МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Журнал заснований у 1918 році

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 2 2025
Частина 2

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Бронін Сергій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;
Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Дехтяр Анатолій Соломонович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;
Дичко Аліна Олегівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технології та дизайну;
Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Сегай Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загально-інженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;
Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 9 від 16 травня 2025 року)

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»
зареєстровано відповідно до Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 1136 від 11.04.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-04000.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського (просп. Берестейський, 10, м. Київ, 01135, e-mail: crimea.tnu@gmail.com, тел.: +38 (044) 529-05-16).

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька,
французька, словацька, румунська, італійська.

Періодичність: 6 разів на рік.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: G1 Хімічні технології та інженерія; G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією); G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), F2 Інженерія програмного забезпечення; F6 Інформаційні системи і технології; F7 Комп'ютерна інженерія; G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка; D3 Менеджмент; G11 Машинобудування (за спеціалізаціями); J5 Морський та внутрішній водний транспорт; J6 Авіаційний транспорт; J7 Залізничний транспорт; J8 Автомобільний транспорт відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)
ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2025

ЗМІСТ

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Рагулін С. В.
РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІСЛЯГАРАНТІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВОВАНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ.....1

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Барабаш О. В., Свинчук О. В., Шуклін Г. В., Копійка О. В.
ВЕБЗАСТОСУНОК ДЛЯ ДИНАМІЧНОГО ПЕРЕРОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ.....9

Бегліцов С. В.
ПЛАВНЕ ПЕРЕКЛЮЧЕННЯ В ХМАРНЕ СЕРЕДОВИЩЕ З АВТОМАТИЗАЦІЄЮ TERRAFORM І КОНТЕЙНЕРИЗАЦІЄЮ DOCKER: ІНТЕГРАЦІЯ ІНФРАСТРУКТУРИ ЯК КОД ТА BLUE-GREEN РОЗГОРТАННЯ.....17

Бойко О. В., Залевський С. В., Савчук В. С.
АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОННОГО ЛИСТА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОЗНАК ФІШИНГУ.....25

Василенко О. О.
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРОБКИ БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕГУЛЯРНИХ ВИРАЗІВ.....31

Вовченко Д. С., Олещенко Л. М.
АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ БАЛАНСУВАННЯ ВУЗЛІВ В ПРОГРАМНИХ СИСТЕМАХ РОЗПОДІЛЕНОЇ ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ДАНИХ.....39

Volovetskyi O. O.
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A SYNTHETIC DATA GENERATOR FOR MODELING TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE IRON ORE BENEFICIATION PROCESS.....49

Гладка О. М., Карпович І. М., Сех О. Б.
МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК – ПЛАТФОРМА ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ АНГЛІЙСЬКОЇ МОВИ.....55

Горбань Г. В., Фісун М. Т., Раленко В. С., Стоєв Є. Д.
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПЕРЕВІРКИ ПРОГРАМНОГО КОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....62

Григорчук Г. В., Григорчук Л. І., Храбатин Р. І.
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ УТФЕЛЮ.....72

Дутка Х. Б., Бешлей М. І., Бешлей Г. В.
РОЗРОБКА КРОСПЛАТФОРМЕНОГО ВЕБЗАСТОСУНКУ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ТА СОРТУВАННЯ ВІДХОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....78

Єщенко М. С.
ОРГАНІЗАЦІЙНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН.....87

Кисельов В. Б., Морщ Є. В., Чумаченко С. М., Гуйда О. Г., Ромащенко Р. А.
МОДЕЛЬ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ В СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТУКТУРИ.....94

Ладієва Л. Р., Корнієнко Б. Я., Сазонов А. Ю., Пелипенко Н. С.
ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЕТАНОЛУ ГІДРОЛІЗОМ ДЕРЕВИНИ.....104

Лебедєв А. В., Федорова Н. В.
МУТАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРОБЛЕМИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....112

Легеза В. П., Нещадим О. М., Дичка А. І.
АЛГОРИТМІЧНИЙ МЕТОД ЛОКАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ НЕЯВНО ЗАДАНИХ ФУНКЦІЙ У ЯВНІЙ ФОРМІ.....118

Макарова Л. М., Латанська Л. О., Семенчук І. М.
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДНОСТІ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ 2D ІГОР НА ОСНОВІ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ КЛАСАМИ.....124
Макарова Л. М., Камінський С. С., Бризгалов М. В.
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРУ 2D-ЗАСТОСУНКІВ НА ОСНОВІ ГРАФІЧНИХ РУШІЇВ.....131
Медведєв М. Г., Саган А. О.
ПРОГРАМНИЙ ПІДХІД ДО ПОШУКУ ВТРАЧЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОБОТОТЕХНІЦІ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА АНАЛІЗУ ПАТЕНТІВ.....136
Мовчан К. О.
МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТАНДАРТИЗАЦІЇ РІВНІВ АВТОНОМНОСТІ A-UGV.....146
Momot A. S., Nakonechnyi M. V., Galagan R. M., Muraviov O. V.
AUTOMATED MATERIAL CLASSIFICATION BASED ON TEMPERATURE PROFILES.....153
Новіков П. В., Тесленко О. І., Бельдій В. І., Бунке О. С.
МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ ЕЛЕКТРОДНОГО КОТЛА ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ ІЗ ЗАНУРЕНИМ ЕЛЕКТРОДОМ.....162
Павлов В. Г.
СЕМАНТИЧНІ ТА ЛЕКСИЧНІ ОЗНАКИ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО КОДУ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ.....169
Павловський О. М., Платов І. М.
ДОСЛІДЖЕННЯ КОДОГЕНЕРАЦІЇ C/C++ КОМПІЛЯТОРА ДЛЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ОБЧИСЛЕНЬ В МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ.....175
Петришин Р. І., Шекета В. І., Павлів А. І., Касянчук І. П.
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБРОБКИ КАРОТАЖНИХ ДАНИХ ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СВЕРДЛОВИН.....183
Пшеничний О. Ю.
РОЗВИТОК АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....193
Савченко І. О., Мацько П. І.
СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ЗАГРОЗ КРИТИЧНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ.....199
Федорович В. І.
МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ВІЗУАЛЬНИХ АНОМАЛІЙ У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....206
Цяпа С. М.
ІНТЕГРАЦІЯ СЕНСОРНИХ ДАНИХ В A-UGV СИСТЕМАХ.....214
Шаповал В. П., Тарасенко Я. В.
МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ВІДЕОКОНТРОЛЮ ПЕРВИННИХ ОЗНАК ПСИХОЛОГІЧНОГО СТАНУ.....222
Шерстюк І. О., Голубєв Л. П.
РЕКОМЕНДАЦІЙНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ УДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ КОРЕЛЯЦІЇ.....228

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Головенко В. О., Коваль Д. С., Ясногор М. В., Приходько Д. М., Андріянова М. В.
ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ НА ВИХІД ОТРИМАНИХ ПРОДУКТІВ.....235
Dychko A. O., Yeremeyev I. S., Remez N. S., Barabash O. V., Minaieva Yu. Yu.
ANALYSIS OF RISKS TO THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF WATER TREATMENT.....241

Кожура О. В., Цибуля Є. О.
ВИКОРИСТАННЯ НІТРОГЕН(ІІ) ОКСИДУ У ЯКОСТІ КАТАЛІЗАТОРУ ОКИСНЕННЯ КИСНЕМ СІРЧАНОКИСЛИХ РОЗЧИНІВ ФЕРУМ(ІІ) СУЛЬФАТУ..... 247

Kontsevoy A. L., Kontsevoi S. A.
THE INFLUENCE OF DEPOSITION CONDITIONS ON THE ACTIVITY OF THE IRON-CHROME CATALYST..... 256

Костенко Є. Г., Шахновський А. М., Обушенко Т. І., Толстопалова Н. М., Сангінова О. В.
СОРБЕНТИ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ ФТОРИДІВ..... 261

Кучинська Д. А., Іщенко О. В.
ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗЧИНІВ НА ОСНОВІ КРОХМАЛЮ МОДИФІКОВАНОГО МОЛОЧНОЮ КИСЛОТОЮ..... 270

Петров С. В., Бондаренко С. Г., Рошанпур Ш., Абрамова А. О.
ВДОСКОНАЛЕНА ПЛАЗМОВО ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ПЛАЗМОВО-АКТИВОВАНОЇ ВОДИ – РІДКИХ АЗОТНИХ ДОБРИВ..... 276

Пилипенко Т. М., Єфімова В. Г., Качоровська О. П., Мохно В. О.
ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ ТА ВИЯВЛЕННЯ В НИХ НАТРІЙ НІТРИТУ ЯК ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ Е 250..... 294

Поліщук Б. В., Мітіна Н. Б.
ПИТАННЯ ЩОДО РОЗРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ..... 300

Стеренчук С. М., Качан Р. В.
ОГЛЯД ФОРМ ТА СКЛАДУ СОНЦЕЗАХИСНОГО ЗАСОБУ..... 305

Шокота М. Ю., Кравченко О. В., Гуляєв В. М., Коваленко А. Л.
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ МАГНІЙ ОКСИДУ З РОЗЧИНІВ МАГНІЙ ХЛОРИДУ ЗА АМОНІАЧНОЮ СХЕМОЮ..... 312

Шохін М. В., Гуляєв В. М., Коваленко А. Л.
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ СИНТЕЗУ ФРИКЦІЙНИХ ВИРОБІВ НА ОСНОВІ ЕЛАСТОМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ..... 318

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ..... 324

CONTENTS

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Rahulin S. V.
DEVELOPMENT OF METHODS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY
OF POST-WARRANTY OPERATION OF REDUNDANT RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS.....1

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Barabash O. V., Svynchuk O. V., Shuklin G. V., Kopiika O. V.
WEB APPLICATION FOR DYNAMIC LOAD REDISTRIBUTION IN INFORMATION SYSTEMS
OF ENERGY NETWORKS..... 9

Behlitsov S. V.
SEAMLESS CLOUD MIGRATION WITH TERRAFORM AUTOMATION
AND DOCKER CONTAINERIZATION: INTEGRATING INFRASTRUCTURE AS CODE
AND BLUE-GREEN DEPLOYMENT.....17

Boiko O. V., Zalevsky S. V., Savchuk V. S.
ANALYSIS OF AN EMAIL FOR SIGNS OF PHISHING.....25

Vasylenko O. O.
OPTIMIZATION OF BIBLIOGRAPHIC DATA PROCESSING
USING REGULAR EXPRESSIONS.....31

Vovchenko D. S., Oleshchenko L. M.
ANALYSIS OF NODE BALANCING ALGORITHMS IN DISTRIBUTED BIG DATA
PROCESSING SOFTWARE SYSTEMS.....39

Volovetskyi O. O.
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A SYNTHETIC DATA GENERATOR FOR MODELING
TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE IRON ORE BENEFICIATION PROCESS..... 49

Hladka O. M., Karpovich I. M., Sekh O. B.
MOBILE APPLICATION – PLATFORM FOR USING ENGLISH..... 55

Horban H. V., Fisun M. T., Ralenko V. S., Stoiev Ye. D.
PLATFORM FOR AUTOMATED CODE VERIFICATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE
TECHNOLOGIES.....62

Grygorchuk G. V., Grygorchuk L. I., Khrabatyn R. I.
MODELING OF THE MASSECUITE DRYING PROCESS.....72

Dutka H. B., Beshley M. I., Beshley H. V.
DEVELOPMENT OF A CROSS-PLATFORM WEB APPLICATION
FOR WASTE RECOGNITION AND SORTING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE..... 78

Yeshchenko M. S.
ORGANIZATION-ORIENTED MODELING FOR BLOCKCHAIN SYSTEMS.....87

Kyselov V. B., Morshch Ye. V., Chumachenko S. M., Guida O. H., Romashchenko R. A.
A MODEL FOR EMERGENCY PREVENTION IN THE DECISION SUPPORT SYSTEM
FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES.....94

Ladieva L. R., Korniyenko B. Ya., Sazonov A. Yu., Pelypenko N. S.
OPTIMAL CONTROL OF THE ETHANOL PRODUCTION PROCESS BY WOOD HYDROLYSIS.....104

Lebediev A. V., Fedorova N. V.
MUTATION ANALYSIS AND PROBLEMS OF ITS USE FOR MACHINE LEARNING MODELS.....112

Leheza V. P., Neshchadym O. M., Dychka A. I.
AN ALGORITHMIC METHOD OF LOCAL REPRESENTATION OF IMPLICITLY DEFINED
FUNCTIONS IN AN EXPLICIT FORM.....118

Makarova L. M., Latanska L. O., Semenchuk I. M.
MATHEMATICAL MODELING FOR ASSESSING THE COMPLEXITY OF OBJECT-ORIENTED
DESIGN IN 2D GAMES BASED ON CLASS INTERRELATIONSHIPS.....124

Makarova L. M., Kaminsky S. S., Bryzgalov M. V.
MATHEMATICAL MODELING FOR SIZE ESTIMATION OF 2D APPLICATIONS BASED ON GRAPHICS ENGINES....131
Medvedev M. G., Sahan A. O.
SOFTWARE METHOD FOR IDENTIFYING LOST TECHNOLOGIES IN ROBOTICS USING PATENT ANALYSIS AND MACHINE LEARNING....136
Movchan K. O.
METHODOLOGICAL ASPECTS OF STANDARDISATION OF A-UGV AUTONOMY LEVELS....146
Momot A. S., Nakonechnyi M. V., Galagan R. M., Muraviov O. V.
AUTOMATED MATERIAL CLASSIFICATION BASED ON TEMPERATURE PROFILES....153
Novikov P. V., Teslenko O. I., Beldii V. I., Bunke O. S.
MODELING OF THE WATER TEMPERATURE AUTOMATION SYSTEM OF A HIGH-POWER ELECTRODE BOILER WITH AN IMMERSED ELECTRODE....162
Pavlov V. G.
SEMANTIC AND LEXICAL FEATURES OF PROGRAM CODE DEVELOPMENT BY ARTIFICAL INTELLIGENCE....169
Pavlovskiy O. M., Platov I. M.
RESEARCH ON CODE GENERATION OF C/C++ COMPILER FOR HIGH-PERFORMANCE COMPUTING IN MICROPROCESSOR SYSTEMS....175
Petryshyn R. I., Sheketa V. I., Pavliv A. I., Kasianchuk I. P.
MODELING OF THE AUTOMATED PROCESSING OF LOGGING DATA FOR GEOPHYSICAL SURVEYS OF WELLS....183
Pshenychnyi O. Yu.
DEVELOPMENT OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE....193
Savchenko I. O., Matsko P. I.
A SYSTEMATIC APPROACH TO SUPPORTING DECISION-MAKING ON THREATS TO THE CRITICAL INFRASTRUCTURE USING EXPERT ASSESSMENT METHODS....199
Fedorovych V. I.
METHODS FOR IMPROVING THE ACCURACY OF DETECTING VISUAL ANOMALIES IN SOFTWARE BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE....206
Ciapa S. M.
INTEGRATION OF SENSOR DATA IN A-UGV SYSTEMS....214
Shapoval V. P., Tarasenko Ya. V.
METHOD OF INTELLIGENT VIDEO MONITORING OF PRIMARY SIGNS OF PSYCHOLOGICAL STATE....222
Sherstiuk I. O., Holubiev L. P.
RECOMMENDATION SYSTEM BASED ON AN IMPROVED CORRELATION ALGORITHM....228

CHEMICAL TECHNOLOGY

Holovenko V. O., Koval D. S., Yasnohor M. V., Prykhodko D. M., Andriianova M. V.
INFLUENCE OF THE PARAMETERS PROCESS ON PRODUCTS YIELD OF SOLID HOUSEHOLD WASTE PYROLYSIS....235
Dychko A. O., Yeremeyev I. S., Remez N. S., Barabash O. V., Minaieva Yu. Yu.
ANALYSIS OF RISKS TO THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF WATER TREATMENT....241
Kozhura O. V., Tsybulia Ye. O.
USE OF NITRIC OXIDE AS A CATALYST FOR THE OXYGEN OXIDATION OF SULFURIC ACID SOLUTIONS OF IRON(II) SULFATE....247
Kontsevoy A. L., Kontsevoi S. A.
THE INFLUENCE OF DEPOSITION CONDITIONS ON THE ACTIVITY OF THE IRON-CHROME CATALYST....256
Kostenko Ye. G., Shakhnovsky A. M., Obushenko T. I., Tolstopalova N. M., Sanginova O. V.
IRON-BASED SORBENTS FOR FLUORIDE REMOVAL....261

Kuchynska D.A., Ishchenko O.V.
STUDY OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOLUTIONS BASED ON LACTIC ACID-MODIFIED STARCH 270
Petrov S.V., Bondarenko S.G., Roshanpour Sh., Abramova A.O.
IMPROVED PLASMA CHEMICAL TECHNOLOGY FOR PRODUCING PLASMA-ACTIVATED WATER – LIQUID NITROGEN FERTILIZERS 276
Pylypenko T.M., Yefimova V.G., Kachorovskaya O.P., Mokhno B.O.
INVESTIGATION OF THE COMPOSITION OF FOOD PRODUCTS AND DETECTION OF SODIUM NITRITE AS FOOD ADDITIVE E 250 294
Polishchuk B.V., Mitina N.B.
ISSUES REGARDING THE DEVELOPMENT OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS 300
Sterenchuk S.M., Kachan R.V.
A REVIEW OF FORMS AND COMPOSITION OF THE SUNSCREEN 305
Shokota M.Yu., Kravchenko O.V., Huliaiev V.M., Kovalenko A.L.
RESEARCH AND IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF PRODUCING MAGNESIUM OXIDE FROM MAGNESIUM CHLORIDE SOLUTIONS USING THE AMMONIA SCHEME 312
Shokhin M.V., Gulyayev V.M., Kovalenko A.L.
STUDYING THE REGULARITIES OF SYNTHESIS OF FRICTION PRODUCTS BASED ON ELASTOMERIC MATERIALS AND WAYS TO INCREASE THEIR WEAR RESISTANCE 318

INFORMATION ABOUT AUTHORS 324

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.7.05
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/01

Рагулін С. В.
Херсонський державний аграрно-економічний університет

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІСЛЯГАРАНТІЙНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВОВАНИХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

Період післягарантійної експлуатації характеризується особливими фінансовими та організаційними взаємовідносинами між постачальником і експлуатантом. Тому у даній роботі запропоновано метод, що враховує основні техніко-економічні показники післягарантійного процесу технічного обслуговування і ремонту. Метод описується регенеруючим випадковим процесом з кінцевим числом станів. На підставі нього визначено середній час знаходження радіоелектронних навігаційних систем в різних станах експлуатації, що дозволяє отримати основні показники ефективності експлуатації радіоелектронних навігаційних систем. У період післягарантійної експлуатації експлуатант, як правило, має значний обсяг статистичної інформації про надійність радіоелектронних навігаційних систем. Тому в цей період є можливість оцінити інтенсивності виникнення як прихованих, так і явних відмов.

Ефективність експлуатації повітряних суден безпосередньо визначається оптимальним варіантом організації системи технічного обслуговування і ремонту, вибір якого ґрунтується на вирішенні комплексу завдань діагностичного забезпечення, методичного, нормативного забезпечення та оптимального формування обмінного фонду.

Для оцінки експлуатаційної надійності радіоелектронних навігаційних систем визначена необхідність оцінювати вірогідність відмови системи протягом польоту. Для цього в статті визначено експлуатаційну ймовірність безвідмовної роботи на нескінченному інтервалі планування технічного обслуговування з урахуванням показників достовірності контролю, періодичності контролю та інтенсивності явних і прихованих відмов.

Для оцінки ефективності різних варіантів організації технічного забезпечення експлуатації радіоелектронних навігаційних систем в післягарантійний період в роботі розроблені відповідні функції вартості, що враховують той факт, що після закінчення дії гарантійних зобов'язань постачальника експлуатант сам оплачує всі витрати, пов'язані з відновленням систем.

