівлі та споруди на зсувонебезпечних ділянках потребують захисту від обвалів ґрунту та випора глибинних ґрунтових масивів. Однак на кожній конкретній ділянці існують різні ґрунтові умови (високі бокові навантаження, напірні ґрунтові води та ін.). Тому вибір оптимальних рішень є дискусійною проблемою для кожної ділянки схилу.

Підбір методів укріплення схилів залежить і від багатьох інших факторів: можливостей матеріально-технічного забезпечення регіону, певних обмежень за тривалістю та вартістю будівництва, містобудівних умов, естетичних та інших вимог.

© Менейлюк І. О., Руссий В. В., 2020

У зв'язку з цим вибір найбільш раціональних конструктивно-технологічних рішень зміцнення схилів повинен враховувати всі обмеження та вимоги.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Попередній аналіз відкритих джерел дозволив виявити понад 35 конструктивно-технологічних рішень [1-20], які можливо використовувати для зміцнення схилів.

Надалі виконаний аналіз можливості використання кожної з технологій в умовах даної зсувної ділянки за адресою: м. Одеса, 13-ст Великого Фонтану.

З розглянутих варіантів зміцнення схилу на даному об'єкті для зміцнення нижньої частини схилу від випора ґрунту підходить лише один варіант: влаштування буронабивних паль великого діаметра з обсадною трубою, згаданий у працях О. І. Менейлюка, О. Б. Пономарева, О. Г. Полевіченко, Я. В. Єреміна, Л. К. Гінзбурга, К. Ш. Шадунца та ін. [4-6; 7; 10-13].

Для зміцнення верхньої частини схилу можливе застосування 6 конструктивно-технологічних рішень:

– тонкоелементні залізобетонні підпірні стіни [1-3];
– ґрунтозаповнені підпірні стіни (габіони) та матраци Рено [1; 19];
– контрфорсні підпірні стіни з гнучкими мембранами [1];
– підпірні стіни на пальовому фундаменті [1-3; 7];
– шпунт Ларсена [2; 7];
– підпірні стіни з армованого ґрунту [1; 3-6; 8].

Наступні конструктивно-технологічні рішення з подальшого розгляду відкинуті: масивні підпірні стіни [1-3], напівмасивні підпірні стіни [1], контрфорсні залізобетонні підпірні стіни [1, 4-6], «мобільні» підпірні стіни [1], влаштування за технологією soilmix [9], пальово-анкерні споруди [1], цементація ґрунтів [4-6, 12-16], влаштування за технологією «ін'єкт» [14], ґрунтоцементні палі [4-6, 14-17], влаштування технологією «Jet grouting» [3-6; 14; 18], терасування схилів, пристрій контрбанкетів [3-6], використовування геотекстилю, геоматів, геосіток, георещіток, біоматів, біорешіток, біополотен [3-6; 19], готові залізобетонні палі (забиванням, вібруванням та вдавленням), [1-2; 7], колодязні стіни [3], «стіна в ґрунті» [1, 4-6, 20], ЕРГТ палі, ЕХВ палі, РІТ палі, палі «ГЕО» [13].

Схожий випадок укріплення в м. Одеса зсувонебезпечної ділянки в курортному районі «Аркадія» зазначений у статті І. О. Менейлюка та М. Ю. Качковського [21]. Укріплення схилу в цьому випадку виконувалося за допомогою контрфорсних підпірних стін та буронабивних паль великого діаметру з обсадною трубою.

Багатокритеріальному аналізу присвячені роботи О. І. Менейлюка, О. Л. Нікіфорова, Н. В. Дмитрієвої та ін. [19; 22].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз останніх досліджень показав, що існує широкий спектр протизсувних споруд, а також певні умови та обмеження в їх використанні. Незважаючи на велику кількість публікацій, що містять опис конструктивно-технологічних рішень зміцнення схилу, існує недостатньо праць, що проводять порівняння та вибір найбільш раціонального варіанту для конкретних ґрунтових умов. Тому вибір оптимального конструктивно-технологічного рішення для зміцнення схилу в даних умовах є нагальним та потребує додаткових досліджень.

**Постановка завдання.** Метою роботи є вибір найбільш раціонального варіанту для укріплення верхньої частини схилу від обвалень масивів ґрунту за допомогою методики багатокритеріального аналізу.

**Виклад основного матеріалу.** Протяжність верхньої ділянки схилу, що вимагає посилення – 296 м.

Висота підпірної стіни 5 м.

Для прийняття оптимального рішення щодо вибору способу влаштування посилення верхньої частини схилу сформована таблиця 1 і обрано такі критерії:

– вартість, грн на погонний метр підпірної стіни;
– трудомісткість, люд.-год на погонний метр підпірної стіни;
– обмеження по ґрунтах у заданих умовах.

Таблиця 1

*Оцінки технологій зміцнення верхньої частини схилу в грошових та фізичних одиницях*

| № з/п | Найменування | Вартість влаштування п.м. підпірної стіни висотою 5 м, грн | Трудомісткість влаштування п.м. підпірної стіни висотою 5 м, люд.-год | Обмеження по ґрунтах | Примітки |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Тонкоелементні підпірні стіни | 2938,8 | 12,03 | Немає | |
| 2 | Габіони та матраци Рено | 6478,74 | 12,63 | Піщані і підтоплені ґрунти | |
| 3 | Контрфорсні підпірні стіни з мембранами | 2739,34 | 14,55 | Спираються на глибинні шари ґрунту | Велика ймовірність пошкодження мембрани в процесі експлуатації |
| 4 | Підпірні стіни на пальовому фундаменті | 6339,92 | 21,55 | Спираються на глибинні шари ґрунту | |
| 5 | Шпунт Ларсена | 31746,63 | 25,81 | Немає | |
| 6 | Підпірні стіни з армованого ґрунту | 9716,56 | 54 | Скельні і водонасичені ґрунти | |

Результати розрахунків кількісних критеріїв «вартість» і «трудомісткість» у програмному комплексі АВК-5 по кожному з варіантів для зручності оцінки із загальної вартості та трудомісткості всього об’єкта переведені на одиницю виміру (1 п.м.) підпірної стіни.

Якісний критерій «обмеження по ґрунтах» визначає оцінку технологічних вимог обраних методів зміцнення верхньої частини схилу щодо умов цього об’єкта. При низьких вимогах обмежень немає, середніх – ускладненість влаштування підпірних стін в скельних і водонасичених ґрунтах, вище середніх – ускладненість влаштування підпірних стін у піщаних і підтоплених ґрунтах. Високі обмеження по ґрунтах мають технології, в яких несучі конструкції спираються на глибинні тверді шари ґрунту.

Оцінка технологій за кількісними і якісними критеріями здійснювалася в програмі Microsoft Excel за допомогою інструментів «зведена таблиця» і «зведена діаграма» [19]. Оцінка проведена за десятибальною шкалою, де мінімально і максимально ефективним значенням присвоєні бали 1 і 10 відповідно. Проміжні значення підраховані за допомогою інтерполяції (табл. 2 і рис. 1).

Таблиця 2

*Оцінки технологій зміцнення верхньої частини схилу в балах*

| № з/п | Найменування | Вартість влаштування п.м. підпірної стіни висотою 5 м, грн | Трудомісткість влаштування п.м. підпірної стіни висотою 5 м, люд.-год |
|---|---|---|---|
| 1 | Тонкоелементні підпірні стіни | 9,94 | 10 |
| 2 | Габіони + матраци Рено | 8,84 | 9,87 |
| 3 | Контрфорсні підпірні стіни з мембранами | 10 | 9,46 |
| 4 | Підпірні стіни на пальовому фундаменті | 8,88 | 7,95 |
| 5 | Шпунт Ларсена | 1 | 7,04 |
| 6 | Підпірні стіни з армованого ґрунту | 7,84 | 1 |