Для оцінки імовірнісних показників ефективності експлуатації резервованих систем та оцінці критичних відмов розроблено метод, що дозволяє враховувати множинні відмови резервованих радіоелектронних навігаційних систем.

Ключові слова: *системи контролю, ефективність, технічне обслуговування, легко замінні блоки, радіоелектронні навігаційні системи.*

Постановка проблеми. Найбільш значний влив на діяльність експлуатантів здійснює етап післягарантійного обслуговування оскільки основний фінансовий тягар по організації системи технічного обслуговування і ремонту лягає на плечі експлуатанта.

Таким чином, розробка методів підвищення ефективності експлуатації радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден в період післягарантійного обслуговування являє собою важливе народногосподарське наукове завдання спрямоване на удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту, зниження експлуатаційних витрат і підтримки необхідного рівня безпеки та регулярності польотів повітряних суден.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі приклади вирішення окремих завдань підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту в роботах колективу дослідників С. В. Далецького, В. О. Ігнатова, О. П. Ковтуненка, Г. Ф. Конаховича, О. А. Тамаргазіна, В. В. Уланського.

Значний внесок у вирішення завдань підвищення технічної експлуатації на різних етапах

експлуатації вніс І. О. Мачалін, який представив методологічні основи технічного обслуговування і ремонту повітряних суден. Проте питання, підвищення ефективності післягарантійного обслуговування висвітлені не повністю.

Постановка завдання. Розглянемо випадок, коли радіоелектронна навігаційна система (РЕНС) є одноблоковою, тобто включає в себе один легко замінний блок (ЛБ). Нехай в момент $t = 0$ починає функціонувати ЛБ, напрацювання якого до прихованої відмови Ξ розподілена за законом $F(\xi)$. Прихована відмова ЛБ можна виявитися тільки за результатами контролю працездатності (КП). У ЛБ може також виникнути явна відмова. Функція розподілу напрацювання до явної відмови R відома і дорівнює $\Phi(\rho)$. При появі явної відмови ЛБ відключається. Передбачається, що явні і приховані відмови є статистично незалежними.

Встановлюється наступний порядок технічного обслуговування (ТО). Якщо при використанні за призначенням у ЛБ сталася явна відмова, то в випадковий момент його виникнення починається відновлення працездатності ЛБ. При цьому час між моментом виникнення явної відмови і моментом посадки повітряного судна (ПС) виключається з розгляду, оскільки ЛБ відключений. Якщо при черговому КП виявляється прихована відмова, то проводиться відновлення працездатності правильно забракованого ЛБ. Нарешті, якщо при КП прийнято помилкове рішення про визнання непрацездатності ЛБ, який насправді є працездатним («помилкова відмова»), то проводиться «помилкове» відновлення працездатності ЛБ [1, 2].

Оскільки відновлення забракованого при КР ЛБ проводиться після посадки ПС в базовому аеропорту, то в межах розглянутої моделі таке відновлення будемо називати плановим. Відновлення після явної відмови назвемо позаплановим. Вважається, що будь-який з видів відновлення повністю оновлює ЛБ, і моменти закінчення відновлювальних робіт є моментами регенерації.

Розглянемо найбільш загальний випадок, при якому КП планується проводити в моменти $0 < t_1 < t_2 < \ldots < T_N < T$, якщо $T < \infty$ і в моменти $0 < t_1 < t_2 < \ldots$, якщо $T = \infty$.

Оскільки після відновлення ЛБ вважається оновленим, то проводиться перепланування моментів КП. Позначимо через ρ_j момент виникнення явної відмови у j-го *ЛБ*.Нехай: $T < \infty$. Тоді, якщо $\rho_j + t_1 \geq T$, то в момент T необхідно провести відновлення ЛБ. Якщо $\rho_j + t_k < T$ ($k = 1, 2, \ldots$; $k \leq N$), то при КП в момент $\rho_j + t_{k+1}$ приймаються наступні рішення:

– допустити ЛБ до використання до проведення чергового КП в момент $\rho_j + t_{k+1}$, якщо він визнаний працездатним, і $\rho_j + t_{k+1} < T$; в іншому випадку (якщо $\rho_j + t_{k+1} \geq T$) – в момент T провести відновлення *ЛБ*;

– відновити ЛБ, якщо він визнаний непрацездатним, і допустити його до використання. Черговий КП проводити в момент $\rho_j + t_{k+1} + t_1$, якщо $\rho_j + t_{k+1} + t_1 < T$, інакше (якщо $\rho_j + t_{k+1} + t_1 \geq T$) – в момент T провести відновлення *ЛБ*.

Якщо $T = \infty$, то при призначенні чергового моменту КП в описаній вище процедурі необхідно покласти $T = \infty$.

Розглянемо випадковий процес $L(t)$, що характеризує стан ЛБ в довільний момент часу t. З опису стратегії ТО випливає, що в довільний момент часу t ЛБ може перебувати в одному з наступних станів: E_1, якщо в момент t ЛБ використовувався за призначенням і знаходився в працездатному стані; E_2, якщо в момент t ЛБ використовувався за призначенням і знаходився в непрацездатному стані (прихована відмова); E_3, якщо в момент t ЛБ не використовувався за призначенням і проводився КП; E_4, якщо в момент t ЛБ не використовувався за призначенням і проводився його демонтаж або монтаж на борту ПС; E_5, якщо в момент t забракований ЛБ позапланово простоював на борту ПС в базовому аеропорту через незадоволення заявки на запасний ЛБ з обмінного фонду; E_6, якщо в момент t проводилося відновлення «помилково» забракованого ЛБ; якщо в момент t проводилося позапланове відновлення ЛБ, що відмовив; E_7, якщо в момент t проводилося відновлення «правильно забракованого» ЛБ.

Виклад основного матеріалу. Введемо в розгляд наступні показники достовірності багаторазового КП на нескінченному інтервалі планування ТО:

$$P_{XB}\left(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \middle| \xi\right) = P\left\{\bigcap_{i=1}^{v-1} \Xi_i^* > t_i \bigcap \Xi_v^* \leq t_v \middle| \Xi = \xi\right\}$$ – умовна ймовірність «помилкового відмови», що визначається як ймовірність спільного настання таких подій: при КП в моменти t_1, t_{v-1} $(v = \overline{1,k})$ *ЛБ* визнавався працездатним, а при КР в момент t_v був помилково забракований за умови, що $\Xi = \xi u$ $t_k < \xi < t_{k+1}$, де Ξ_i^* – випадкова оцінка напрацювання ЛБ до відмови при КП в момент t_i;

$$P_{ПП}\left(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k \middle| \xi\right) = P\left\{\bigcap_{v=1}^{k} \Xi_v^* > t_v \middle| \Xi = \xi\right\}$$ – умовна ймовірність події «ЛБ правильно визнаний працездатним» за умови, що $\Xi = \xi$ і $t_k < \xi < t_{k+1}$;

$$P_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\,\xi)=P\left\{\bigcap_{i=1}^{j-1}\Xi_i^*>t_i\bigcap\Xi_i^*\le t_j\,\Big|\,\Xi=\xi\right\}$$ – умовна ймовірність події «ЛБ правильно визнаний непрацездатним» за умови, що $\Xi=\xi$ і $t_k<\xi<t_{k+1}$;

визначається як ймовірність настання таких подій: при КП в моменти $\overline{t_1,t_k}$ *ЛБ* правильно визнавався працездатним; при КП в моменти $\overline{t_{k+1},t_{j-1}}$ *ЛБ* помилково визнавався працездатним, а при КП в момент $t_j\,(j=\overline{k+1,N})$ *ЛБ* був правильно визнаний непрацездатним за умови, що $(t_j,\,t_{j+1})$ и $\Xi=\xi$;

$$P_{НВ}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N\,|\,\xi)=P\left\{\bigcap_{i=1}^{N}\Xi_i^*>t_i\,\Big|\,\Xi=\xi\right\}$$ – умовна ймовірність події «невиявленої відмови», що представляє собою ймовірність того, що при КП в моменти $\overline{t_1,t_k}$ *ЛБ* правильно визнавався працездатним, а при КП в моменти $\overline{t_{k+1},t_N}$ помилково визнавався працездатним, що $\Xi=\xi$ і $t_k<\xi<t_{k+1}$;

Загальні вирази для розрахунку умовних ймовірностей $P_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\xi)$, $P_{ПП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k\,|\,\xi)$, $P_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\,\xi)$, $P_{НВ}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N\,|\,\xi)$ наведені в роботах [2,3].

Наступна теорема дозволяє визначити середні тривалості $\overline{MS_1,MS_8}$.

Теорема 1. Якщо $T<\infty$, то мають місце такі формули:

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_1

$$\begin{aligned}MS_1=&\sum_{k=0}^{N}\int_{t_j}^{t_{j+1}}\left\{\sum_{v=1}^{j}t_vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)+uP_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\,\vartheta)\right\}d\Phi(u)+\\&+\int_{t_k}^{\vartheta}\left\{\sum_{v=1}^{k}t_vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)+uP_{ПП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k\,|\,\vartheta)\right\}d\Phi(u)+\\&+\left\{\sum_{v=1}^{k}t_vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)+\vartheta P_{ПП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k\,|\,\vartheta)\right\}[1-\Phi(\vartheta)]\Bigg\}dF(\vartheta)+\\&+\int_{T}^{\infty}\left\{\sum_{j=0}^{N}\int_{t_j}^{t_{j+1}}\left\{\sum_{v=1}^{j}t_vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)+uP_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\,\vartheta)\right\}d\Phi(u)+\right.\\&\left.+\left\{\sum_{v=1}^{N}t_vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)+T\times P_{ПП}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N\,|\,\vartheta)\right\}[1-\Phi(T)]\right\}dF(\vartheta);\end{aligned}\qquad(1)$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_2

$$\begin{aligned}MS_2=&\sum_{k=0}^{N-1}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\int_{\vartheta}^{t_{k+1}}(u-\vartheta)P_{ПП}(\overline{t_1,t_{k-1}};t_k\,|\,\vartheta)d\Phi(u)+\right.\\&+\sum_{n=k+1}^{N}\int_{t_n}^{t_{n+1}}\left[\sum_{j=k+1}^{n}(t_j-\vartheta)P_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\,\vartheta)+(u-\vartheta)P_{НВ}(\overline{t_1,t_{n-1}};t_n\,|\,\vartheta)\right]d\Phi(u)+\\&+\left[\sum_{j=k+1}^{N}(t_j-\vartheta)P_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\,\vartheta)+(T-\vartheta)P_{НВ}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N\,|\,\vartheta)\right][1-\Phi(T)]dF(\vartheta)+\\&\left.+\int_{t_N}^{T}\left\{\int_{\vartheta}^{T}(u-\vartheta)P_{ПП}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N\,|\,\vartheta)d\Phi(u)+(T-\vartheta)P_{НВ}(\overline{t_1,t_{N-1}};t_N\,|\,\vartheta)[1-\Phi(T)]\right\}dF(\vartheta);\end{aligned}\qquad(2)$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_3

$$\begin{aligned}MS_3=&t_{КР}\sum_{k=0}^{N-1}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\sum_{j=0}^{k-1}\left[\sum_{v=1}^{j-1}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)+jP_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-2}};t_{j-1}\,|\,\vartheta)\right]\times\left[\Phi(t_{j+1})-\Phi(t_j)\right]\right\}+\\&+\sum_{j=k-1}^{k}\left[\sum_{v=1}^{j-1}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)+(j+1)P_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\,\vartheta)\right]\left[\Phi(t_{j+2})-\Phi(t_{j+1})\right]+\\&+\sum_{j=k+2}^{N-1}\left[\sum_{v=1}^{k}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)+\sum_{j=k+1}^{i-1}jP_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\,\vartheta)+iP_{НВ}(\overline{t_1,t_{i-2}};t_i\,|\,\vartheta)\right]+[\Phi(t_{i+1})-\Phi(t_i)]+\\&\left.\sum_{v=1}^{k}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)++\sum_{j=k+1}^{N-1}jP_{ПН}(\overline{t_1,t_{j-1}};t_j\,|\,\vartheta)+\left[NP_{НВ}(\overline{t_1,t_{N-2}};t_{N-1}\,|\,\vartheta)\right][1-\Phi(t_N)]\right\}dF(\vartheta)+\\&+t_{КР}\int_{t_N}^{\infty}\left\{\sum_{j=0}^{N-1}\left[\sum_{v=1}^{j-1}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)+jP_{ПП}(\overline{t_1,t_{j-2}};t_{j-1}\,|\,\vartheta)\right]\times\left[\Phi(t_{j+1})-\Phi(t_j)\right]\right\}+\\&\left.+\left[\sum_{v=1}^{N-1}vP_{ХВ}(\overline{t_1,t_{v-1}};t_v\,|\,\vartheta)+NP_{ПП}(\overline{t_1,t_{N-2}};t_{N-1}\,|\,\vartheta)\right][1-\Phi(t_N)]\right\}dF(\vartheta);\end{aligned}\qquad(3)$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_4

$$MS_4 = t_M + t_D; \quad (4)$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_5

$$MS_5 = \psi(\Delta t_{SP} + t_M + t_D - t_C); \quad (5)$$

$$\psi = \begin{cases} 0, \text{ if } t_C \geq (\Delta t_{SP} + t_D + t_M); \\ 1, \text{ if } t_C < (\Delta t_{SP} + t_D + t_M), \end{cases}$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_6

$$MS_6 = t_{ЛВ} \sum_{k=1}^{N-1} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^{k-1} \left[\sum_{v=1}^{j-1} P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v | \vartheta) \right] \times \\ \times \left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j) \right] \end{array} \right\} +$$

$$+ \sum_{j=1}^{k} P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v | \vartheta) \left[1 - \Phi(t_k) \right] dF(\vartheta) + \quad (6)$$

$$+ t_{ЛВ} \int_{t_N}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^{N-1} \left[\sum_{v=1}^{j} P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v | \vartheta) \right] + \\ + \left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j) \right] \\ + \sum_{k=1}^{N} P_{XB}(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k | \vartheta) \left[1 - \Phi(t_N) \right] \end{array} \right\} dF(\vartheta);$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_7

$$MS_7 = t_{BB} \sum_{k=0}^{N} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=0}^{k} P_{ПП}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j | \vartheta) \times \\ \times \left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j) \right] + \\ + \sum_{i=k+1}^{N} P_{HB}(\overline{t_1, t_{i-1}}; t_i | \vartheta) \times \\ \times \left[\Phi(t_{i+1}) - \Phi(t_i) \right] \end{array} \right\} dF(\vartheta) + \quad (7)$$

$$+ t_{BB} \int_{t_N}^{\infty} \left\{ \sum_{j=0}^{N} P_{ПП}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j | \vartheta) \left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j) \right] \right\} dF(\vartheta);$$

– для середнього часу знаходження ЛБ в стані E_8

$$MS_8 =$$

$$= t_{ПВ} \sum_{k=0}^{N} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=k+1}^{N} \left[\Phi(t_{i+1}) - \Phi(t_i) \right] + \\ + \sum_{i=k+1}^{j} P_{ПН}(\overline{t_1, t_{i-1}}; t_i | \vartheta) + \\ + P_{ПР}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j | \vartheta) \left[1 - \Phi(T) \right] \end{array} \right\} dF(\vartheta), \quad (8)$$

де Δt_{SP} – середній час затримки в задоволенні заявки на запасний *ЛБ*; ψ –індикаторна функція; t_{BB} – середня тривалість позапланового відновлення *ЛБ*.

Доведення. Для стислості викладу доведемо тільки співвідношення (1). Співвідношення (4) і (5) очевидні і не вимагають доказів. Решта співвідношення доводяться аналогічно (1). Нехай прихована відмова з'являється в ЛБ раніше, ніж явна, тобто $\xi \leq \rho$ і $t_k < \xi \leq t_{k+1} (k = \overline{0, N})$. Тоді умовне математичне очікування (МО) часу знаходження ЛБ в стані E_1 за умови, що $\Xi = \xi$, $R = \rho$ і $\xi \leq \rho$ визначається за формулою:

$$M\left[S_1 | \xi \leq \rho \right] = \begin{cases} \xi, \text{якщо } 0 \leq \xi < t_1; \\ \sum_{v=1}^{k} t_v P_{XB}\left(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v | \xi \right) + \\ + \xi P_{ПП}\left(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k | \xi \right), \\ \text{якщо } t_k \leq \xi < t_{k+1} \left(k = \overline{1, N} \right); \\ \sum_{v=1}^{k} t_v P_{XB}\left(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v | \xi \right) + \\ + \xi P_{ПП}\left(\overline{t_1, t_{N-1}}; t_N | \xi \right), \\ \text{якщо } \xi \geq T. \end{cases} \quad (9)$$

Приймемо, що $\xi > \rho$ і $t_k < \rho \leq t_{k+1}$. У цьому випадку ЛБ напрацює до моменту $t_v (v = \overline{0, k})$, якщо при v-му КП з умовною ймовірністю $P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v | \xi)$ виникне «хибна відмова». У подальшому ЛБ пропрацює час ρ, якщо при КП в момент t_k з умовною ймовірністю $P_{ПП}(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k | \xi)$ виникне подія «ЛБ правильно працездатний».

Таким чином, умовне математичне очікування часу знаходження ЛБ у стані E_1 при умові, що $\Xi = \xi$, $R = \rho i \xi > \rho$:

$$M\left[S_1 | \xi > \rho \right] = \begin{cases} \rho, \text{якщо } 0 \leq \xi < t_1; \\ \sum_{v=1}^{j} t_v P_{XB}\left(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v | \xi \right) + \\ + \rho P_{ПП}\left(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j | \xi \right), \\ \text{якщо } t_j \leq \rho < t_{j+1} \left(j = \overline{1, N} \right); \\ \sum_{v=1}^{N} t_v P_{XB}\left(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v | \xi \right) + \\ + \xi P_{ПП}\left(\overline{t_1, t_{N-1}}; t_N | \xi \right), \text{якщо } \rho \geq T. \end{cases} \quad (10)$$

Умовне математичне очікування часу знаходження ЛБ у стані E_1 при умові, що $\Xi = \xi$, $R = \rho$ визначається як:

$$M\left[S_1 | \xi, \rho \right] = \\ = \min\left\{ M\left[S_1 | \xi \leq \rho \right], M\left[S_1 | \xi > \rho \right] \right\}. \quad (11)$$

З виразу (11) видно, що час перебування ЛБ в стані E_1 є функцією двох випадкових величин Ξ і R. Тому МО часу перебування ЛБ в стані E_1:

$$MS_1 = \sum_{k=0}^{\infty}\sum_{j=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\int_{t_j}^{t_{j+1}} M\left[S_1 \middle| \vartheta, u\right] d\Phi(u) dF(\vartheta). \quad (12)$$

З урахуванням виразу (11) формулу (12) перетворимо до вигляду:

$$MS_1 = \sum_{k=0}^{N}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\begin{array}{l}\int_{t_j}^{t_{j+1}} M\left[S_1 \middle| \vartheta > u\right] d\Phi(u) + \\ \sum_{j=0}^{k-1} + \int_{t_k}^{\vartheta} M\left[S_1 \middle| \vartheta > u\right] d\Phi(u) + \\ + \int_{\vartheta}^{\infty} M\left[S_1 \middle| \vartheta \le u\right] d\Phi(u)\end{array}\right\} dF(\vartheta) + \quad (13)$$

$$\int_{T}^{\infty}\left\{\begin{array}{l}\sum_{j=0}^{N}\int_{t_j}^{t_{j+1}} M\left[S_1 \middle| \vartheta > u\right] d\Phi(u) + \\ + \int_{T}^{\infty} M\left[S_1 \middle| \vartheta \le u\right] d\Phi(u)\end{array}\right\} dF(\vartheta).$$

Підставивши в формулу (13) вирази (9) і (10) після відповідних перетворень, отримаємо співвідношення (1). Теорема доведена.