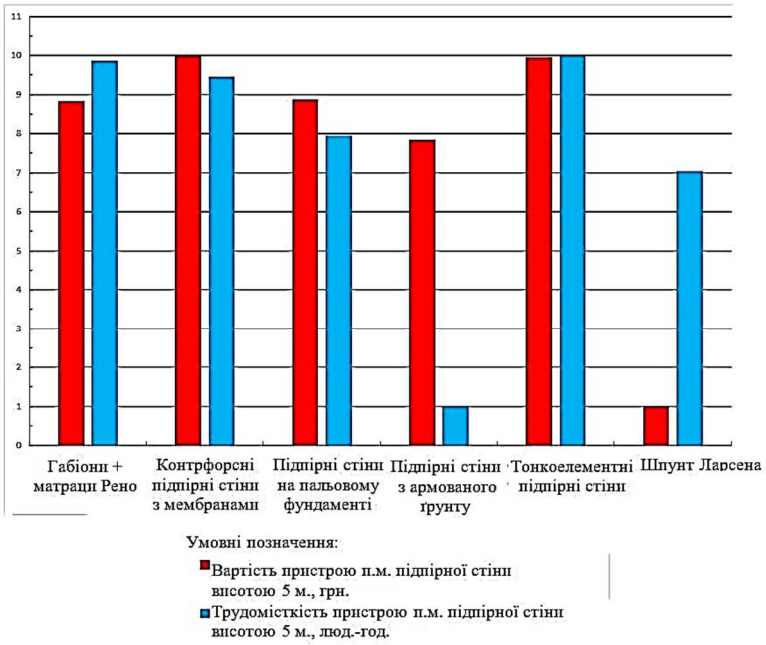



*Рис. 1. Порівняння бальних оцінок конструктивно-технологічних рішень зміцнення верхньої частини схилу в зведеній діаграмі*

Оскільки основними критеріями в будь-якому будівництві є економічність і трудомісткість виконання, то аналізуючи наведені альтернативи, виключаємо конструктивно-технологічні рішення, які є найдорожчими і трудомісткими.

Аналізуючи діаграму, видно, що застосування «підпірних стін з армованого ґрунту» є найбільш трудомістким рішенням (54 люд.-год на п.м. стіни). За критерієм вартості найдорожчим рішенням є «шпунт Ларсена» (31 746,63 грн на п.м. стіни), з огляду на високу вартість сталевого шпунта “Л-5У”. Виключаємо ці дві технології з подальшого розгляду (рис. 2).

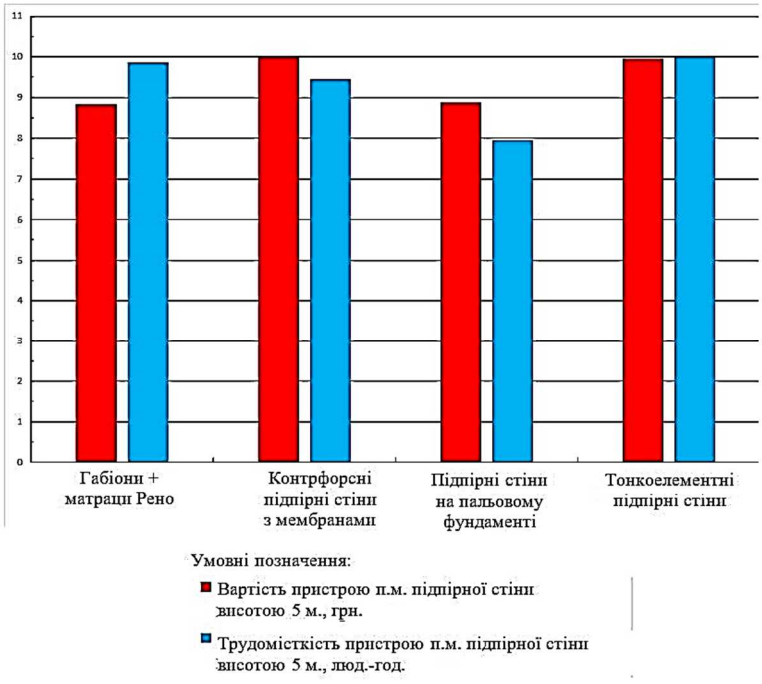



*Рис. 2. Порівняння конструктивно-технологічних рішень «габіони + матраци Рено», «контрфорсні підпірні стіни з мембранами», «підпірні стіни на пальовому фундаменті», «тонкоелементні підпірні стіни»*

З рис. 2 видно, що оптимальне співвідношення «вартість/трудомісткість» мають два рішення: «контрфорсні підпірні стіни з мембранами» і «тонкоелементні підпірні стіни», у яких спостерігаються найнижчі показники вартості та трудомісткості.

«Контрфорсні підпірні стіни з мембранами» поступаються рішенню «габіони + матраци Рено» за критерієм трудомісткості, однак у значно більшому ступені виграють по вартості зведення. У зв'язку з цим надалі конструктивно-технологічні рішення «габіони + матраци Рено» і «підпірні стіни на пальовому фундаменті» не розглядаються в порівнянні.

Для остаточного порівняння двох технологій, максимально близьких щодо запропонованих кількісних показників, скористаємося якісним критерієм «обмеження по ґрунтах» (рис. 3).

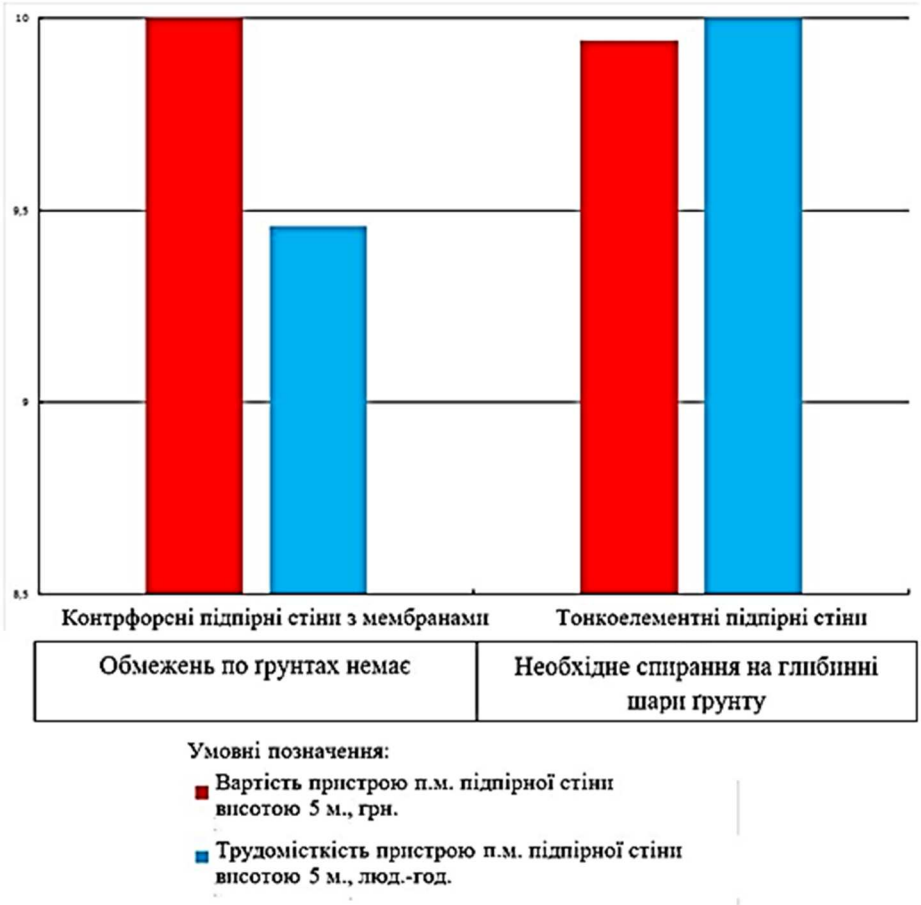



*Рис. 3. Порівняння конструктивно-технологічних рішень «контрфорсні підпірні стіни з мембранами» та «тонкоелементні підпірні стіни»*