Наслідок 1. Якщо $T = \infty$, то мають місце наступні залежності:

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_1

$$MS_1 = \sum_{k=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\sum_{j=0}^{k-1}\int_{t_j}^{t_{j+1}}\left[\begin{array}{l} t_v P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \mid \vartheta) + \\ + u P_{ПП}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j \mid \vartheta)\end{array}\right]\right\} d\Phi(u) + \\ + \int_{t_k}^{\vartheta}\left\{\sum_{v=1}^{k} \begin{array}{l} t_v P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \mid \vartheta) + \\ + u P_{ПП}(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k \mid \vartheta)\end{array}\right\} d\Phi(u) + \quad (14) \\ + \left\{\sum_{v=1}^{k} \begin{array}{l} t_v P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \mid \vartheta) + \\ + \vartheta P_{ПП}(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k \mid \vartheta)\end{array}\right\}\left[1 - \Phi(\vartheta)\right]\Bigg\} dF(\vartheta);$$

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_2

$$MS_2 = \sum_{k=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\int_{\vartheta}^{t_{k+1}} (u - \vartheta) P_{ПП}(\overline{t_1, t_{k-1}}; t_k \mid \vartheta) d\Phi(u) + \right. \\ \left. + \sum_{n=k+1}^{\infty}\int_{t_n}^{t_{n+1}}\left[\sum_{j=k+1}^{n} \begin{array}{l} (t_j - \vartheta) P_{ПН}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j \mid \vartheta) + \\ + (u - \vartheta) P_{НВ}(\overline{t_1, t_{n-1}}; t_n \mid \vartheta)\end{array}\right] d\Phi(u)\right\} dF(\vartheta); \quad (15)$$

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_3

$$MS_3 = t_{КР}\sum_{k=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\begin{array}{l}\sum_{j=0}^{k-1}\left[\begin{array}{l}\sum_{v=1}^{j} v P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \mid \vartheta) + \\ + j P_{ПП}(\overline{t_1, t_{j-2}}; t_{j-1} \mid \vartheta)\end{array}\right] \times \\ \times\left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j)\right]\end{array}\right\} + \\ + \sum_{j=k-1}^{k}\left[\begin{array}{l}\sum_{v=1}^{j} v P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \mid \vartheta) + \\ + (j+1) P_{ПП}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j \mid \vartheta)\end{array}\right]\left[\Phi(t_{j+2}) - \Phi(t_{j+1})\right] + \quad (16) \\ + \sum_{j=k+2}^{\infty}\left[\begin{array}{l}\sum_{v=1}^{k} v P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \mid \vartheta) + \\ + \sum_{j=k+1}^{i-1} j P_{ПП}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j \mid \vartheta) + i P_{НВ}(\overline{t_1, t_{i-2}}; t_i \mid \vartheta)\end{array}\right] + \\ + \left[\Phi(t_{i+1}) - \Phi(t_i)\right]\Bigg\} dF(\vartheta)(\ );$$

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_6

$$MS_6 = t_{ЛВ}\sum_{k=1}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\begin{array}{l}\sum_{j=1}^{k-1}\left[\sum_{v=1}^{j} P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \mid \vartheta)\right] \times \\ \times\left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j)\right]\end{array}\right\} + \quad (17) \\ + \sum_{j=1}^{k} P_{XB}(\overline{t_1, t_{v-1}}; t_v \mid \vartheta)\left[1 - \Phi(t_k)\right]\Bigg\} dF(\vartheta);$$

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_7

$$MS_7 = t_{ВВ}\sum_{k=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\begin{array}{l}\sum_{j=0}^{k} P_{ПП}(\overline{t_1, t_{j-1}}; t_j \mid \vartheta) \times \\ \times\left[\Phi(t_{j+1}) - \Phi(t_j)\right] + \\ + \sum_{i=k+1}^{\infty} P_{НВ}(\overline{t_1, t_{i-1}}; t_i \mid \vartheta) \times \\ \times\left[\Phi(t_{i+1}) - \Phi(t_i)\right]\end{array}\right\} dF(\vartheta); \quad (18)$$

– для середнього часу знаходження *ЛБ* у стані E_8

$$MS_8 = t_{ПВ}\sum_{k=0}^{\infty}\int_{t_k}^{t_{k+1}}\left\{\begin{array}{l}\sum_{i=k+1}^{\infty}\left[\Phi(t_{i+1}) - \Phi(t_i)\right] + \\ + \sum_{i=k+1}^{j} P_{ПН}(\overline{t_1, t_{i-1}}; t_i \mid \vartheta)\end{array}\right\} dF(\vartheta). \quad (19)$$

Для доведення співвідношень (14)–(19) достатньо в виразах (1)–(3) та (6)–(8) підставити значення $T = \infty$ та $N = \infty$.

Синтез методу оцінок середнього часу знаходження легко знімних блоків в різних станах післягарантійної експлуатації при експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови.

У період післягарантійного ТО експлуатація РЕНС повинна розглядатися на інтервалі (0, T), де T – призначений ресурс. Оскільки значення T для сучасних РЕНС значно більший середнього часу безвідмовної роботи $\left(\frac{1}{\lambda}\right)$, то далі при визначенні показників ефективності вважається, що $T = \infty$. Проведені розрахунки показали, що при $T \geq 3\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ відносна похибка при визначенні показників ефективності при даному допущенні не перевищує 1 + 2 %.

Наслідок 2. Якщо $T = \infty$, $t_k = k\tau$ і $\omega(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, $f(t) = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t}$

$$P_{XB}\left(\overline{\tau,(v-1)\tau}; v\tau \middle| \xi\right) = \alpha(1-\alpha)^{v-1}, v = \overline{1,k}; \quad (20)$$

$$P_{ПП}\left(\overline{\tau,(k-1)\tau}; k\tau \middle| \xi\right) = \alpha(1-\alpha)^{v-1},\ k = 0,1,2,\ldots, \quad (21)$$

$$P_{ПН}\left(\overline{\tau,(j-1)\tau}; j\tau \middle| \xi\right) = (1-\alpha)^k \beta^{j-k-1}(1-\beta), \quad j = k+1, k+2, \ldots, \quad (22)$$

$$P_{НВ}\left(\overline{\tau,(n-1)\tau}; n\tau \middle| \xi\right) = (1-\alpha)^k \beta^{n-k}, \quad n = 1,2,\ldots, \quad (23)$$

То справедливі наступні вирази:

$$MS_1 = \frac{1-\exp\left[-(\lambda+\lambda_0)\tau\right]}{(\lambda+\lambda_0)\left[1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)\right]}; \quad (24)$$

$$MS_2 = \frac{1}{1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)} \times \left\{ \begin{array}{l} \exp(-\lambda_0\tau)\left[\begin{array}{l} \dfrac{\tau\left[1-\beta\exp\left[-(\lambda+\lambda_0)\tau\right]\right]}{1-\beta\exp(-\lambda_0\tau)} - \\ -\dfrac{1-\exp(-\lambda\tau)}{\lambda} \end{array}\right] + \\ + \dfrac{\lambda\left[1-\exp\left[-(\lambda+\lambda_0)\tau\right]\right]}{\lambda_0(\lambda+\lambda_0)} - \exp(-\lambda_0\tau) \times \\ \times\left[\tau + (\lambda\lambda_0)^{-1}(\lambda-\lambda_0)\left[1-\exp(-\lambda\tau)\right]\right] \end{array} \right\}; \quad (25)$$

$$MS_3 = \frac{t_{KP}\exp(-\lambda_0\tau)\left\{1-\beta\exp\left[-(\lambda+\lambda_0)\tau\right]\right\}}{\left\{1-\beta\exp\left[-\lambda_0\tau\right]\right\}\left[1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)\right]}; \quad (26)$$

$$MS_6 = \frac{t_{ЛВ}\alpha\exp\left[-(\lambda+\lambda_0)\tau\right]}{1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)}; \quad (27)$$

$$MS_7 = \frac{t_{ВВ}\left[1-\exp\left[-\lambda_0\tau\right]\right]\left[1-\beta\exp\left[-(\lambda+\lambda_0)\tau\right]\right]}{\left[1-\beta\exp\left[-\lambda_0\tau\right]\right]\left[1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)\right]}; \quad (28)$$

$$MS_8 = \frac{t_{ПВ}(1-\beta)\exp\left[-\lambda_0\tau\right]\left[1-\exp\left[-\lambda\tau\right]\right]}{\left[1-\beta\exp\left[-\lambda_0\tau\right]\right]\left[1-(1-\alpha)\exp(-\lambda\tau-\lambda_0\tau)\right]}; \quad (29)$$

де $\omega(t)$ і $f(t)$ – щільності розподілу ймовірностей (ЩРЙ) напрацювання ЛБ до прихованого і явної відмови відповідно; λ і λ_0 інтенсивність прихованих і явних відмов ЛБ відповідно.

Формули (24)–(29) виходять після підстановки у вирази (14)–(19) ЩРЙ (20) і умовних ймовірностей (21)–(23). В окремому випадку за відсутності явних відмов ($\lambda_0 = 0$) формули (24)–(29) приводяться до виразів (26)–(30).

Наслідок 3. Справедливі наступні нерівності:

$$0 < MS_2 < \min\left(\frac{\tau}{1-\beta}; \frac{\lambda}{\lambda_0(\lambda+\lambda_0)}\right); \quad (30)$$

$$0 < MS_3 < \max\left(\frac{t_{KP}}{\alpha}; \frac{t_{KP}}{1-\beta}\right);$$

$$0 < MS_6 < t_{ЛВ}; \quad (31)$$

$$0 < MS_7 < t_{ВВ};$$

$$0 < MS_8 < t_{ПВ}.$$

Нерівності (30)–(31) випливають з аналізу табл. 1, в якій наведено граничні значення виразів (24)–(29).

Приклад 1. Нехай $\tau = 4$ год, $\alpha = 0{,}001$, $\beta = 0{,}001$ і $\lambda = \lambda_0 = 0{,}25 \cdot 10^{-4}$ 1/год. Потрібно розрахувати значення оцінок зверху для MS_1 і MS_2.

$$MS_1 < \min\left(\frac{4}{1-0.002}; \frac{1}{0.5\cdot 10^{-4}}\right) = 2000 \text{ год.}$$

$$MS_2 < \min\left(\frac{4}{1-0.002}; \frac{0.25\cdot 10^{-4}}{0.25\cdot 10^{-4}\left(0.25\cdot 10^{-4}+0.25\cdot 10^{-4}\right)}\right) = 4 \text{ год.}$$

З наведеного прикладу випливає, що при КП високонадійного ЛБ з малою періодичністю, основну увагу слід приділяти зменшенню умовної ймовірності «помилкового відмови», оскільки при $\tau/\alpha < 1/(\lambda + \lambda_0)$ ЛБ з імовірністю, що дорівнює одиниці, не виробляє середнього часу безвідмовної роботи. Тому при заданому значенні $\lambda + \lambda_0$ співвідношення між параметрами α і τ має бути таким, щоб виконувалася нерівність:

$$\frac{\tau}{\alpha} \geq \frac{\lambda}{\lambda+\lambda_0} \quad (32)$$

На підставі нерівності (32) можна обґрунтувати вимогу безпосередньо до умовної ймовірності «помилкової відмови» вбудованої системи контролю (ВСК) при заданих значеннях λ, λ_0 і τ:

$$\alpha \leq \tau(\lambda + \lambda_0) \quad (33)$$

Таблиця 1

Граничні значення MS_i

MS_i	$\lambda_0 = 0$				$0 < \lambda < \infty, 0 < \lambda_0 < \infty$		$\lambda_0 = \infty$
	$0 < \tau < \infty$		$0 < \lambda < \infty$		$\tau = 0$	$\tau = \infty$	
	$\lambda = 0$	$\lambda = \infty$	$\tau = 0$	$\tau = \infty$			
MS_1	$\frac{\tau}{\alpha}$	0	0	$\frac{1}{\lambda}$	0	$\frac{\lambda}{\lambda+\lambda_0}$	0
MS_2	0	$\frac{\tau}{1-\beta}$	0	¥	0	$\frac{\lambda}{\lambda_0(\lambda+\lambda_0)}$	0
MS_3	$\frac{t_{KP}}{\alpha}$	$\frac{t_{KP}}{1-\beta}$	$\frac{t_{KP}}{\alpha}$	$\frac{t_{KP}}{1-\beta}$	$\frac{t_{KP}}{\alpha}$	0	0
MS_6	$t_{ЛВ}$	0	$t_{ЛВ}$	0	$t_{ЛВ}$	0	0
MS_7	0	0	0	0	0	t_{BB}	t_{BB}
MS_8	0	$t_{ПВ}$	0	$t_{ПВ}$	0	0	0

Наприклад, при вихідних даних прикладу 1, використовуючи нерівність (32), одержуємо, що величина умовної ймовірності «помилкової відмови» ВСК має задовольняти умові: $\alpha \le 0{,}0002$.

Висновки.

1. Розроблено метод побудови моделей процесу ТОіР РЕНС ПС на «нескінченному інтервалі планування ТО», що дозволяє отримати показники ефективності експлуатації РЕНС з урахуванням наявності як прихованих, так і явних відмов. Визначені стани, в яких може перебувати РЕНС в процесі післягарантійної експлуатації. З доведеної теореми 1, отримані математичні вирази для розрахунку середньої тривалості перебування ЛБ в кожному з станів при довільному законі розподілу часу безвідмовної роботи на нескінченному інтервалі часу планування ТО. Дані вирази, на відміну від відомих, враховують не тільки показники достовірності багаторазового КП і його періодичність, а й зовнішній прояв відмов, тобто наявність явних і прихованих відмов.

2. На підставі наслідку 2 виведені формули для визначення середньої тривалості знаходження РЕНС в різних станах при експоненціальному законі розподілу часу безвідмовної роботи. Вперше отримані формули для визначення нижніх і верхніх меж цієї тривалості з урахуванням зовнішнього прояву відмов, що дозволили встановити зв'язок між показниками достовірності, періодичністю КП і інтенсивностями явних і прихованих відмов ЛБ. Це дозволяє проводити оцінку ефективності експлуатації РЕНС при відсутності достатнього обсягу статистичної інформації про надійність систем. Показано, що для високонадійних систем при малій періодичності КП негативний вплив кінцевої достовірності КП в основному пов'язано з «хибними відмовами», а для систем з низькою надійністю при великій періодичності КП цей вплив буде обумовлено «невиявленими відмовами».

3. Розроблено метод визначення коефіцієнту готовності РЕНС для довільного і експоненціального законів розподілу часу напрацювання до явної і прихованого відмов на нескінченному інтервалі планування ТО. Дані результати дозволяють оцінити ефективність стратегії обслуговування РЕНС в період післягарантійного обслуговування й обґрунтувати вимоги до достовірності ВСК.

Список літератури:

1. Drenick R.F. The Failure Law of Complex Equipment. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1960. Vol. 8, no. 4. P. 680–690. URL: https://doi.org/10.1137/0108051 (date of access: 28.03.2025).

2. Cox D.R. Renewal theory. London : Methuen, 1960. 247 p.

3. Kumar U.D. Reliability, Maintenance and Logistic Support: – A Life Cycle Approach. Boston, MA : Springer US, 2000. 490 p.

4. Scarf P.A., Deara M. Block replacement policies for a two-component system with failure dependence. *Naval Research Logistics*. 2003. Vol. 50, no. 1. P. 70–87. URL: https://doi.org/10.1002/nav.10051 (date of access: 28.03.2025).

5. Rausand M., Hoyland A. System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2013. 672 p.

Rahulin S. V. DEVELOPMENT OF METHODS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF POST-WARRANTY OPERATION OF REDUNDANT RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS

The period of post-warranty operation is characterized by special financial and organizational relationships between the supplier and the operator. Therefore, this work proposes a method that takes into account the main technical and economic indicators of the post-warranty process of maintenance and repair. The method is described by a regenerating random process with the final number of states. On the basis of it, the average location of radio electronic navigation systems in different operating conditions is determined, which allows to obtain the main indicators of efficiency of operation of radio electronic navigation systems. During the post-warranty operation, the operator, as a rule, has a considerable amount of statistical information on the reliability of radio electronic navigation systems. Therefore, during this period it is possible to assess the intensity of the occurrence of both hidden and obvious refusals.

The efficiency of operation of aircraft is directly determined by the optimal variant of the organization of the system of maintenance and repair, the choice of which is based on solving a complex of tasks of diagnostic support, methodological, regulatory support and optimal formation of the exchange fund.

To evaluate the operational reliability of radio electronic navigation systems, there is a need to evaluate the likelihood of system failure during the flight. For this purpose, the article specifies the operational probability of failure to work at the endless planning of maintenance, taking into account the indicators of the accuracy of control, the frequency of control and the intensity of obvious and hidden failures. In order to evaluate the efficiency of different options for the organization of technical support of radio-electronic navigation systems in the post-warranty period, the corresponding functions of value were developed in operation, taking into account the fact that after the end of the guarantee obligations of the supplier, the operator himself pays for all the costs associated with the restoration of systems.

To evaluate the probabilistic indicators of the efficiency of operating systems and evaluation of critical failures, a method was developed, which allows to take into account multiple refusals of rewarding radio-electronic navigation systems.

Key words: *control systems, restoration, efficiency, easily replaceable blocks, radio electronic navigation systems.*

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.942
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/02

Барабаш О. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

Свинчук О. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

Шуклін Г. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

Копійка О. В.
Інститут прикладних систем управління Національної академії наук України

ВЕБЗАСТОСУНОК ДЛЯ ДИНАМІЧНОГО ПЕРЕРОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ

У статті розглянуто проблему функціональної стійкості інформаційних систем енергетичних мереж, зокрема питання автоматичного перерозподілу навантаження для забезпечення стабільної та ефективної роботи систем. Запропоновано підхід до балансування навантаження, що ґрунтується на використанні вебзастосунку, який дозволяє динамічно розподіляти задачі між серверами відповідно до їхнього поточного стану та навантаження. Проаналізовано існуючі методи балансування навантаження, включаючи статичні, динамічні та гібридні підходи, а також їхнє застосування в енергетичних інформаційних системах. Визначено основні переваги та недоліки кожного методу з точки зору ефективності, адаптивності та обчислювальних витрат. Описано алгоритми, що реалізовані у вебзастосунку, та підходи до їхнього вибору залежно від особливостей системи та вимог до продуктивності. Розроблений вебзастосунок дозволяє в реальному часі моніторити стан серверів та автоматично здійснювати перерозподіл завдань у разі виявлення перевантаження або відмови окремих вузлів. Запропоноване рішення сприяє підвищенню надійності інформаційних систем, оптимізації використання ресурсів та зниженню ризику збоїв у роботі критичної інфраструктури. Застосування таких підходів у системах енергетичних мереж дозволить не лише підвищити ефективність їхнього функціонування, а й зменшити витрати на експлуатацію за рахунок раціонального розподілу навантаження між серверами. Окрім того, реалізація методів балансування у вигляді вебзастосунку робить можливим інтеграцію запропонованого рішення з існуючими інформаційними системами, що використовуються в енергетичному секторі. Перспективним напрямом подальших досліджень є вдосконалення механізмів прогнозування навантаження, застосування методів машинного навчання для адаптації методів балансування, а також інтеграція розробленого вебзастосунку з хмарними обчислювальними платформами для забезпечення масштабованості системи.

Ключові слова: *вебзастосунок, інформаційна система, функціональна стійкість, енергетичні мережі, перерозподіл навантаження, методи балансування, графи, ймовірність.*

Постановка проблеми. У сучасних інформаційних системах енергетичних мереж стабільність та безперебійність роботи є критично важливими факторами, особливо під впливом небезпечних зовнішніх і внутрішніх загроз. Одним із ключових аспектів, що забезпечує надійність таких систем, є функціональна стійкість – здатність системи продовжувати виконувати свої функції в умовах

змінного навантаження, збоїв окремих компонентів або кібератак. Багато наукових робіт присвячено вивченню забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем та мереж [1–3]. Розроблені методології забезпечення функціональної стабільності об'єктів критичної інфраструктури [4], запропоновані методи для забезпечення відмовостійкості інформаційної системи та методи для діагностики її несправностей [5–6]. Функціональна стійкість відіграє важливу роль в різних системах: для екологічного моніторингу [7–8], в енергетичних мережах [9], в транспортних мережах [10–11], в промисловій інфраструктурі [12], для об'єктів критичної інфраструктури [13], де висока доступність і надійність є необхідною умовою безперервної роботи, для розробки та вдосконалення веб-сайті й мобільних додатків [14–15].