Ґрунти на позначці нижче 6 м представлені в основному лісовидними супісками і суглинками з двома водоносними горизонтами. Застосування варіанту «контрфорсні підпірні стіни з мембранами» (що передбачає влаштування буронабивних паль і мембран) може спричинити вивільнення напірних ґрунтових вод. Також слід враховувати бічний тиск ґрунтового масиву на буронабивні палі. Внаслідок цього можливо замочування просадних ґрунтів (як наслідок виникнення значних осад і обвалень ґрунту). У таких умовах потрібно застосування обсадної труби для буронабивних паль, яка дозволить ефективно протидіяти цим факторам.

Верхня ґрунтова товща представлена пісками, супісками і суглинками. Можливо порушення суцільності стіни (мембрани) внаслідок вандалізму і низької міцності на розрив матеріалу мембрани.

Підпірна стіна має протяжність 296 м. При інженерно-геологічних вишукуваннях на цьому схилі виконано 50 свердловин, однак між свердловинами можливо більш глибоке залягання твердих порід ґрунтів. Це призведе до збільшення вартості і трудомісткості в процесі влаштування буронабивних паль для рішення «контрфорсні підпірні стіни з мембранами».

При влаштуванні та експлуатації тонкоелементної підпірної стіни відсутні перераховані вище недоліки щодо якісного критерію. Тому для зміцнення верхньої частини схилу в даних умовах прийнятий варіант «тонкоелементна підпірна стіна».

**Висновки відповідно до статті.** Аналіз інформаційних джерел дозволив виявити 35 варіантів конструктивно-технологічних рішень, які можливо використовувати для зміцнення схилів.

З розглянутих 35 варіантів конструктивно-технологічних рішень на цьому об'єкті для зміцнення нижньої частини схилу підходить лише один варіант: влаштування буронабивних паль великого діаметра з обсадною трубою.

Для зміцнення верхньої частини схилу можливе застосування 6-ти конструктивно-технологічних рішень.

Багатокритеріальний аналіз 6 можливих конструктивно-технологічних рішень для зміцнення верхньої частини схилу показав, що найбільш ефективним для досліджуваних умов є варіант влаштування «тонкоелементна підпірна стіна».

**Список використаних джерел**

1. Гузченко В. Т., Лісневський М. А. Класифікація підпірних стін. *Журнал мости та тунелі: теорія, дослідження, практика.* 2012. № 3. С. 39-44.

2. Підпірні стіни: презентація. URL: https://slide-share.ru/tema-2-pidpirni-stini-132838.

3. Пономарев А. Б., Калошина С. В., Старцева С. И., Безгодов М. А. Строительство на урбанизированных территориях: учеб. пособие. Пермь: ПНИПУ, 2012. 199 с.

4. ДБН В.1.1-24:2009. Захист від небезпечних геологічних процесів. Основні положення. [Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 30 с. (Державні будівельні норми України).

5. ДБН В.1.1-45:2017 Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. [Чинний від 2017-10-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 51 с. (Державні будівельні норми України).

6. ДБН В.1.1-46: 2017 Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення [Чинний від 2017-11-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2017. 47 с. (Державні будівельні норми України).

7. Полевиченко А. Г. Расчет свайной подпорной стены для укрепления откосов и склонов: учебное пособие. Хабаровск: ДВГУПС, 2006. 25 с.

8. Каганов Г. М., Евдокимова И. М., Шевченко К. И. Гидротехнические сооружения армированного грунта: учебное пособие. Москва: Полиграфический комплекс НИА-Природа», 2004. 607 с.

9. Технология цементации Soilmix. URL: http://eu-found.de/ru/verfahren/soilmix.html.