Ефективне балансування навантаження запобігає перенавантаженню серверів, підвищує продуктивність і надійність систем. У даній статті буде розглянуто основні принципи балансування навантаження, типи балансувальників та їх вплив на функціональну стійкість вебзастосунку, який буде розроблено для керування енергетичною мережею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для забезпечення функціональної стійкості інформаційної системи впровадження ефективних механізмів балансування навантаження між вузлами-серверами дозволяє досягти максимальної ефективності використання ресурсів, знизити час обробки запитів, а також забезпечити стабільність системи у разі збільшення навантаження чи виходу з ладу окремих вузлів.

Існують різні методи для розподілу завдань між вузлами системи [16–17]. Деякі методи пропонують пріоритетність завдань, тоді як інші розподіляють баланс відповідно до довжини завдання. Науковцями всього світу проводяться дослідження щодо існуючих методів перерозроділу навантаження в системі та їх вдосконалення або створення нових [18–19]. Такі дослідження дають іншим дослідникам цінну інформацію про останні досягнення в галузі балансування навантаження для розвитку нових напрямків досліджень [20].

Провідні компанії, як Amazon і Google, успішно використовують балансувальники навантаження для масштабованості та стійкості своїх хмарних сервісів, забезпечуючи безперебійну роботу навіть при високих навантаженнях [21–22].

У сучасних інформаційних системах енергетичних мереж і загалом в IT-інфраструктурах широко використовуються балансувальники навантаження для забезпечення стійкої та ефективної роботи систем. Розглянемо найпопулярніші з них для встановлення їхніх переваг та недоліків, на основі яких можна буде спроєктувати власну систему.

NGINX – продуктивний балансувальник навантаження з підтримкою HTTP(S) і TCP/UDP. Забезпечує гнучкість, інтеграцію з Docker і Kubernetes, але потребує додаткових інструментів для моніторингу [23].

HAProxy – потужний балансувальник навантаження з підтримкою HTTP(S) і TCP. Забезпечує безпеку, стабільність і контроль трафіку, але вимагає ручного налаштування, що ускладнює роботу для початківців. Крім того, динамічне управління трафіком потребує додаткових інструментів [24].

F5 BIG-IP – потужне рішення для балансування навантаження з глибоким контролем трафіку та розширеною безпекою. Підтримує API-автоматизацію та інтеграцію, але має високу вартість і складне налаштування [25].

Google Cloud Load Balancer – хмарне рішення для глобального балансування трафіку з автоматичним масштабуванням. Забезпечує високу продуктивність, але залежить від Google Cloud і може бути складним у налаштуванні [22].

Проаналізувавши популярні наявні рішення, було виявлено, що існуючі рішення ефективні, але дорогі, складні в налаштуванні та потребують додаткових інструментів. Дослідження не враховують специфіку архітектури систем і не дають чітких рекомендацій щодо методів оцінки.

Постановка завдання. Метою статті є розробка програмного забезпечення для ефективного перерозподілу навантаження в інформаційних системах енергетичних мереж на основі сучасних методів балансування.

Виклад основного матеріалу. Методи перерозподілу навантаження можна поділити за інформацією про стан системи [26]:

– статичні – використовують фіксовані правила, незалежні від поточного стану системи. Вони вимагають попередніх даних про ресурси кожного вузла та не підходять для динамічних систем. Оптимальна робота можлива лише за незначних коливань навантаження. Хоча такі алгоритми прості у використанні, вони часто не враховують підключені сервери, що спричиняє дисбаланс ресурсів. Отже, вони ефективні лише для стабільних систем, але не адаптуються до змін;

– динамічні – приймають рішення в реальному часі, враховуючи поточний стан системи.

Вони дозволяють передавати завдання з перевантажених вузлів на менш завантажені, регулярно оцінюючи робоче навантаження. Система обмінюється даними про стан вузлів і перерозподіляє ресурси під час виконання завдань. Ці методи більш адаптивні, ніж статичні, але потребують додаткових обчислювальних ресурсів;

– гібридні методи – поєднують переваги статичних і динамічних алгоритмів, оптимізуючи управління вузлами та підвищуючи ефективність. При перевантаженні вузол перенаправляє нове завдання на менш завантажений. Водночас ці методи мають затримки у передачі та плануванні, що потребує вдосконалення.

Отже, ефективне балансування навантаження може мінімізувати використання ресурсів, що призведе до додаткової економії споживання енергії. Розглянемо класифікацію статистичних та динамічних методів перерозподілу навантаження.

Класифікація статистичних балансувальників:

1) за методом розподілу навантаження – round-robin (черговий принцип), розподіл за IP-адресою, розподіл за типом задач;

2) за типом ресурсу, що розподіляється – обчислювальні та мережеві ресурси;

3) за архітектурою системи – централізовані та розподілені балансувальники.

Класифікація динамічних балансувальників:

1) за методом балансування – розподіл на основі стратегії, пріоритетне навантаження;

2) за рівнем інтеграції – внутрішні та зовнішні балансувальники;

3) за способом моніторингу – активні та пасивні балансувальники.

Отже, статистичні та динамічні балансувальники мають широкий спектр використання під свої специфічні потреби. У таблиці 1 наведено ключові відмінності статичних та динамічних балансувальників навантаження.

Отже, статистичні та динамічні балансувальники мають свої характеристики та переваги, зокрема у контексті енергетичних мереж. Це дозволяє створити надійнішу, гнучкішу та продуктивнішу інфраструктуру, здатну впоратися з різноманітними викликами, які ставлять перед нею умови сучасного ринку.

Під час розроблення власного вебзастосунку були обрані і статистичні, і динамічні методи балансування.

Статистичні балансувальники будуть використовуватися:

– на початкових етапах розподілу задач між вузлами, створюючи базову систему управління навантаженням для рівномірного розподілу ресурсів;

– при стабільному або передбачуваному навантаженні, оскільки вони не адаптуються до змін у реальному часі. Наприклад, якщо вузли відповідають за конкретні типи завдань, статичний підхід знижує складність системи та забезпечує стабільність. Проте у разі різкого зростання навантаження або збою ефективність може знижуватися;

– для рівномірного розподілу запитів у енергетичних системах, коли кожен тип запиту спрямовується на сервер, що спеціалізується на його обробці;

– для підвищення продуктивності та надійності, розподіляючи ресурси відповідно до потужності серверів. Завдання з вищими вимогами спрямовуються на потужні вузли, а простіші – на менш потужні, що забезпечує ефективне використання ресурсів.

Динамічні балансувальники будуть використовуватися:

– для ефективного розподілення навантаження між вузлами, забезпечуючи стабільну роботу системи навіть у випадках різких коливань навантаження;

– для швидкого реагування на збої в роботі окремих серверів, перенаправляючи запити на доступні ресурси, що значно підвищує надійність системи.

Даний вибір балансувальників зумовлений необхідністю адаптації до змін навантаження в енергомережах. Динамічний балансувальник

Таблиця 1

Порівняння балансувальників навантаження

Параметри	Статистичне балансування	Динамічне балансування
Коливання вхідного навантаження у системі	Низьке	Високе
Розподіл трафіку між серверами	Рівномірний	Динамічний
Глибокі знання про доступні ресурси системи	Вимагаються	Не обов’язкові
Потреба комунікації з серверами у реальному часі	Наявна	Відсутня
Можливість перерозподілу навантаження у реальному часі	Відсутня	Наявна для зменшення недостатньо навантажених серверів

оперативно оптимізує ресурси, запобігаючи перевантаженню серверів, тоді як статистичний підходить для обмежених ресурсів. Гнучка зміна методів розподілу підвищує надійність і адаптивність системи.

Були обрані такі методи перерозподілу: статистичні (Round robin, Weighted round robin connection, IP hash, Domain hash, Randomizer connection) та динамічні (Weighted least connection, Least connection, Weighted response time, Resource based, Shortest Job Next).

Для побудови програмного забезпечення було використано клієнт-серверну архітектуру. Це система, що зберігає, контролює та надає ресурси і сервіси за запитом клієнта. У такій системі будь-яка взаємодія здійснюється за допомогою мережі. На рисунку 1 продемонстровано схему такої архітектури.

Клієнтом може бути будь-який пристрій збору даних (датчики на підстанціях, лініях електропередач та інших елементах енергетичної мережі, системи моніторингу та діагностики, лічильники) або програмне забезпечення, яке надсилає запити на сервер для отримання даних, їх збереження, виконання обчислень тощо. Зазвичай клієнт реалізований у вигляді браузера або мобільного застосунку. Сервером може бути центральний сервер управління, сервери баз даних, сервери додатків, тобто пристрій, який приймає запити від клієнта, обробляє їх і надає відповідь. Клієнт і сервер можуть бути представлені як одним пристроєм, так і різними, що взаємодіють через мережеві протоколи, такі як HTTP, FTP або SMTP. Така архітектура забезпечує ефективний розподіл ресурсів, централізовану обробку інформації та масштабування застосунку для обслуговування різної кількості клієнтів.

Було розроблено веб-застосунок для моніторингу та управління системою вузлів-серверів, що виконують завдання, отримані через REST-запити. Завдання автоматично розподілятимуться між вузлами за допомогою балансувальника навантаження.

Основні функції вебзастосунку:

– моніторинг стану вузлів: відображення навантаження, часу роботи, використання ресурсів та доступності;

– редагування конфігурації вузлів: додавання, видалення та налаштування параметрів вузлів;

– розподіл завдань: автоматичний розподіл завдань між вузлами з урахуванням пріоритетів та навантаження;

– перерозподіл завдань: автоматичний перерозподіл завдань у разі виходу вузла з ладу.

Застосунок забезпечує функціональну стійкість інформаційної системи енергетичної мережі, дозволяючи оперативно реагувати на зміни та дестабілізуючі фактори. Передбачена інтеграція із зовнішніми системами для збору та аналізу даних у реальному часі.

Для ефективної роботи системи розподілу навантаження необхідна наявність доступу до мережі Інтернет на пристрої або сервері, де розміщено застосунок. Оскільки система повинна оперувати актуальними даними, а нові завдання надходять з різних джерел (наприклад, з місцевої підстанції) через Інтернет, стабільне з'єднання є критично важливим як для відправника, так і для

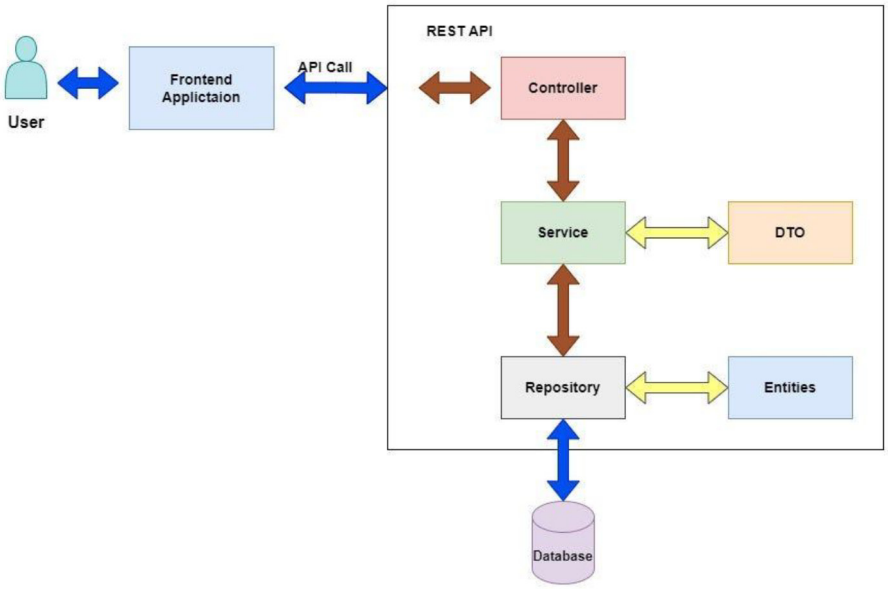


Рис. 1. Архітектура застосунку

отримувача. Крім того, всі відправники повинні бути ознайомлені з API системи, тобто необхідно чітко визначити, що і в якому форматі слід передавати до фінальної системи, яка відповідає за розподіл навантаження між своїми вузлами.

Після входу на сайт користувач потрапляє на головну сторінку з навігаційним меню та лаконічним описом функціоналу. Він переходить до розділу «Мережі» за допомогою навігації. Тут користувач може:

– створити нову мережу, задавши їй унікальну назву та обравши метод розподілу навантаження;

– переглянути список вже зареєстрованих мереж;

– відредагувати назву або метод розподілу навантаження для будь-якої з існуючих мереж;

– видалити мережу.

Про кожну мережу можна отримати детальну інформацію: мінімальне, максимальне та середнє навантаження, сумарний час виконання задач та скільки їх вже було виконано, статистика функціонуючих вузлів (рис. 2).

Користувач може переглянути стан системи у вигляді графового представлення (рис. 3). Граф відображає актуальну інформацію про кожну мережу: вузли (трикутники) та задачі (квадрати), присвоєні до них. Мережі представлені колами. Користувач може переглядати поточний стан мереж, змінювати положення елементів та оновлювати сторінку для відображення змін.

У розділі «Вузли» користувач може створювати нові вузли для будь-якої з мереж, представлених у системі. Для створення вузла необхідно вибрати бажану мережу, задати початковий стан, вказати місткість, вагу, ймовірність виходу з ладу та порт. Усі створені вузли відображаються в меню «Список». Кожен вузол у списку має фон, колір якого відповідає його поточному стану. Користувач також має можливість вручну змінювати стан та інші характеристики вузла, або видалити його з системи. Візуальне представлення сторінки наведено на рисунку 4.

У розділі «Методи» користувач може зареєструвати метод, який має бути попередньо реалізований у застосунку (рис. 5). Важливо, щоб усі алгоритми мали однакову структуру та були правильно оголошені, щоб на них можна було посилатися через інтерфейс. Для цього потрібно

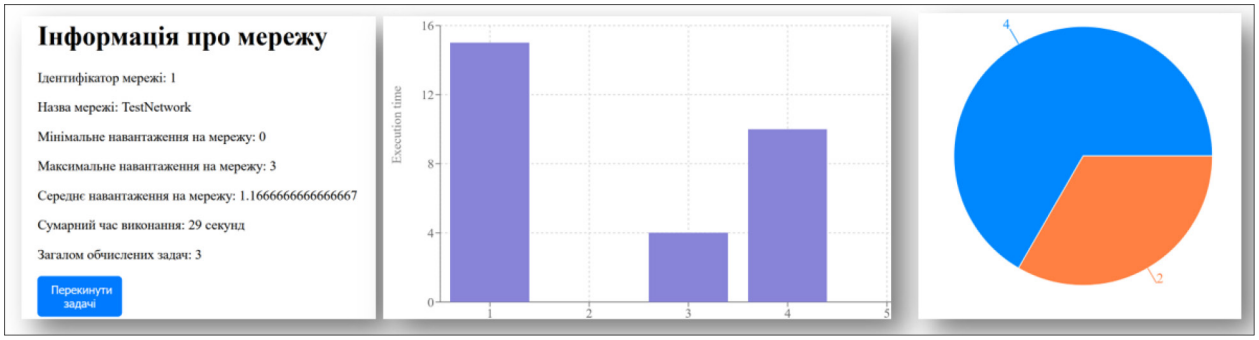


Рис. 2. Інформація про мережу

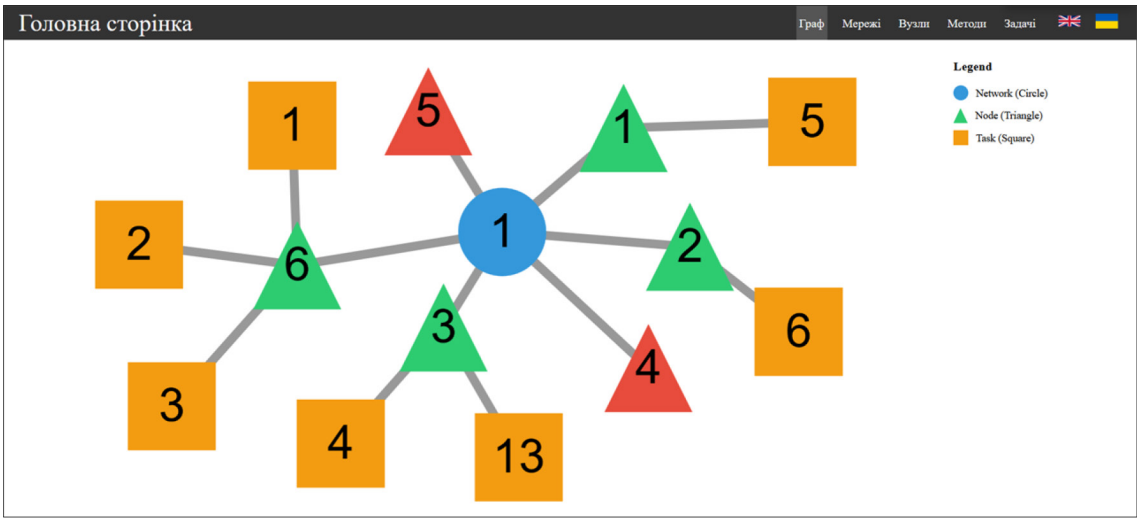


Рис. 3. Графове представлення системи

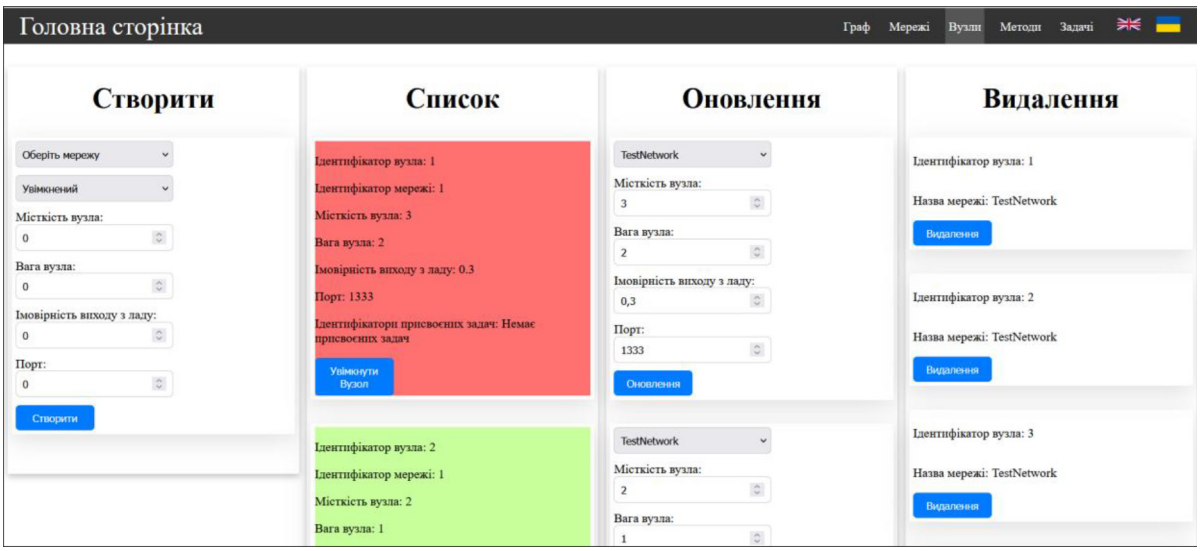


Рис. 4. Керування вузлами

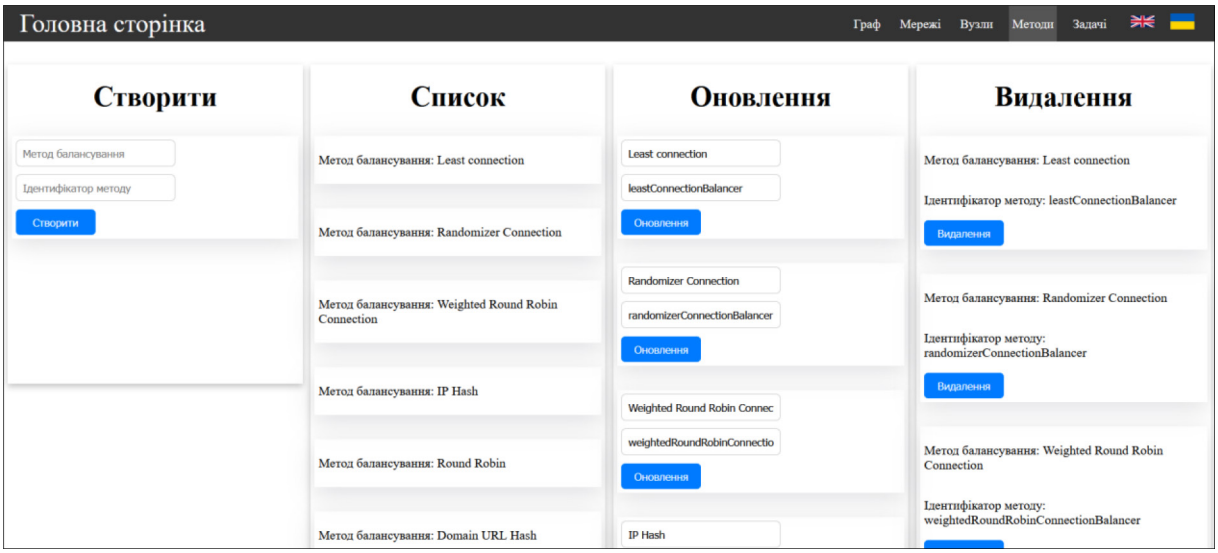


Рис. 5. Налаштування методів

вказати назву, яку розробник дав відповідному алгоритму, як ідентифікатор. Якщо назви не збігаються, перерозподіл не відбудеться. Аналогічно, на цій сторінці можна переглядати, редагувати та видаляти вже зареєстровані методи.