10. Еремин В. Я., Сафанов Н. В. Некоторые проблемы качества буронабивных свай. *Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях*: сб. тез. докл. междунар. научно-технич. конф. (г. Уфа, 3-5 октября 2006 г). Уфа: БашНиистрой, 2006. С. 85–96.

11. Гинзбург Л. К. Противооползневые удерживающие конструкции: монография. Москва: Стройиздат, 1979. 81 с.

12. Шадунц К. Ш. Способы защиты склонов прибрежных территорий от оползневых процессов. *Научный журнал КубГАУ*. 2010. №55 (01) С. 1–7.

13. Менейлюк А. И., Дубельт Т. М., Менейлюк И. А. Инновации в строительстве и реконструкции: монография. Киев: ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2018. 650 с.

14. Новицький О. П. Методи закріплення ґрунтів цементом. *Вісник ДонНАБА*. Макеевка, 2013. Вип. 3 (101). С. 32-37.

15. Зоценко М. Л. Ґрунтоцементні основи та фундаменти. *Будівельні конструкції.* 2011. № 75. С. 447–457. URL: https://scholar.google.com.ua/citations?user=fAI6SxYAAAAJ&hl=ru#d=gs_md_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Dru%26user%3DfAI6SxYAAAAJ%26citation_for_view%3DfAI6SxYAAAAJ%3ATyk-4Ss8FVUC%26tzom%3D-120.

16. Токин А. Н. Фундаменты из цементогрунта: монография. Москва: Стройиздат, 1984. 182 с.

17. Зоценко М. Л., Вінніков Ю. Л., Зоценко В. М. Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом: монографія. Харків: Мадрид, 2016. 92 с.

18. Системы струйной цементации Jet-1, Jet-2, Jet-3 особенности и отличия. URL: http://www.anker-pk.ru/poleznoe/zakreplenie_gruntov/sistemy_struinoy_cementacii/.

19. Менейлюк О. І., Нікіфоров О. Л. Інновації в будівництві: методичні вказівки. Одеса: ОДАБА, 2018. 53 с.

20. Протопопова Д. А., Коршиков В. В. Технология возведения фундамента методом «стена в грунте». *Научно-методический журнал Academy.* 2017. № 5 (20). С. 109–112.

21. Менейлюк І. О., Качковський М. Ю. Стабілізація зсувних схилів в курортному районі «Аркадія». *Міжн. наук.-техн. зб*. Київ, 2019. № 65. С. 81–86.

22. Дмітрієва Н. В., Іванова Т. І., Гострік А. Н. Про багатокритеріальний аналіз технологічних рішень гідроізоляції вапняку-черепашнику. *Молодий вчений.* 2017. № 7 (47). С. 20–24.

## References

1. Huzchenko, V. T., Lisnevskyi, M. A. (2012). Classification of retaining walls. *Journal bridges and tunnels: theory, research, practice,* 3, 39–44 [in Ukrainian].

2. Retaining walls: presentation. (2019, October 20). Retrieved from https://slide-share.ru/tema-2-pidpirni-stini-132838.

3. Ponomarev, A. B., Kaloshyna, S. V., Startseva, S. I., Bezghodov, M. A. (2012). *Construction in urban areas*. Perm: PNRPU [in Russian].

4. State building codes V.1.1-24:2009. *Protection against dangerous geological processes. Substantive provisions* (2010). Official edition. Kyiv: Minregionstroy of Ukraine [in Ukrainian].

5. State building codes V.1.1-45:2017 *Buildings and structures in difficult engineering-geological conditions* (2017). Official edition. Kyiv: Minregionstroy of Ukraine [in Ukrainian].

6. State building codes V.1.1-46: 2017 *Engineering protection of territories, buildings and structures against landslides and collapses. Substantive provisions* (2017). Official edition. Kyiv: Minregionstroy of Ukraine [in Ukrainian].

7. Polevychenko, A. H. (2006). *Calculation of pile retaining wall to strengthen slopes and slopes*. Khabarovsk: FESTU [in Russian].