У розділі «Завдання» користувач може емулювати завдання з зовнішніх джерел. Тут можна реєструвати нові задачі, переглядати існуючі та видаляти їх. На відміну від інших розділів, тут неможливо оновити задачу. Це пов'язано з тим, що після призначення задачі вузлу починається її виконання та облік часу. Зміна будь-якого поля задачі потребуватиме її перезапуску, що призведе до неоднозначності та негативно вплине на процеси системи, що залежать від поточних даних. У реальних умовах ці дані можуть заповнюватися автоматично пристроєм-датчиком, який збирає інформацію та надсилає її на сервер для перерозподілу.

У результаті розробки було створено застосунок, який дозволяє аналізувати та тестувати обрані методи розподілу навантаження, моделювати вихід з ладу частини системи та перевіряти перерозподіл завдань у подібних ситуаціях. Створений застосунок надає користувачеві можливість створювати та налаштовувати мережі розподілу навантаження відповідно до поставлених завдань. Реалізовані функції перерозподілу навантаження нових завдань та завдань вузла, що вийшов з ладу, дають змогу аналізувати та визначати ефективність обраних алгоритмів.

Отже, розроблений застосунок є ефективним інструментом для аналізу, тестування та конфігурування мереж розподілу навантаження, а також

для моделювання та дослідження сценаріїв відмови системи.

Висновки. У статті досліджено проблему стійкості інформаційних систем енергомереж через ефективне балансування навантаження. Проаналізовано методи розподілу, їхні переваги й недоліки, а також обґрунтовано вибір підходів для вебзастосунку, що автоматично керує навантаженням. Розроблений вебзастосунок адаптивно перерозподіляє навантаження в реальному часі, зменшуючи ризик перенавантаження серверів та забезпечуючи безперебійну роботу. Поєднання статичних і динамічних методів дозволяє обирати алгоритм залежно від умов системи.

Запропоноване рішення підходить для систем різної складності, підвищуючи стабільність критичної інфраструктури. Подальші дослідження можуть зосередитися на вдосконаленні адаптивного балансування, інтеграції з машинним навчанням і прогнозуванні навантаження..

Список літератури:

1. Mashkov O., Kosenko V. Ensuring of functional stability of difficult dynamic systems as one of urgent scientific tasks of modern theory of automatic control. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2015. Vol. 5, no. 3. P. 39–42. https://doi.org/10.5604/20830157.1166550

2. Mashkov O., Chumakevych V., Sokulsky O., Chyrun L. Features of determining controlling effects in functionally-stablesystems with the recovery of a control. *Mathematical Modeling And Computing*. 2019. Vol. 6, no. 1. P. 85–91. http://doi.org/10.23939/mmc2019.01.085

3. Mashkov O.A., Chumakevich V.A., Mamchur Yu.V., Kosenko V.R. The method of inverse problems of dynamics for the synthesis of a system of stabilization of the movement of a dynamic object on operatively programmable trajectories. *Mathematical Modeling And Computing*. 2020. Vol. 7, no. 1. P. 29–38. http://doi.org/10.23939/mmc2020.01.029

4. Barabash, O., Sobchuk, V., Musienko, A., Laptiev, O., Bohomia, V., Kopytko, S. System Analysis and Method of Ensuring Functional Sustainability of the Information System of a Critical Infrastructure Object. In: Zgurovsky, M., Pankratova, N. (eds.). *System Analysis and Artificial Intelligence. Studies in Computational Intelligence*. 2023. Vol. 1107. Springer, Cham. P. 117–192. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37450-0_11

5. Peng S.-L., Lin C.-K., Tan J.J.M. and Hsu L.-H. The g-Good-Neighbor Conditional Diagnosability of Hypercube under PMC Model. *Applied Mathematics and Computation*. 2012. Vol. 218, no. 21. P. 10406–10412. https://doi.org/10.1016/j.amc.2012.03.092

6. Yuan J., Liu A., Ma X., Liu X., Qin X. and Zhang J. The g-Good-Neighbor Conditional Diagnosability of k-Ary n-Cubes under the PMC Model and MM Model. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2015. Vol. 2, no. 4. P. 1165–1177. http://doi.org/10.1109/TPDS.2014.2318305

7. Barabash O., Svynchuk O., Bandurka O., Ilin O. Information system for detection of parameters of dangerous industrial facilities based on geoinformation technologies. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. 2024. Vol. 14, no. 3. P. 9–14. https://doi.org/10.35784/iapgos.6093

8. Карпенко М.І., Чумаченко С.М., Мошенський А.О., Гуйда О.Г. Аргументація ефективності альтернативних засобів моніторингу на прикладі Meshtastic та APRS. Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки, 2024, Том 35 (74), № 5. С. 154–160. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/24

9. Barabash O., Svynchuk O., Salanda I., Mashkov V., Myroniuk M. Ensuring the Functional Stability of the Information System of the Power Plant on the Basis of Monitoring the Parameters of the Working Condition of Computer Devices. *Advanced Information Systems*. 2024. Vol. 8, no. 2. P. 107–117. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.12

10. Бандурка О., Романів Р., Свинчук О. Архітектура розподіленої функціонально стійкої системи моніторингу транспортних засобів на базі блокчейн-технології. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025, № 1. С. 86–96. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-11

11. Кисельов В.Б., Лановий О.Т., Кошарний О.М. Математичне моделювання впливу функціонування мережі автомобільних доріг на економіку України. Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки, 2022, Том 33(72), № 1. С. 300–307. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/46

12. Собчук В.В., Мусієнко А.П., Ільїн О.Ю. Аналіз використання ієрархічної структури для забезпечення функціональної стійкості автоматизованої системи управління підприємством. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2018. № 4(61). С. 53–61. http://doi.org/10.31673/2412-4338.2018.045361

13. Laptiev O., Barabash, O., Tsyganivska I., Obidin D., Sobchuk, A. The method of construction of the law of safety management of critical infrastructure objects under the conditions of external uncontrolled influences. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023. Vol. 3624. P. 291–300. https://ceur-ws.org/Vol-3624/Paper_24.pdf

14. Дроменко В.Б., Пилипенко Ю.М., Кисельов В.Б. Застосування рекурсивних алгоритмів і функцій по декількох змінних при організації циклічних процесів. Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки, 2023, Том 34(73), № 3. С. 136–140. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.1/21

15. Василенко В. М., Карпенко М. І., Скибінський А. С., Гуйда О. Г. Аналіз переваг та обмежень Low-Code платформ на прикладі Webflow.com. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2024, Том 35(74), № 2. С. 65–70. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/09

16. Shafiq D. A., Jhanjhi N., Abdullah A. Load balancing techniques in cloud computing environment: a review. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022. Vol. 34, no. 7. P. 3910–3933. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.02.007

17. Барабаш О. В., Свинчук О. В., Шуклін Г. В. Алгоритм перерозподілу навантаження для забезпечення функціональної стійкості розподілених вебзастосунків. *Зв'язок*. 2024. № 5. С. 3–11. https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.050183

18. Gupta Y. Novel distributed load balancing algorithms in cloud storage. Expert Systems with Applications. 2021. Vol. 186. 115713. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115713

19. Velpula P, Pamula R. EBGO: an optimal load balancing algorithm, a solution for existing tribulation to balance the load efficiently on cloud servers. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81, no. 24. P. 34653–34675. https://doi.org/10.1007/s11042-021-11012-w

20. Ahmed M. K., Salman S. A., Abdulhammed O. Y. Load balancing techniques in cloud computing: A review. *Samarra Journal of Pure and Applied Science*. 2024. Vol. 6, no. 1. P. 223–250. https://doi.org/10.54153/sjpas.2024.v6i1.526

21. AWS Elastic Load Balancing Documentation. Amazon Web Services. URL: https://surl.lu/cwxdzs (дата звернення: 11.03.2025).

22. Google Cloud: Load Balancing Overview. Google Cloud Documentation. URL: https://cloud.google.com/load-balancing (дата звернення: 11.03.2025).

23. Nginx Load Balancing Documentation. Nginx. URL: https://surl.li/naqlzs (дата звернення: 11.03.2025).

24. HAProxy config tutorials. URL: https://surl.li/ckcvaf (дата звернення: 11.03.2025).

25. BIG-IP Administrator Guide v4.0: Inbound Load Balancing. F5 Networks. URL: https://surl.li/qfemrm (дата звернення: 11.03.2025).

26. Chen S. L., Chen Y. Y., Kuo S. H. CLB: A novel load balancing architecture and algorithm for cloud services. *Computers & Electrical Engineering*. 2017. Vol. 58. P. 154-160. https://doi.org/10.54153/sjpas.2024.v6i1.526

Barabash O. V., Svynchuk O. V., Shuklin G. V., Kopiika O. V. WEB APPLICATION FOR DYNAMIC LOAD REDISTRIBUTION IN INFORMATION SYSTEMS OF ENERGY NETWORKS

This paper addresses the issue of functional resilience in information systems for energy networks, specifically focusing on the problem of automatic load redistribution to ensure stable and efficient system operation. As energy networks become increasingly complex, ensuring reliable data processing and task execution requires adaptive and intelligent load-balancing mechanisms. To tackle this challenge, a load-balancing approach is proposed, based on the use of a web application that dynamically distributes tasks among servers according to their current state, workload, and performance metrics. Existing load-balancing methods, including static, dynamic, and hybrid approaches, are analyzed, along with their application in energy information systems. The advantages and limitations of each method are examined in terms of efficiency, adaptability, fault tolerance, and computational overhead. The study highlights the necessity of real-time load management to prevent bottlenecks, optimize resource utilization, and ensure continuous system availability. The developed web application implements intelligent load-balancing algorithms that enable real-time server monitoring and automatic task redistribution in cases of server overload or failure. These algorithms consider multiple factors such as server capacity, response time, and network conditions to optimize load distribution dynamically. The proposed solution not only enhances system reliability but also minimizes latency and improves overall system performance. Moreover, the implementation of load-balancing techniques as a web application facilitates seamless integration with existing information systems in the energy sector. This integration helps optimize resource allocation, reduce operational and maintenance costs, and improve decision-making processes in energy management. A promising direction for future research includes refining load forecasting models, leveraging machine learning techniques to enhance load-balancing strategies, and integrating the developed web application with cloud computing platforms to ensure high scalability and fault tolerance.

Key words: *web application, information system, functional stability, energy networks, load redistribution, load-balancing methods, graphs, probability.*

УДК 004.75:004.4’13
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/03

Бегліцов С. В.
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

ПЛАВНЕ ПЕРЕКЛЮЧЕННЯ В ХМАРНЕ СЕРЕДОВИЩЕ З АВТОМАТИЗАЦІЄЮ TERRAFORM І КОНТЕЙНЕРИЗАЦІЄЮ DOCKER: ІНТЕГРАЦІЯ ІНФРАСТРУКТУРИ ЯК КОД ТА BLUE-GREEN РОЗГОРТАННЯ

Статтю присвячено дослідженню міграції в хмарне середовище за допомогою Infrastructure as Code (IaC) із фокусом на ключових атрибутах хмарних обчислень. У роботі розкрито особливості традиційних архітектур, що вимагають ручного виділення ресурсів, та визначено переваги хмарних технологій, які забезпечують гнучкість завдяки самообслуговуванню на вимогу, широкому мережевому доступу, спільному пулу ресурсів, швидкій еластичності та вимірюваним послугам.

Розглянуто основні моделі хмарної інфраструктури: SaaS, PaaS та IaaS. З’ясовано, що для автоматизації найбільш актуальною є модель IaaS, яка забезпечує детальний контроль над віртуальними машинами та сховищем. PaaS спрощує розробку завдяки попередньо налаштованим середовищам, тоді як SaaS дозволяє організаціям використовувати керовані програмні рішення.

Доведено ефективність використання IaC для оркестрації хмарної інфраструктури шляхом визначення її через конфігураційні файли, що зберігаються у системах контролю версій, проходять тестування та автоматично розгортаються. Визначено роль Terraform, який, використовуючи HashiCorp Configuration Language (HCL), забезпечує автоматизоване виділення ресурсів.

Розглянуто стратегії міграції, що варіюються від простої заміни компонентів до повної реконфігурації застосунків (Cloudify). Показано, що IaC мінімізує ручне втручання та ризики помилок. Описано декларативний синтаксис Terraform та його інтеграцію з AWS, Azure та Google Cloud для гнучкого розгортання.

Окрему увагу приділено контейнеризованим застосункам, які отримують переваги від Docker. Визначено, що Docker пакує залежності в портативні контейнери, а Docker Compose керує конфігурацією багатоконтейнерних середовищ, оптимізуючи PHP-застосунки через Redis, Memcached та Opcache. Розглянуто можливість інтеграції інструментів налагодження, таких як xDebug та SOAP.

З’ясовано, що стратегія blue-green розгортання забезпечує плавне оновлення, підтримуючи два ідентичні середовища продакшену та перемикаючись між ними з мінімальним простоєм. Підтверджено, що Terraform ефективно забезпечує розгортання цих середовищ, тоді як Docker прискорює налаштування сервісів і масштабування.

Доведено, що Terraform автоматизує взаємодію з API хмарних платформ, інтегруючи AWS Lambda та API Gateway у CI/CD пайплайни. Визначено, що Terraform Cloud додатково оптимізує керування станом та спрощує командну роботу. У результаті дослідження підтверджено, що Terraform і Docker спрощують міграцію в хмару, автоматизуючи виділення інфраструктури, покращуючи ефективність розгортання та знижуючи операційні ризики.

Ключові слова: *декларативний синтаксис, автоматизована оркестрація, пайплан, контейнер, версії розгортання, дебагінг.*

Постановка проблеми. Концепція хмарних обчислень асоціюється з сучасною та масштабованою доставкою програмного забезпечення, що диктується необхідністю динамічного виділення ресурсів за запитом, спрощених операцій та вищої надійності. Перехід наявних локальних додатків у хмарну інфраструктуру вимагає значного планування задля забезпечення мінімального часу простою, максимальної ефективності та можливості повторення усієї операції у інших контекстах. Принцип інфраструктури як коду (Infrastructure as Code – IaC) з’явився в якості ефективної методології у забезпеченні зазначених потреб, особливо за сумісництва з технологіями контейнеризації, як наприклад Docker. Паралельно з цим, використання протестованих механізмів хешування у виді Redis, Memcached, та PHP Opcache сприяє продуктивності додатків після їхнього розгортання. При детальному розгляданні цих аспектів, стає зрозумілим необхідність застосування автоматизаційних технологій, в якості якої у даному дослідженні впроваджується Terraform. Загалом, опи-

сана стратегія відіграватиме основу для переходу з наземної інфраструктури, де відбуватиметься тестування контейнеризованих сервісів, у хмарну.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження присвячені автоматизації процесів перенесення сервісів наземної інфраструктури в хмарне середовище, що є актуальним завданням у сфері інформаційних технологій.

Одним із важливих аспектів цієї тематики є розробка методів встановлення необхідних розширень для PHP у контейнерних середовищах без використання PECL, яке було вимкнено у версії PHP 7.4. Так, запропонована О. Лавале методологія передбачає застосування інструментів docker-php-ext-configure та docker-php-ext-install для підтримки чистоти та модульності Docker-образів відповідно до специфічних вимог проєкту. Також розглядаються труднощі, пов'язані з ручним встановленням розширень, зокрема таких, що залежать від підмодулів і багатостадійного збирання, як-от MongoDB. У результаті дослідження продемонстровано практичні підходи до створення ефективного Docker-середовища для PHP, що забезпечує оптимізацію кешування, серіалізації та інтеграцію поширених розширень [1].

Аспектами автоматизації управління хмарними ресурсами займалися такі дослідники як Б. Кішіяма, Х. Ванг, Д. Лопес, Дж. Янг [2]. Вони проаналізували ефективність інструментів Google Cloud Deployment Manager і Terraform у розгортанні інфраструктури. Здійснений порівняльний аналіз дозволив встановити, що Terraform забезпечує стабільно швидший час деактивації ресурсів, що підтверджується тестуванням із використанням команди Linux time. Google Cloud Deployment Manager, у свою чергу, демонструє вищу нативну інтеграцію з ресурсами Google Cloud, тоді як Terraform надає більшу універсальність, що робить його доцільним для мультихмарних середовищ. У роботі також сфокусовано увагу на використанні концепції Infrastructure as Code (IaC). Зокрема, розглянуто переваги та виклики її впровадження та визначено значущість технічної експертизи для ефективного управління хмарною інфраструктурою [2].

Крім того, дослідники зосереджуються на продуктивності PHP-фреймворків, методах забезпечення безпеки та надійності кодової бази, а також на оптимізації автоматизованого розгортання. Зокрема, розглядаються питання конфігурації веб-додатків у хмарних середовищах, тестування ефективності підходів до Infrastructure as Code, а також створення механізмів забезпечення відмовостійкості. Серед праць, присвячених цим темам, слід відзначити дослідження М. Лаазірі, К. Бенмусси, С. Хоулджі, Л. Керкеба [3], С. Чінтапатли [4], А. Рахмана, А. Партхо, П. Моррісона, Л. Вільямса [5], В. Семенюка [6], С. Далла Пальми, Д. Ді Нуччі, Ф. Паломби, Д. Тамбуррі [7], Ю. Жао, І. Лу, К. Чжу, Ч. Чен, Х. Хуана [8], Е. Оздоґана, О. Черана, М. Устюндаґа [9], С. Ніфа, Л. Кляйсснера [10], А. Абуалькішика, А. Алвана, Й. Гульзара [11], Бату Дж. [12], Н. Мухопадхяя, Б. Теварі [13], Й. Омофоєви, А. Гребе, П. Леусманна [14], М. Елеракі, В. Аніса Азіза, Дж. Солімана [15] тощо.