8. Kahanov, H. M., Evdokymova, I. M., Shevchenko, K. I. (2004). *Hydrotechnical structures of reinforced soil.* Moscow: Printing complex NYA - Nature [in Russian].

9. Cementation technology Soilmix. (2019, October 20). Retrieved from http://eu-found.de/ru/verfahren/soilmix.html.

10. Eremyn, V. Ia., Safanov, N. V. (2006). *Some quality problems of bored piles*, Problems of soil mechanics and foundation building in difficult soil conditions: collection of abstracts international scientific and technical conferences (Ufa, October 3-5, 2006). Ufa: BashNyystroi [in Russian].

11. Hynzburh, L. K. (1979). *Anti-slip retaining structures*. Moscow: Stroiizdat [in Russian].

12. Shadunts, K. Sh. (2010). Ways to protect the slopes of coastal areas from landslide processes. *Scientific journal KubSAU*, 55 (01), 1-7 [in Russian].

13. Meneiliuk, A. I., Dubelt, T. M., Meneiliuk, I. A. (2018). *Innovations in construction and reconstruction*. Kyiv: TOV NVP «Interservis» [in Russian].

14. Novytskyi, O. P. (2013). Methods of cementing soils. *Herald DonNACEA*, 3 (101), 32-37 [in Ukrainian].

15. Zotsenko, M. L. (2011). Cement bases and foundations. *Building structures*, 75, 447-457. Retrieved from https://scholar.google.com.ua/citations?user=fAI6SxYAAAAJ&hl=ru#d=gs_md_citad&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Dru%26user%3DfAI6SxYAAAAJ%26citation for view%3DfAI6SxYAAAAJ%3ATyk-4Ss8FVUC%26tzom%3D-120.

16. Tokyn, A. N. (1984). *Foundations of a mixture of cement and soil*. Moskow: Stroiizdat [in Russian].

17. Zotsenko, M. L., Vinnikov, Yu. L., Zotsenko, V. M. (2016). *Drilling soil cement piles, which are made by the mixing method.* Kharkov: Madrid [in Ukrainian].

18. Systems of jet cementation Jet-1, Jet-2, Jet-3 features and differences. (2019, October 20). Retrieved from http://www.anker-pk.ru/poleznoe/zakreplenie_gruntov/sistemy_struinoy_cementacii.

19. Meneiliuk, O. I., Nikiforov, O. L. (2018). *Innovations in construction*. Odessa: OSACEA [in Ukrainian].

20. Protopopova, D. A., Korshykov, V. V. (2017). The technology of construction of the foundation by the "wall in soil" method. *Scientific and methodological journal Academy,* 5 (20), 109–112.

21. Meneiliuk, I. O., Kachkovskyi, M. Iu. (2019). Stabilizing of slopes of change is in the resort district of «arcadia». *International scientific and technical collection,* 65, 81–86 [in Ukrainian].

22. Dmitriieva, N. V., Ivanova, T. I., Hostrik, A. N. (2017). On multicriterion analysis of technological solutions of limestone-shell rock waterproofing. *Scientific journal young scientist,* 7 (47), 20-24 [in Ukrainian].

*UDC 624.137*

*Ivan Meneiliuk, Victor Russyi*

## MULTI-CRITERIA ANALYSIS FOR THE SELECTION OF THE DECISION FOR STRENGTHENING THE SLOPE

***Urgency of the research.*** *Currently, one of the most developed shores of Odessa is the resort and recreation area along the Great Fountain, which is characterized as a dangerous landslide zone. Construction against sliding structures requires considerable financial and manpower resources. Regulatory documents do not provide guidance on the choice of the most cost-effective and time-consuming solutions for such objects. Therefore, the choice of the most rational design and technological solutions is relevant.*

***Target setting.*** *In the process of choosing structural and technological solutions to reinforce the slope, the question arises of their compliance with the specific conditions of the construction site. It is the compliance of the retaining wall technologies with the soil conditions and the reasonableness of costs and technological criteria. There are many different structural and technological solutions for soil displacement. As a result, multi-criteria analysis is required in the process of selecting the final slope-strengthening solution.*