Беручи до уваги наявні дослідження тим не менше можна стверджувати, що питання автоматизації процесів перемикання сервісів наземної інфраструктури в хмарне середовище залишається актуальним та потребує подальшого наукового опрацювання, зокрема щодо розробки нових методів інтеграції та оптимізації управління ресурсами у гетерогенних середовищах.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методів та засобів автоматизації процесів переключення сервісів наземної інфраструктури в хмарне середовище із використанням інструменту інфраструктури як код Terraform у середовищі AWS та Docker-контейнеризації у парадигмі «blue-green» розгортання.

Виклад основного матеріалу. Задля кращого розуміння необхідності проведення хмарної міграції за посередництва IaC, необхідно усвідомити значимість ознак концепцій хмарних обчислень, які відіграють головну роль у підході поточного дослідження. Традиційна архітектура часто передбачає ручне виділення ресурсів, що своєю суттю сприяє виникненню помилок. Натомість, архітектури хмарних обчислень вирізняються п'ятьма ознаками:

Самообслуговування на вимогу – означає, що користувачі мають змогу автоматично запитувати ресурсі у манері самообслуговування;

– широкий мережевий доступ – вказує на те, що ресурси є доступними через Інтернет, типово через стандартизовані механізми;

– спільний пул ресурсів – гарантує, що базові ресурси керуються в якості спільного пулу, часто віртуалізованого, та можуть використовуватися одночасно кількома клієнтами;

– швидка еластичність – вказує на можливість забезпечення більшої кількості ресурсів на вимогу та звільняти їх за необхідності;

– вимірювана послуга – означає моніторування використання ресурсів та вимірювання оптимального використання.

Загалом, поняття хмарної інфраструктури підтримується трьома головними моделями: Software as a Service (SaaS – програмне забезпечення в якості послуги), Platform as a Service (PaaS – платформа в якості послуги), and Infrastructure as a Service (IaaS – інфраструктура в якості послуги). При необхідності мати справу з більш комплексними автоматизаційними парадигмами, IaaS зазвичай є найбільш релевантною, оскільки вона надає адміністратора можливість контролювати на доволі детальному рівні інфраструктурні ресурси, включаючи віртуальні машини, міркування з приводу зберігання даних та інші послуги низького рівня. У той же час, PaaS уможливлює спрощення розробки, оскільки вона пропонує вже конфігуроване середовище, у якому відбувається розгортання коду. SaaS, альтернативним чином, абстрагує цілий процес розгортання на ще вищому рівні, дозволяючи організаціям використовувати повноцінні програмні рішення через веб.

Незалежно від того, яка сервісна модель є обраною, IaC може виявитися особливо корисною у процесі оркестрації виділення та обслуговування хмарних середовищ. Концептуальна особливість використання цієї моделі полягає у тому, що усе середовище, включаючи сервери, мережі, БД з'єднання, технології хешування тощо можуть виражатися у вигляді конфігураційних файлів, або скриптів. Ці вираження зберігаються у системах контролю версій, тестуються та потім автоматично розгортаються за потреби. Terraform є одним з основних інструментів, використовуваних у даному контексті, оскільки застосовує декларативно-конфігураційну мову HashiCorp Configuration Language (HCL), таким чином дозволяючи користувачам визначати бажаний стан інфраструктури, після чого оркеструючи створення, або видалення ресурсів задля узгодження поточного стану системи з бажаним.

Оскільки хмарні міграції існують у різних формах, важливим є вибір належного типу в залежності від ступеню необхідного перетворення. Найбільш прямолінійний підхід хмарної міграції полягає у заміщенні конкретних локальних компонентів еквівалентними хмарними сервісами. Інший метод може включати часткову міграцію деяких функцій. Підхід «Cloudify» вимагає повного переналаштування додатку таким чином, ніби він з самого початку був розроблений в межах хмарної інфраструктури. У будь-якому із зазначених підходів, принцип IaC прискорює процес міграції, оскільки за необхідності впровадження будь-якої зміни, ручна перебудова стає непотрібною, та необхідні зміни можуть бути інтегрованими автоматичним чином послідовно та неодноразово, що, у свою чергу, майже анулює вірогідність виникнення будь-яких помилок, пов'язаних з людським фактором та прискорює процес міграції.

Отже декларативний синтаксис Terraform є центральною ланкою запропонованого підходу, який звертається до провайдерів (таких як AWS, Azure або Google Cloud Platform) для налаштування та управління необхідними ресурсами. До того ж, характерне використання даним інструментом змінних надалі посилює його адаптивність. Змінні можуть бути запроваджені у декількох формах: змінні середовища, аргументи командного рядку, або виділені конфігураційні файли. Таким чином, це робить створення інфраструктури гнучкішим та схильним до багаторазового використання. Розширені робочі процеси Terraform також можуть покладатися на Terraform Cloud, що є хостинговим сервісом, який забезпечує централізоване зберігання стану, функції колаборації, інтеграцію контролю версіями та забезпечення дотримання політик. При використанні Terraform Cloud, команди можуть позначати конкретні робочі простори та точно визначати спосіб версійного контролю та аудиту своїх розгортань.

У контексті контейнеризованих додатків, Docker постає в якості критично важливого інструменту, оскільки він здійснює пакування додатку з усіма його залежностями: фреймворками, бібліотеками, середовищами виконання у портативні контейнери. Це пакування гарантує ідентичну функціональність додатку у різних середовищах. Типовий робочий процес може починатися з встановлення образу Docker, який включає середовище виконання (PHP, Java, або Python) та додаткові бібліотеки, від яких залежить певний додаток. Втім, шляхом застосування Docker Compose, існує можливість визначення мультиконтейнерних конфігурацій, конкретизації того, які контейнери запускатимуть БД, кеш-шари, або брокери повідомлень та як вони взаємодіятимуть, таким чином об'єднуючи локальні середовища розробки серед різних членів команди, знижуючи ризик конфліктів версій, або проблем сумісності.

При застосуванні зазначених Docker концепцій до додатків на базі PHP, існує можливість застосування оптимізаційних та хешових технологій, як наприклад Redis та Memcached, які сприяють зниженні навантаження БД шляхом збереження часто керованих даних у оперативній пам'яті. Redis, наприклад також може оперувати в якості системи

обміну повідомленнями з підтримкою публікації та підписки (pub / sub), у той час, як Memcached відіграє роль рішення більш спеціалізованого та горизонтально масштабованого кешування. Інша ключова підланка полягає у активації Opcache, що значно покращує продуктивність PHP кешуванням байткоду компільованого скрипта таким чином, щоб він не мав необхідності бути повторно парсованим та компільованим за кожним запитом. Встановлення xDebug для здійснення дебагінгу, або SOAP для забезпечення веб-сервісних функцій є опціональним за умови покладання на аргументи збірки у Dockerfile.

Пропонований підхід передбачає, що усі описані технології безшовно узгоджуватимуться за посередництва стратегії «blue-green» розгортання. У рамках даної моделі, адміністраторами керуються два ідентичних продакшн-середовищ: блакитного та зеленого, один з яких перебуватиме у стані активного використання. При готовності нової версії додатку, або його базової інфраструктури, резервне середовище підлягає оновленню, тестуванню та валідації. За умови успішного тестування, конфігурація маршрутизації, або балансу навантаження переходить з старого середовища до нового, забезпечуючи вихід нової версії з майже жодним часом простою. При виникненні проблем, потік запитів може бути негайно переспрямованим назад до старого середовища. Простота виділення інфраструктури в Terraform забезпечує прямолінійний спосіб розгортання цих паралельних середовищ, оскільки він гарантує, що кожне середовище виділяється ідентично та у різних стадіях розгортання. Контейнеризація за допомогою Docker прискорює процес конфігурації та масштабування сервісів у двох середовищах шляхом зниження їх об'єму та портування, що робить можливим їх встановлення за декілька секунд.

З боку практичного аспекту, робота Terraform передбачає взаємодію з різними хмарними API (application programming interface – прикладний програмний інтерфейс). Наприклад, у випадку AWS, типова конфігурація Terraform може визначати функцію AWS Lambda та під'єднати її до ресурсу API Gateway. У своїй простішій формі, конфігураційний файл посилається на функцію Lambda, встановлюючи function_name, runtime, handler, and filename. Далі він описує API Gateway

```
resource "aws_lambda_function" "my_lambda_function" {
  function_name = "my-lambda-function"
  runtime       = "nodejs14.x"
  handler       = "index.handler"
  filename      = "${path.module}/lambda_function_payload.zip"
}

resource "aws_api_gateway_rest_api" "my_api_gateway" {
  name        = "my-api-gateway"
  description = "My API Gateway"
}

resource "aws_api_gateway_resource" "my_api_gateway_resource" {
  rest_api_id = aws_api_gateway_rest_api.my_api_gateway.id
  parent_id   = aws_api_gateway_rest_api.my_api_gateway.root_resource_id
}

resource "aws_api_gateway_method" "my_api_gateway_method" {
  rest_api_id = aws_api_gateway_rest_api.my_api_gateway.id
  resource_id = aws_api_gateway_resource.my_api_gateway_resource.id
  http_method = "GET"
  authorization = "NONE"
}

resource "aws_api_gateway_integration" "my_api_gateway_integration" {
  rest_api_id             = aws_api_gateway_rest_api.my_api_gateway.id
  resource_id             = aws_api_gateway_resource.my_api_gateway_resource.id
  http_method             = aws_api_gateway_method.my_api_gateway_method.http_method
  integration_http_method = "POST"
  type                    = "AWS_PROXY"
  uri                     = aws_lambda_function.my_lambda_function.invoke_arn
}

resource "aws_api_gateway_deployment" "my_api_gateway_deployment" {
  depends_on = [aws_api_gateway_integration.my_api_gateway_integration]
  rest_api_id = aws_api_gateway_rest_api.my_api_gateway.id
  stage_name  = "dev"
}
```

Рис. 1. Визначення функції Lambda та API Gateway

```
cat <<EOF > main.tf
provider "aws" {
}

terraform {
  backend "s3" {
    bucket = "dev-area"
    key    = "Terraform/lambda/\${state_name}.tfstate"
  }

  required_providers {
    aws = {
      version = ">= 4.67.0"
      source  = "hashicorp/aws"
    }
  }
}
EOF

cat <<EOL > lambda.tf
resource "aws_lambda_function" "\${state_name}_function" {
  function_name = var.lambda_name
  filename      = "lambda.zip"
  handler       = "exports.handler"
  runtime       = "nodejs18.x"
  role          = "arn:aws:iam::\${account_id}:role/LambdaRole"
}
EOL
```

Рис. 2. Генерація Terraform-конфігураційних файлів

за посередництва інтеграції яка маршрутизує трафік HTTP до конкретної Lambda. Такі визначення мають змогу посилатися одне на одного, що гарантує Terraform-оркестрацію у правильному порядку.

На рис. 1 наведено короткий приклад конфігурації Terraform, яка визначає функцію Lambda та API Gateway, за своєю суттю демонструючи принцип поєднання даних ресурсів один з одним за допомогою декларативного синтаксису.

У повністю автоматизованому робочому процесі, дані ресурси зберігаються у системі контролю версій, а пайплайн може запускати команди Terraform (init, plan, apply). Файл стану Terraform, який відстежує ці ресурси, може зберігатися у середовищі Amazon S3, що гарантуватиме використання однакових станів посилання будь-яким членом команди, який запускає Terraform. Типовий скрипт, як показано на рис. 2, може генерувати певні Terraform-конфігураційні файли в залежності від змінних середовища, що дозволяє застосовувати гнучкі правила іменування та розділення середовищ.

Після успішного створення цих файлів, пайплайни CI / CD у таких платформах, як GitHub Actions здатні посилатися на них. Типовим чином, пайплан здійснить конфігурацію облікових даних AWS, викличе скрипт та запустить terraform init-reconfigure, потім terraform plan та terraform apply. Terraform Cloud також може замінити S3-бекенд, якщо команда надає перевагу повністю хостованому рішенню з додатковими колабораційними функціями та функціями політик. На рис. 3 наведена одна з можливих конфігурацій Terraform Cloud.

```
terraform {
  required_version = ">= 0.13.0"
  backend "remote" {
    organization = "organization_name"
    workspaces {
      name = "example-workspace"
    }
```

Рис. 3. Конфігурація Terraform Cloud

Контейнеризація самого програмного забезпечення також являє собою наступну ланку хмарної міграції. Для додатків PHP, образи Docker можуть бути побудовані на основі базового образу (php: 7.1-fpm) та потім розширені за допомогою додаткових бібліотек, як наприклад BCMath, Redis, Memcached, або xDebug для дебагінгу, або SOAP за необхідності. Консолідація усіх необхідних модулів у єдиний образ, який підтримує кешування та дебагінг, може значно впорядкувати про-

```
FROM php:7.1-fpm

RUN apt-get update && apt-get install -y \
    libmemcached-dev \
    zlib1g-dev \
    libpq-dev \
    libxml2-dev \
    curl \
    libcurl4-openssl-dev

RUN docker-php-ext-install pdo pdo_mysql pdo_pgsql gd mcrypt bcmath \
    && pecl install redis memcached \
    && docker-php-ext-enable redis memcached

ARG INSTALL_SOAP=false
ARG INSTALL_XDEBUG=false

RUN if [ "$INSTALL_SOAP" = "true" ]; then \
      docker-php-ext-install soap; \
    fi \
    && if [ "$INSTALL_XDEBUG" = "true" ]; then \
      pecl install xdebug && docker-php-ext-enable xdebug; \
    fi

COPY configs/php.ini /usr/local/etc/php/php.ini
COPY configs/php-fpm.pool.conf /usr/local/etc/php-fpm.d/www.conf
COPY configs/xdebug.ini /usr/local/etc/php/conf.d/xdebug.ini
COPY configs/opcache.ini /usr/local/etc/php/conf.d/opcache.ini

EXPOSE 9000
WORKDIR /var/www
CMD ["php-fpm"]
```

Рис. 4. Конфігурація Dockerfile

цес локальної розробки. Docker Compose, у свою чергу пов'язує ці контейнери між собою, щоб MySQL, Nginx, RabbitMQ мали змогу оперувати паралельно з PHP додатком без необхідності проведення ручного процесу встановлення.

Зразок Dockerfile для PHP середовища може включати компоненти, які встановлюють різні модулі (pdo, pdo_mysql, pdo_pgsql, gd, mcrypt, bcmath), а потім застосовують pecl для зовнішніх модулей: redis або memcached. Аргументи збірки (ARG) можуть визначати, чи будуть xDebug, SOAP або інші компоненти скомпільовані в образ. На рис. 4 окреслено цей принцип.

Ця конфігурація може включати опціональні функції за умови, що аргументи збірки встановлені до true. При необхідності проведення дебагінгу, можуть бути впроваджені такі аргументи як – build-arg INSTALL_XDEBUG=true – build-arg INSTALL_SOAP=true. Для продакшн-образів, значення цих аргументів можуть залишатися стандартними.

Не менш критично важливим аспектом у оптимізації PHP середовищ є активація Opcache, оскільки як вже було зазначено, шляхом збереження попередньо скомпільованого байткоду, цей інструмент усуває накладні витрати на парсування та компіляцію скриптів при кожному запиті. Після створення образу, він може бути просто запущеним за посередництва прив'язання до порту 9000 та змонтувавши локальну директорію, яка містить код додатку:

docker build -t php – 7.1-custom.

docker run -d -p 9000:9000 – v $(pwd): / var / www php – 7.1-custom

Треба також враховувати, що Docker Compose в змозі визначити усі компоненти (PHP-FPM, кеш, БД, черги повідомлень) у вигляді єдиного YAML-файлу, критично спрощуючи налаштування середовища для кожного члена команди. Будь-який розробник, який вперше долучається до роботи над проектом, має змогу клонувати репозиторій, запустити одну команду (docker-compose up -d) та мати стандартизоване середовище майже одразу.

Значущість контейнеризації посилюється у межах «blue-green» розгортання. Коли випускаються нові версії сервісу, операційний пайплайн може запустити контейнери в зеленому середовищі, що є ідентичним блакитному середовищу, що знаходиться в процесі роботи. Ці контейнери підлягають процесу ретельного тестування, щоб запевнитися, що кешування функціонує правильно, що нова версія коду додатку є стабільною та що уся відповідна інфраструктура, розгорнута Terraform, знаходиться в готовому стані. Тільки після успішної валідації відбувається переключення середовищ. Оскільки образи Docker охо-

плюють усі залежності, нові контейнери мають передбачувані властивості, незалежно від змін на базових серверах.

Висновки. Загалом, інтеграція IaC із декларативним виділенням ресурсів та методами контейнеризації для оптимізації стратегій хмарної міграції та використання Terraform і Docker демонструє, як автоматизована оркестрація підвищує масштабованість інфраструктури, мінімізує людський фактор і забезпечує повторюваність процесів розгортання. На відміну від традиційних підходів, запропонована методологія систематично поєднує контрольовані версіями конфігурації, автоматизацію на основі політик і адаптацію стану інфраструктури, створюючи надійну основу для динамічних хмарних середовищ.

Подальші дослідження мають зосередитися на розширенні оптимізації хмарних обчислень на основі IaC, зокрема шляхом інтеграції машинного навчання для передбачуваного масштабування, покращення міжхмарної сумісності та вдосконалення політик безпеки для автоматизованих розгортань. Додатково перспективним напрямком є дослідження інтеграції архітектур service mesh та serverless computing у IaC-фреймворки, що сприятиме подальшій оптимізації розподілу ресурсів та підвищенню ефективності роботи.

Список літератури:

1. Laviale O. Installing PHP extensions from source in your Dockerfile. *Olivier Laviale*: website. 2019. URL: https://olvlvl.com/2019-06-install-php-ext-source.html (last accessed: 28.03.2025).

2. Kishiyama B., Wang H., Lopez D., Yang J. An Overview of Infrastructure as Code (IaC) with Performance and Availability Assessment on Google Cloud Platform. *Proceedings of the Second International Conference on Advances in Computing Research (ACR'24) Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024. P. 497–514. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-56950-0_41

3. Laaziri M., Benmoussa K., Khoulji S., Kerkeb L. A comparative study of PHP frameworks performance. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 32. P. 864–871. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.295

4. Chinthapatla S. Unleashing the Power of AWS: Revolutionizing Cloud Management through Infrastructure as Code (IaC). *ResearchGate*: website. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/379225463_SaiKrishna_Chinthapatla's_view_on_IaC_Unleashing_the_Power_of_AWS_Revolutionizing_Cloud_Management_through_Infrastructure_as_Code_IaC (last accessed: 28.03.2025).

5. Rahman A., Partho A., Morrison P., Williams L. What questions do programmers ask about configuration as code? *Proceedings of the 4th International Workshop on Rapid Continuous Software Engineering*. 2018. P 16–22, DOI: 10.1145/3194760.3194769

6. Semenyuk V. Automated build for docker-php image. *Docker Hub*: website. 2025. URL: https://hub.docker.com/r/vadymsemeniuk/docker-php (last accessed: 28.03.2025).

7. Dalla S. Palma, Di D. Nucci, Palomba F., Tamburri D. A. Within- project defect prediction of Infrastructure-as-Code using product and process metrics. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2020. № 14(8). P. 1–8.

8. Zhao J., Lu Y., Zhu K., Chen Z., Huang H. Cefuzz: A directed fuzzing framework for PHP RCE vulnerability. *Electronics*. 2022. Vol. 11. № 5. P. 758. DOI: 10.3390/electronics11050758

9. Özdoğan E., Ceran O., Üstündağ M. Systematic Analysis of Infrastructure as Code Technologies. *Gazi University Journal of Science A. Part, Engineering and Innovation*. 2023. № 10. DOI: 10.54287/gujsa.1373305

10. Neef S., Kleissner L. PHUZZ: A grey-box fuzzer for PHP web applications. *GitHub*: website. 2024. URL: https://github.com/gehaxelt/phuzz (last accessed: 28.03.2025).

11. Abualkishik A., Alwan A., Gulzar Disaster Y. Recovery in Cloud Computing Systems: An Overview. *InternationalJournal of Advanced Computer Science and Applications.* 2020. № 11. DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110984

12. Batu J. Implementing Infrastructure-as-Code with Cloud Disaster Recovery Strategies. *International Journal of Computer Trends and Technology*. 2024. № 72. P. 41–45. DOI: 10.14445/22312803/IJCTT-V72I2P108

13. Mukhopadhyay N., Tewari B. P. Efficient IaC-based resource allocation for virtualized cloud platforms. In: *Advanced network technologies and intelligent computing*. Communications in Computer and Information Science. Springer International Publishing, 2022. P. 200–214. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96040-7_16

14. Omofoyewa Y., Grebe A., Leusmann P. IaC reusability for Hybrid Cloud Environment. *ResearchGate*: website. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/357281177_IaC_reusability_for_Hybrid_Cloud_Environment (last accessed: 28.03.2025).

15. Eleraky M., Anis Aziz W., Soliman J. Using Cloud Infrastructure as a Code (IaC) to Set Up Web Applications. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*. 2023. Vol. 24.

Behlitsov S. V. SEAMLESS CLOUD MIGRATION WITH TERRAFORM AUTOMATION AND DOCKER CONTAINERIZATION: INTEGRATING INFRASTRUCTURE AS CODE AND BLUE-GREEN DEPLOYMENT

The article is devoted to the study of migration to the cloud environment using Infrastructure as Code (IaC) with a focus on the key attributes of cloud computing. The paper reveals the features of traditional architectures that require manual resource allocation and identifies the advantages of cloud technologies that provide flexibility through on-demand self-service, broad network access, shared resource pool, fast elasticity, and measurable services.

The main models of cloud infrastructure are considered: SaaS, PaaS and IaaS. It has been found that the IaaS model is the most relevant for automation, as it provides detailed control over virtual machines and storage. PaaS simplifies development through preconfigured environments, while SaaS allows organizations to use managed software solutions.

The effectiveness of using IaC to orchestrate cloud infrastructure is proved by defining it through configuration files stored in version control systems, tested and automatically deployed. The role of Terraform is defined, which, using the HashiCorp Configuration Language (HCL), provides automated resource allocation.

Migration strategies are considered, ranging from simple component replacement to complete application reconfiguration (Cloudify). It is shown that IaC minimizes manual intervention and error risks. Terraform's declarative syntax and its integration with AWS, Azure, and Google Cloud for flexible deployment are described.

Special attention is paid to containerized applications that benefit from Docker. It is determined that Docker packs dependencies into portable containers, and Docker Compose manages the configuration of multi-container environments, optimizing PHP applications through Redis, Memcached, and Opcache. The possibility of integrating debugging tools such as xDebug and SOAP is considered.

It was found that the blue-green deployment strategy provides a smooth upgrade, supporting two identical production environments and switching between them with minimal downtime. It is confirmed that Terraform efficiently provides the deployment of these environments, while Docker accelerates the configuration of services and scaling.

It is proved that Terraform automates interaction with cloud platform APIs by integrating AWS Lambda and API Gateway into CI/CD pipelines. It is determined that Terraform Cloud further optimizes state management and simplifies teamwork. The study confirms that Terraform and Docker simplify cloud migration by automating infrastructure provisioning, improving deployment efficiency, and reducing operational risks.

Key words: *declarative syntax, automated orchestration, pipeline, container, versioned deployments, debugging.*

УДК 528.852
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/04

Бойко О. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Залевський С. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Савчук В. С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОННОГО ЛИСТА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОЗНАК ФІШИНГУ

Розроблено практичні рекомендації щодо аналізу отриманого електронного листа для виявлення ознак фішингу, в результаті ігнорування якого здійснюється запобігання продовженню кібератаки, першим кроком якої є фішинг. З початком російської військової агресії кількість загроз у кіберпросторі України постійно збільшується, кіберзлочинці суттєво активізували діяльність у період воєнного стану в Україні та проводять фішингові кампанії з метою отримання конфіденційних даних у населення України, причому 74 відсотка фішингових атак припадає на поштовий фішинг. Слід зазначити, що фішингові листи можуть надсилатися нібито від імені державних органів, міжнародних організацій та окремих осіб, а документами-приманками можуть бути запити на отримання інформації, міжнародна кореспонденція, офіційні листи переписки державних органів України тощо. Тому користувачам, які можуть бути об'єктами майбутніх кібератак, важливо вміти розпізнавати фішинг на основі аналізу отриманого електронного поштового листа для ігнорування таких листів та припинення кібератаки. Тому необхідно розробити практичні рекомендації щодо аналізу електроного листа, застосування яких дозволить користувачам виявити ознаки фішингу у отриманому листі та, відповідно, запобігти продовженню кібератаки, першим кроком якої є фішинг та, уникнути витоку інформації, тому що метою кібератак є доступ зловмисників до конфіденційної інформації. Єдиним джерелом інформації для аналізу та встановлення факту фішинга є отриманий електронний лист, тобто адреса електронної пошти відправника та вміст повідомлення, яке включає лінк на ресурс, за допомогою якого здійснюється збір конфіденційної інформації. Тому аналіз електронного листа для визначення того, чи є цей лист фішинговим, пропонується здійснювати в такій послідовності: 1) аналіз його вмісту, 2) аналіз заголовків електронного листа, 3) аналіз та пошук інформації за електронною адресою відправника, 4) аналіз посилання на ресурс.

Ключові слова: *фішинг, кібератака, електронна пошта, електронний лист, osint.*

Постановка проблеми. З початком російської військової агресії кількість загроз у кіберпросторі України постійно збільшується, так для одночасного масового ураження великої кількості користувачів однієї організації широко використовуються методи фішингу [1]. Крім того, кіберзлочинці суттєво активізували діяльність у період воєнного стану в Україні та проводять фішингові кампанії з метою отримання конфіденційних даних у населення України [2]. Реалізація кібератаки починається з надсилання потенційним жертвам фішингових листів зі шкідливим вкладенням, після відкриття якого запускається механізм автоматичної компрометації комп'ютерної системи та створюються передумови до витоку інформації. Найчастіше фішингові листи надсилаються електронною поштою [3]. Отже, єдиним джерелом для проведення аналізу з метою встановлення початку атаки з використанням фішингу є отриманий поштовий лист, тобто адреса електронної пошти відправника та вміст повідомлення. Слід зазначити, що фішингові листи можуть надсилатися нібито від імені державних органів, міжнародних організацій та окремих осіб, а документами-приманками можуть бути запити на отримання інформації, міжнародна кореспонденція, офіційні листи переписки державних органів України тощо. Тому користувачам, які можуть бути об'єктами майбут-

ніх кібератак, важливо вміти розпізнавати фішинг на основі аналізу отриманого електронного поштового листа для ігнорування таких листів та припинення кібератаки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Приклади випадків фішингових атак з їх аналізом наведено у [4, 5], загальну класифікацію популярних напрямів фішингового атакування, які використовують кіберзлочинці під час спроб отримання доступу до конфеденційної інформації, подано у [5, 6], методи протидії фішингу розглянуто у [6, 7], але детально не розглядалися питання щодо аналізу поштового повідомлення для визначення ознак, за якими звичайний користувач мережі Інтернет може розпізнати фішинг, його проігнорувати та не реагувати на нові подібні фішингові повідомлення у майбутньому.

Постановка завдання. Метою статті є розробка рекомендацій щодо аналізу електронного листа його отримувачем для розпізнавання фішингу та, відповідно, для протидії кібератакам, метою яких є отримання доступу до конфіденційної інформації, першим етапом яких є поштовий фішинг.

Виклад основного матеріалу. Під фі́шингом (англ. phishing МФА: [‘fiʃiŋ] від fishing – риболовля) розуміють вид шахрайства, метою якого є виманювання в довірливих або неуважних користувачів мережі їх персональних даних внаслідок самостійного розкриття конфіденційної інформації користувачами [3]. Концепцію фішингу вперше було описано в 1987 році в документі з конференції під назвою «Безпека системи: перспективи хакера», де описувалась техніка зловмисників, яка полягає в імітації авторитетних організацій або сервісів. Першими в історії вважаються систематичні фішинг-атаки, що почалися в мережі America Online (AOL) в 1995 році. Щоб викрасти легітимні облікові дані, зловмисники зв’язувалися з жертвами через AOL Instant Messenger (AIM), видаючи себе за співробітників AOL, які перевіряють паролі користувачів. Після того як AOL в 1997 році ввела контрзаходи, кіберзлочинці зрозуміли, що можуть використовувати цю методику в інших галузях, зокрема й фінансових установах. З того часу методики фішингу дедалі більше розповсюджуються серед кіберзлочинців, тому безперервно здійснюються фішингові атаки як на окремі особи, так і на організації для отримання інформації та фінансової вигоди. Як свідчить статистика за 2024 рік [3] фішинг зріс на 25 % у порівнянні з попереднім роком. У 2024 році глобальні фінансові збитки від фішингових атак оцінили в $17,4 млрд, що на 45 % більше, ніж у попередньому році. В той же час 97 % користувачів не можуть розпізнати складний фішинговий електронний лист; 95 % усіх атак, спрямованих на корпоративні мережі, спричинені успішним фішингом; 30 % фішингових листів відкривають користувачі, і 12 % цих цільових користувачів натискають шкідливе посилання або відкривають вкладення.

У світі одним з найпоширених видів фішиншу є поштовий (74 %). Саме його було використано хакерським угрупованням «Armageddon» під час його діяльності на території України [4]. Хід атаки цілеспрямованого фішингу на прикладі повідомлення електронною поштою виглядає наступним чином. Спочатку зловмисник проводить велику попередню роботу щодо пошуку інформації про майбутній об’єкт фішингу. Це може бути як адреса електронної пошти та імена підрядників або колег, так і захоплення об’єкта, нещодавні покупки тощо – будь-яка інформація, яку можна дізнатися із соціальних мереж та інших джерел та яка допоможе в тілі листа збити отримувача з пантелику і змусити повірити в його правдивість. Потім, використовуючи отримані з доступних джерел дані, атакуючий створює фішинговий лист від імені знайомої для жертви особи (колеги, члена сім’ї, друга, замовника тощо). Надіслане повідомлення має створити відчуття терміновості і переконати одержувача надіслати особисту інформацію у відповіді, ввести її, перейшовши за посиланням у листі, або скачати шкідливе програмне забезпечення з вкладень до листа. У деяких випадках, в ідеальному для зловмисника сценарії, після того як лист «спрацював», на цільовому ПК встановлюється бекдор, що дає змогу отримати доступ до необхідної інформації. Вона збирається, шифрується та надсилається особі, що здійснила атаку.

Отже єдиним джерелом інформації для аналізу та встановлення факту фішинга є отриманий електронний лист, тобто адреса електронної пошти відправника та вміст повідомлення, яке включає лінк на ресурс, за допомогою якого здійснюється збір конфіденційної інформації.

Тому аналіз електронного листа для визначення того, чи є цей лист фішинговим, пропонується здійснювати в такій послідовності: 1) аналіз його вмісту, 2) аналіз заголовків електронного листа, 3) аналіз та пошук інформації за електронною адресою відправника, 4) аналіз посилання на ресурс. Розглянемо детально ці етапи.

1. Аналіз вмісту повідомлення. Відомо, що поштові фішингові листи містять термінову

інформацію, щоб своєю терміновістю викликати необдуману, але певну дію від жертви, наприклад натиснути на зловмисне посилання, яке веде на підроблену сторінку авторизації або завантажує шкідливе програмне забезпечення. Тому на основі аналізу доступних фішингових листів визначено ознаки, за якими можна розпізнати фішингові повідомлення. До них віднесено:

загальні або неофіційні привітання. Листи без персоналізації та формальностей, мають викликати підозри (наприклад, «Шановний клієнт»);

запит на особисту інформацію часто використовують кіберзлочинці, але банки, фінансові установи та більшість онлайн-сервісів намагаються цього уникати;

некоректна граматика. Орфографічні або друкарські помилки, а також незвичайні фрази часто можуть означати небезпеку, але брак помилок не є доказом легітимності;

несподівані повідомлення або будь-який незапланований контакт з банком має викликати підозри;

терміновість. За допомогою фішингових повідомлень часто намагаються викликати відчуття терміновості дій, залишаючи жертвам менше часу на роздуми;

пропозиція, від якої складно відмовитися.

Приклад фішингового повідомлення з відповідними ознаками наведено на рис. 1.

2. Аналіз заголовків електронного листа. Для виключення можливості, що адреса електронної пошти відправника адреса була підроблена треба переглянути заголовок електронного листа, тому що саме там містяться ознаки підробки адреси. Заголовок складається з серії рядків [8]. Кожне поле заголовка складається з одного рядка тексту ASCII із зазначенням назви поля, двокрапки та значення. Основні поля заголовків, пов'язані з транспортуванням повідомлень: To: (вказує адресу DNS основного одержувача); Cc: (визначає адресу вторинного одержувача); BCC: (визначає адресу копії третій стороні, про яку не знають основний та додатковий одержувач) ; From: (вказує ім'я особи, яка написала повідомлення); Sender :: (вказує адресу електронної пошти особи, яка надіслала повідомлення); Received: (стосується ідентифікації відправника, даних, а також часу отримання повідомлення. Також містить інформацію, яка використовується для пошуку помилок у системі маршрутизації); Return-Path: (цю інформацію додає агент передачі повідомлень. Ця частина використовується для вказівки способу повернення до відправника); Date: (дата і час відправлення повідомлення); Reply-To: (адреса електронної пошти, на яку слід надсилати відповіді); Message-Id: (посилається на унікальний номер для посилання на це повідомлення пізніше); In-Reply-To: (Message-Id повідомлення, на яке лист є відповіддю); References: (містить інші відповідні ідентифікатори повідомлень).

В залежності від операційної системи та поштового клієнту для відображення заголовків можуть використовуватися різні команди. Так в Gmail в акаунті Google це команда «Показати

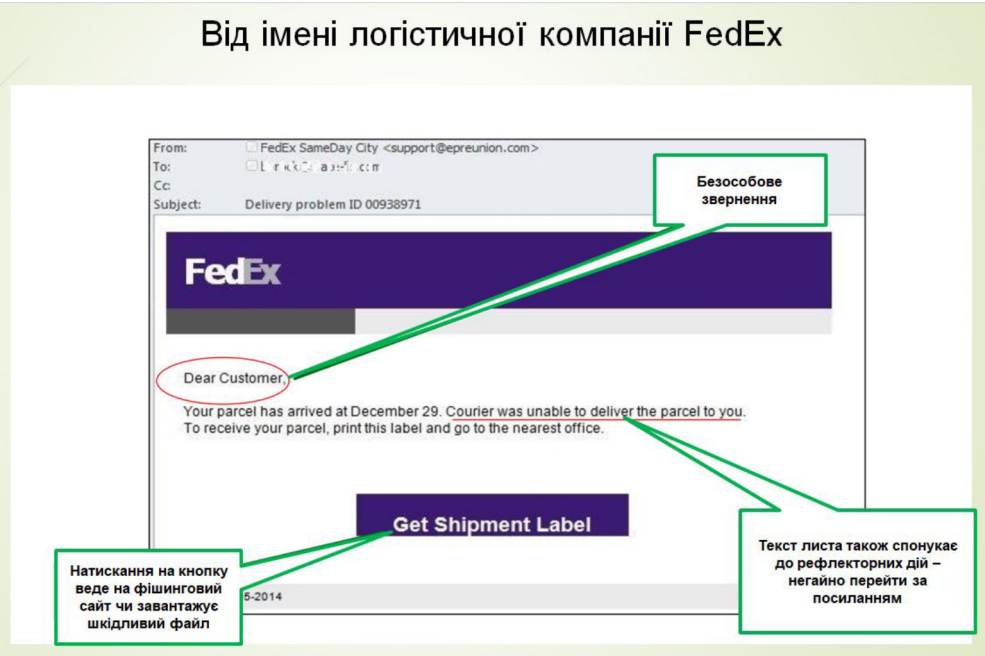


Рис. 1. Приклад фішингового листа

оригінал». В інших поштових службах це можуть бути команди такі як «Переглянути джерело повідомлення», або «Всі заголовки», або «Заголовки Інтернету» тощо. В [9] можна знайти інструкції щодо отримання даних заголовка з різних поштових клієнтів. Для зручності аналізу заголовків доцільно використовувати аналізатор – онлайн додаток, що на основі обробки заголовків з електронної пошти здійснює аналіз серверів, через які виконувалося надсилання листа. Збирається можлива інформація за цими серверами: IP адреса, географічне розташування, коли і на ім'я якого зареєстрований сервер, інколи номер телефону і поштова адреса власника сервера, тощо. Прикладами аналізаторів є Mxtoolbox,, Headers.aspx.

Під час аналізу заголовків треба звертати увагу на наступні аспекти:

- Received From: вказується ім'я хоста сервера-відправника, та якщо воно не збігається з заявленою адресою відправника, що це може бути ознакою нелегітимності;
- Return-Path: показує адресу, на яку буде повернений лист в разі невдалої доставки. Деякі підроблені електронні листи будуть містити підроблено поле «From» але не це поле, тому якщо у полі «Return-Path» та «From» містяться різні адреси, то це є ознакою підробки адреси відправника;
- X-Originating IP: Це поле може містити вихідну IP-адресу для поштового сервера відправника. Для отримання більш детальної інформації цій адресі для подальшого аналізу можна використовувати інструменти OSINT, наприклад набір інструментів IntelTechniques.
- Received-SPF: розшифровується як Sender Policy Framework чи інфраструктура політики відправника – це запис, який забезпечує взаєморозуміння між поштовими серверами відправника та одержувача. Він містить інформацію про те, з яких IP-адрес може надсилатися пошта від вказаного домену. За його допомогою можна знизити загальну кількість спаму, зменшити ймовірність того, що домен буде скомпрометований та захиститися від спаму. Тому якщо в цьому заголовку у отриманому листі вказано «pass», значить домен, використаний для відправки пошти, автентифіковано та можна буди впевненим у легітимності відправника електронного листа;
- DKIM (DomainKeys Identified Mail) – другий ступінь захисту під час передачі даних між поштовими серверами. Це механізм, який працює через ключі шифрування. Для того, щоб його активувати, створюються два ключі шифрування: приватний та публічний. Два ключі працюють у зв'язці. Коли сервер отримувача бачить лист, він запитує публічний ключ відправника. З його допомогою він розшифровує прихований підпис, який підтверджує авторство відправника. Отже, це спосіб авторизації, який не можна ігнорувати, тому якщо в цьому заголовку є «pass» то ймовірність що відправник не був підроблений – збільшується;

DMARC (Domain-based Message Authentication, Reportingand Conformance) – третій етап захисту. Це технологія, яка визначає, що робити з повідомленнями відправника, якщо вони не пройшли аутентифікацію за допомогою SPF та DKIM. Це правила, які встановлює відправник для листів, надісланих від його імені. Так відправник захищає своїх одержувачів від зловживань його репутацією, використання його домену шахраями. Тобто сам факт існування таких правил є ознакою легітимності відправника електронного листа. Тому треба звертати увагу на існування в цьому заголовку є «pass» в цьому заголовку.

3. Наступний етап аналізу отриманого електронного листа – це дослідження електронної адреси. Обов'язково треба звернути увагу на домен, з якого надіслано лист. Зрозуміло, що викликає підозру той факт, що, наприклад, американський чи німецький банк надсилатиме електронний лист з китайського домену. Обовязково треба перевірити, що адреса, з якої надіслано лист, дійсно існує. Для цього можна застосувати інструмент Hunter.io. У разі позитивного результату треба переглянути історію використання електронної пошти за допомогою відповідних інструментів, наприклад Emailrep.io. Це система сервісів, сканерів і служб накопичення, які збирають дані про адреси електронної пошти, домени та Інтернет-користувачів на основі даних з профілів соціальних мереж, професійних мережевих сайтів, витоків облікових даних даркнета, інших витоків даних, фішингових наборів, фішингових електронних листів, списків спаму, відкритих поштових ретрансляторів, віку та репутації домену, інформації про ризиковані адреси електронної пошти, тощо. Тому інформація, яку можна отримати з використанням цього сервісу може бути корисною для розуміння цілей відправника на основі аналізу попередніх дій, що відбувалися з використанням відповідної електронної адреси та свідчити про те, що лист – фішинговий.