***Actual scientific researches and issues analysis.*** *Recent open access publications have been reviewed, including well-known slope strengthening techniques and how to choose the best solutions using multi-criteria analysis.*

***Uninvestigated parts of general matters defining.*** *Despite the large number of publications containing descriptions of structural and technological solutions for strengthening the slope, there is not enough work to compare and select the most rational option for specific soil conditions.*

***The research objective.*** *Choosing the least time-consuming and costly solution to strengthen the top of the slope from the collapse of soil masses at the 13th Great Fountain in Odessa.*

***The statement of basic materials.*** *The choice of optimal structural and technological solutions was made by the method of multicriteria analysis. Quantitative and qualitative criteria were used in the process of selecting the slopes to strengthen the slopes: cost, amount of labor expended, soil restriction under these conditions. The study was carried out using the "summary table" and "summary chart" features in Microsoft Excel software, which allowed us to choose the necessary solution to increase the slope.*

***Conclusions.*** *The proposed structural and technological solution for strengthening the slope from displacement is the most rational of the six studied.*

***Keywords:*** *multi-criteria analysis; retaining walls; sliding areas; against sliding structures; retaining walls; the Larsen wall; piles.*

*Fig.: 3. Tabl.: 2. References: 22.*

**Менейлюк Іван Олександрович** – кандидат технічних наук, докторант, Харківський національний університет будівництва та архітектури (вул. Сумська, 40, м. Харків, 61002, Україна).
**Meneiliuk Ivan** – PhD in Technical Sciences, Doctoral student at Kharkov national university of civil engineering and architecture (40 Sumska Str., 61002 Kharkov, Ukraine).
**E-mail:** ivmen11112019@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7075-2898

**Руссий Віктор Вікторович** – аспірант кафедри технології будівельного виробництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури (вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65000, Україна).
**Russyi Victor** – PhD student, PhD student of the Department of construction production technology, Odessa state academy of civil engineering and architecture (4 Didrikhson Str., 65000 Odessa, Ukraine).
**E-mail:** viruswot@gmail.com
**ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5884-2097

Менейлюк І., Руссий В. Багатокритеріальний аналіз для вибору рішення укріплення схилу. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 337-344.

# ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»

**Шановні дописувачі!**

Для подання статті необхідно спочатку надіслати на електронну адресу tst.technical.sj@gmail.com Вашу статтю, рецензію та довідку про автора (ів) для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології».

Після отримання позитивного відгуку прохання сплатити вартість публікації і відправити весь пакет документів.

Для публікації статті у журналі «Технічні науки та технології» необхідно в обов'язковому порядку подати:

– електронний варіант статті, оформленої за зразком;
– рецензію на статтю за підписом доктора наук;
– довідку про авторів;
– квитанцію (скановану) про сплату вартості публікації наукової статті.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації 1 сторінки наукової статті становить **55 грн** (прохання обов'язково уточнювати вартість публікації). Оплата підтверджується квитанцією.

***УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ ЧЕРНІГІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ:***
**http://tst.stu.cn.ua/**

**Контактна інформація.**

Матеріали необхідно надсилати на адресу: 14035, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, к. 242 (науково-дослідна частина).

Контактна особа: Кормило Ірина Миколаївна.

Тел. роб.: (0462) 66-51-15

Тел. моб.: (093) 592-78-12

E-mail: tst.technical.sj@gmail.com

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор. Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи, що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

*Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів (рецензії, довідки про авторів тощо) як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору (тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

# ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

***НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ***

***№ 1 (19)***


| | |
|---|---|
| Відповідальний за випуск | С. П. Сапон |
| Редактор | О. С. Смєлова |
| Комп’ютерне складання та верстання | Т. М. Колот |

Підписано до друку 28.04.2020. Формат 60×84/8. Друк різографія.
Ум. друк. арк. – 40,22. Тираж 100 пр. Замовлення № 508/20.

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського національного технологічного університету
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 4802 від 01.12.2014 р.