Для більш глибокого аналізу адреси електронної пошти відправника у разі необхідності можна використовувати технології OSINT, розро-

блені, наприклад, Майклом Базелем, який працював 18 років як державний експерт розслідування комп'ютерних злочинів у робочої групи ФБР з кіберзлочинів. Його книги з відповідної тематики користуються популярністю у Сполучених Штатах, в Європі та використовуються державними установами як навчальні посібники зі збору розвідувальних даних та захисту особистої інформації. Так, у [10] можна знайти детальні рекомендації М. Базела щодо здійснення дослідження за технологіями OSINT за відомою електронною адресою для деанонімізації відправника. Саме їх можна використовувати у разі необхідності для встановлення реального відправника.

Також є можливість формулювання запиту до постачальника електронної пошти, якщо є юридичне обґрунтування. Відповідні запити формулюються згідно з діючим законодавством. Слід зазначити, що порядок доступу до таких даних регулюється законодавством тієї країни, де вони перебувають фізично. Так, наприклад, під час проведення кримінального провадження треба враховувати підстави та умови надання правової допомоги та процедуру написання запитів, яка детально розглянута в [11].

4. Аналіз посилання на ресурс, на який пропонується перейти у надісланому поштовому листі. Треба контролювати адреси сайтів та сторінок, на яких треба перейти та ввести будь-які дані, а саме знайти точну адесу відповідного сайту та порівняти з посиланням, яке було надіслано в листі. Різниця лише в одну літеру в адресі відповідного сайту вже є ознакою фішингу.

Висновки. Розроблено практичні рекомендації щодо аналізу отриманого електронного листа для виявлення ознак фішингу, в результаті ігнорування якого здійснюється запобігання продовженню кібератаки, першим кроком якої є фішинг. Що дозволяє, відповідно, уникнути витоку важливої інформації, тому що метою кібератак є доступ зловмисників до конфіденційної інформації. Перспективою подальших досліджень є більш глибоке дослідження кожного виду фішингу та розроблення методики протидії та деанонімізації зловмисників.

Список літератури:

1. Cyber Digest. *Огляд подій в сфері кібербезпеки*. НКЦК. Липень 2023. URL: https://surl.li/qlmafy (дата звернення: 12.02.2025).

2. Стартував проєкт із протидії кібершахрайству у фінансовому секторі. *Рада національної безпеки і оборони України*. URL: https://www.rnbo.gov.ua/ua/Diialnist/6103.html (дата звернення: 12.02.2025).

3. 2024. Phishing statistics and trends: What you need to know URL: https://nordvpn.com/pl/blog/phishing-statistics/ (дата звернення: 19.03.2025).

4. Хакерське угруповання Armageddon/Gamaredon. Технічна сторона кібератак ФСБ РФ проти України. ДКІБ СБУ. Київ, 2021. URL: https://ssu.gov.ua/uploads/files/DKIB/Технічний звіт діяльності Армагедон.pdf (дата звернення: 12.02.2025).

5. What is Phishing? Types of Phishing Attacks. URL: https://www.checkpoint.com/cyber-hub/threat-prevention/what-is-phishing/ (дата звернення: 12.02.2025).

6. The anatomy of a phish. URL: https://iwebtechnology.net/the-anatomy-of-a-phish/ (дата звернення: 12.02.2025).

7. How to prevent phishing attacks URL: https://nordvpn.com/pl/blog/how-to-prevent-phishing/ (дата звернення: 12.02.2025).

8. E-mail-format. URL: https://www.geeksforgeeks.org/e-mail-format/ (дата звернення: 12.02.2025).

9. How to Get Email Headers. URL: https://mxtoolbox.com/Public/Content/EmailHeaders/ (дата звернення: 12.02.2025).

10. Open Source Intelligence Techniques: Resources for Searching and Analyzing Online Information. *Paperback*. 2022. By Michael Bazzell. 480 p.

11. Методичні рекомендації щодо виконання вимог міжнародних договорів та КПК України про міжнародну правову допомогу при проведенні процесуальних дій – К. : Генеральна прокуратура України; Національна академія прокуратури України, 2017. – 60 с.

Boiko O. V., Zalevsky S. V., Savchuk V. S. ANALYSIS OF AN EMAIL FOR SIGNS OF PHISHING

Practical recommendations have been developed for analyzing a received email to identify signs of phishing, as a result of which ignoring it prevents the continuation of a cyberattack, the first step of which is phishing. Since the beginning of Russian military aggression, the number of threats in Ukraine's cyberspace has been constantly increasing, cybercriminals have significantly intensified their activities during the period of martial law in Ukraine and are conducting phishing campaigns in order to obtain confidential data from the population of Ukraine, with 74 percent of phishing attacks falling on email phishing. It should be noted that phishing emails can be sent allegedly on behalf of state bodies, international organizations and individuals,

and decoy documents can be requests for information, international correspondence, official correspondence letters of state bodies of Ukraine, etc. Therefore, it is important for users who may be the objects of future cyberattacks to be able to recognize phishing based on the analysis of a received email in order to ignore such emails and stop the cyberattack. Therefore, it is necessary to develop practical recommendations for analyzing an email, the application of which will allow users to detect signs of phishing in the received email and, accordingly, prevent the continuation of a cyberattack, the first step of which is phishing, and avoid information leakage, because the goal of cyberattacks is for attackers to access confidential information. The only source of information for analyzing and establishing the fact of phishing is the received email, i. e. the sender's email address and the content of the message, which includes a link to a resource through which confidential information is collected. Therefore, analyzing an email to determine whether this email is phishing is proposed to be carried out in the following sequence: 1) analyzing its content, 2) analyzing the email headers, 3) analyzing and searching for information by the sender's email address, 4) analyzing the link to the resource.

Key words: *phishing, cyberattack, email, email, osint.*

УДК 004.652
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/05

Василенко О. О.
Національна академія наук України

ОПТИМІЗАЦІЯ ОБРОБКИ БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕГУЛЯРНИХ ВИРАЗІВ

Стаття присвячена дослідженню використання регулярних виразів (RegEx) у процесах обробки бібліографічних даних. У статті розкрито важливість забезпечення швидкості, точності та автоматизації процесів введення, редагування та структурування інформації. Розкрито механізм роботи регулярних виразів як ефективного інструменту для пошуку, заміни та видалення непотрібних елементів у текстових даних, що сприяє оптимізації процесів опрацювання бібліографічної інформації. З'ясовано, що використання регулярних виразів у бібліотечних інформаційних системах (БІС) дозволяє автоматизувати численні етапи обробки даних, включаючи очищення тексту від зайвих пробілів, символів і небажаних форматів, а також структурування змісту, що є критично важливим для формування та подальшого використання бібліографічних записів. Доведено, що цей підхід особливо актуальний для таких процесів, як обробка відсканованих текстів анотацій, змістів наукових видань, створення аналітичних записів і переробка списків статей. На прикладі бібліотечної системи Koha визначено, що застосування регулярних виразів у поєднанні з інструментами, такими як текстовий редактор Notepad++, значно спрощує та автоматизує процеси введення і редагування бібліографічних записів. Обґрунтовано, що використання регулярних виразів дозволяє не лише скоротити час, необхідний для обробки даних, але й підвищити їхню якість, мінімізуючи кількість помилок і забезпечуючи узгодженість форматування. Результати дослідження свідчать, що застосування регулярних виразів є особливо корисним для великих бібліотек, які працюють із значними обсягами даних, включаючи наукові видання, де необхідна висока точність і відповідність певним стандартам бібліографічного опису. З'ясовано, що автоматизація рутинних завдань завдяки регулярним виразам дозволяє бібліотекарям зосередитися на більш важливих аспектах роботи, таких як аналіз контенту та надання послуг користувачам.

Ключові слова: *регулярні вирази, оптимізація обробки даних, бібліографічні записи, Koha, Notepad++, обробка відсканованих даних.*

Постановка проблеми. В умовах стрімкого зростання обсягу цифрових бібліографічних записів бібліотеки стикаються з необхідністю впровадження нових технологій для підвищення ефективності обробки текстових даних. Регулярні вирази є одним із найпотужніших інструментів для виконання автоматизованих операцій пошуку, заміни й валідації даних, особливо в таких системах, як електронні каталоги бібліотек. Їх використання значно спрощує рутинні процеси, зокрема виправлення помилок форматування, очищення полів метаданих, стандартизацію назв і дат, а також аналіз масивів записів для виявлення шаблонів.

Зважаючи на обмежений бюджет і людські ресурси більшості бібліотек, впровадження регулярних виразів стає не лише бажаним, але й необхідним для оптимізації робочих процесів. Згідно з даними Міжнародної федерації бібліотечних асоціацій та установ (IFLA), кількість записів, які обробляються у великих бібліотеках, щороку зростає на 10–15 %, що робить питання автоматизації ключовим для забезпечення доступності та якості каталогів. Бібліотеки, які впроваджують технології регулярних виразів, знижують трудові витрати на 30–50 % при обробці тексту, що доводить їхню практичну значущість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Українські та зарубіжні дослідники приділяли значну увагу можливостям застосування регулярних виразів у бібліотечній справі. У своїх дослідженнях акцентується увага на використанні регулярних виразів для стандартизації бібліографічних описів у системах на базі UNIMARC. Автор зазначає, що регулярні вирази дозволяють не лише автоматизувати виправлення помилок у форматуванні, але й виявляти дублікати записів [1]. Досліджується використання регулярних виразів для аналізу бібліографічних даних у процесах інтеграції каталогів, зокрема під час міграції даних між різними платформами автоматизованих бібліотечних систем (АБІС). Smyk також наголошує на можливостях регулярних виразів у вирішенні проблем, пов'язаних із різними форматами запи-

сів і мовними варіаціями [2]. Пропонується підхід до використання регулярних виразів для розпізнавання текстових шаблонів у бібліографічних записах. У своїх працях дослідники акцентують увагу на важливості правильного налаштування виразів для уникнення помилкових результатів під час очищення даних [3]. Інші джерела [4–6] обговорюють технічні аспекти роботи з регулярними виразами в бібліотечних інформаційних системах, їхню інтеграцію з мовами програмування (наприклад, Python або JavaScript), а також порівняння ефективності різних алгоритмів обробки тексту.

Разом із тим, аналіз наукових публікацій показує, що недостатньо вивченими залишаються аспекти практичного впровадження регулярних виразів у бібліотечні інформаційні системи, зокрема їх адаптація для обробки текстів різними мовами. Наявні дослідження здебільшого зосереджені на технічних аспектах використання регулярних виразів, проте менше уваги приділено оцінці їхньої ефективності у великих бібліотечних базах даних, що містять різноманітні типи бібліографічної інформації. Також залишається відкритим питання щодо оптимальних методик налаштування регулярних виразів для зменшення кількості помилково розпізнаних записів та підвищення точності автоматизованої обробки даних.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження та обґрунтування ефективності використання регулярних виразів (RegEx) для оптимізації обробки бібліографічних даних. Для досягнення цієї мети передбачається вирішення таких завдань, а саме: проаналізувати існуючі підходи до автоматизації обробки бібліографічних записів у бібліотечних інформаційних системах (БІС); дослідити можливості використання регулярних виразів для очищення, стандартизації та структурування бібліографічних даних; оцінити ефективність регулярних виразів у вирішенні типових проблем, таких як виправлення форматування, виявлення дубльованих записів і уніфікація метаданих. Результати дослідження дозволять оцінити доцільність застосування регулярних виразів у бібліотечній практиці та розробити рекомендації щодо їх ефективного використання.

Виклад основного матеріалу. Регулярні вирази є важливим інструментом у сучасній бібліотечній практиці, який дозволяє значно покращити якість бібліографічних даних та знизити витрати на їх обробку. Огляд літератури свідчить про значний потенціал цієї технології для подальшого вдосконалення автоматизованих бібліотечних систем. У бібліотеці бібліографічні записи, як правило, створюються вручну каталогізаторами, що забезпечує детальне внесення інформації відповідно до стандартів. Кожен елемент бібліографічного опису – назва, автор, рік видання, місце видання, видавництво, ISBN тощо – розташовується в окремих полях або підполях електронного каталогу. Такий підхід дозволяє структурувати інформацію, забезпечуючи легкість доступу до потрібних даних під час пошуку або сортування.

Однак подібне структурування не виключає проблем, які виникають при обробці записів. У багатьох випадках з'являється необхідність виправлення помилок або внесення змін у текстову інформацію, наприклад, через використання різних форматів або помилкове введення даних. Зокрема, переплутані значення у полях (наприклад, рік замість місця видання), дублікати записів чи нестандартизовані скорочення створюють складнощі для автоматизованих бібліотечних систем.

Така потреба може стати особливо актуальною при об'єднанні даних із кількох каталогів, підготовці записів до міграції між системами або інтеграції їх у централізовані бази даних. У цих випадках регулярні вирази стають ефективним

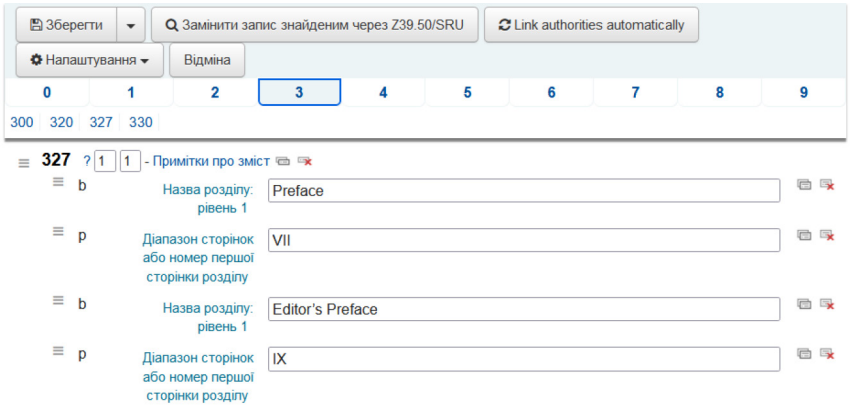


Рис. 1. Редагування бібліографічного запису

інструментом для автоматизації пошуку і заміни тексту, а також стандартизації записів у масштабі великих бібліотечних систем.

Однак потреба в інструментах пошуку та заміни стає критично важливою при роботі з відсканованими текстами, зокрема анотаціями чи змістом. Після розпізнавання такі тексти часто містять велику кількість зайвих символів і помилок форматування, які необхідно очистити перед подальшою обробкою або включенням у бібліографічні записи.

Очищення подібних текстів є більш ефективним, якщо виконувати його не у текстовому процесорі Word, адже цей інструмент зазвичай зберігає зайве форматування, яке ускладнює стандартизацію даних. Більше того, в Word стандартно відсутня повноцінна підтримка пошуку за регулярними виразами, що значно обмежує можливості автоматизації.

Натомість після розпізнавання текстів доцільно використовувати текстовий редактор, наприклад, Notepad++ [4], який підтримує регулярні вирази. У цьому редакторі можна виконати комплексне очищення тексту, включаючи:

– видалення спеціальних символів, що залишаються після сканування;

– заміну табуляцій на пробіли для забезпечення рівномірного форматування;

– видалення зайвих пробілів, що можуть створювати візуальний або структурний безлад.

Використання Notepad++ дозволяє автоматизувати ці завдання, що значно зменшує час, витрачений на підготовку текстів, та підвищує їх якість для подальшої обробки у бібліотечних системах.

Поява розширеного редактора бібліографічних записів в автоматизованій бібліотечній інформаційній системі Koha [5] значно розширила можливості обробки та редагування бібліографічних даних. Цей інструмент (див. рис. 2) забезпечує користувачів зручним інтерфейсом для роботи з метаданими, що дозволяє спрощувати створення структурованого змісту записів.

Розширений редактор надає низку переваг:

– можливість легкої навігації між полями та підполями запису;

– автоматизацію введення стандартних елементів опису;

– підтримку валідаторів для перевірки правильності введених даних відповідно до бібліографічних стандартів, таких як MARC;

– інтеграцію з інструментами для обробки текстів, що дозволяє уникати дублювання та помилок у бібліографічних записах.

Завдяки цим функціям система Koha не лише оптимізує процес створення нових записів, але й спрощує редагування наявних, забезпечуючи кращу організацію бібліографічної інформації. Це особливо важливо у великих бібліотеках, де ефективність роботи залежить від швидкого доступу до якісно оформлених даних.

Для якісного структурування бібліографічних записів, кожна сторінка та кожен заголовок будь-якого рівня мають бути записані в окреме підполе. Це особливо актуально для змісту книг і наукових видань, де обсяги даних надто великі для ручного введення. Навіть після сканування та розпізнавання тексту, без автоматизації процесу структурування працювати із змістом могли б лише ентузіасти, оскільки це вимагало б значних витрат часу та зусиль.

Notepad++ пропонує інструменти для автоматизації рутинних завдань, таких як структурування даних, за допомогою функціоналу макросів. Макроси дозволяють записувати послідовності команд для виконання повторюваних операцій. У поєднанні з використанням регулярних виразів

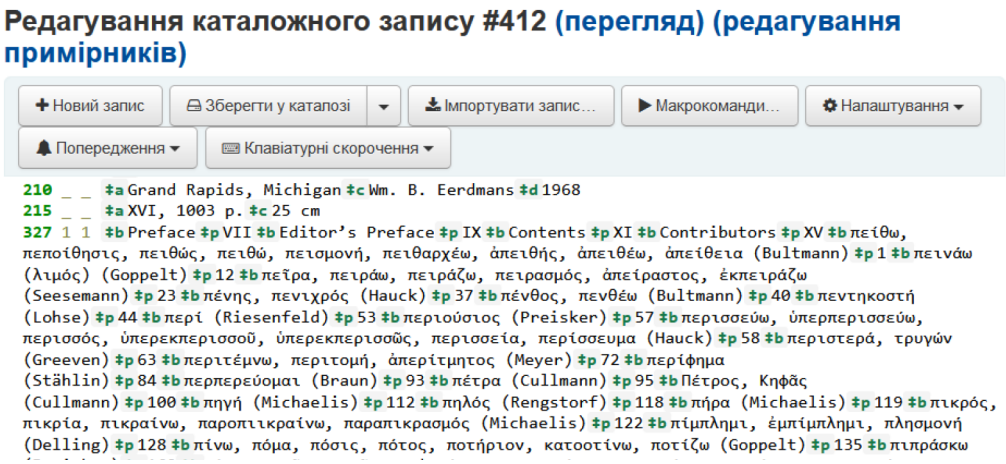


Рис. 2. Розширений редактор

це відкриває можливість ефективної обробки тексту навіть для користувачів, які не є технічними фахівцями.

Наприклад, регулярні вирази можуть бути застосовані для:

– автоматичного розділення тексту на підполя залежно від заголовків або маркерів;

– видалення зайвих символів чи форматування;

– упорядкування та форматування змісту для подальшого використання в бібліотечній системі.

Завдяки таким інструментам забезпечується висока швидкість і точність обробки текстів, що значно скорочує час, необхідний для підготовки структурованих бібліографічних записів, і підвищує їхню якість.

Після очищення тексту зміст книги потребує додаткової підготовки для правильного структурування та подальшої обробки. Основні вимоги до підготовленого тексту включають:

1. Окремий рядок для кожного елемента змісту, де в кінці рядка має бути зазначений номер сторінки.

2. Заголовки 1 рівня розташовуються без додаткових налаштувань, тобто без відступів.

3. Заголовки 2 рівня повинні мати одну табуляцію на початку рядка.

4. Заголовки 3 рівня потребують двох табуляцій на початку рядка.

Після ручного налаштування або за допомогою автоматизації цих правил можна запускати підготовлений макрос. Макрос виконує послідовність команд із пошуку та заміни, що автоматизують подальшу обробку тексту. Основні етапи роботи макросу включають:

– Вирівнювання форматування за визначеними правилами (наприклад, видалення зайвих пробілів чи заміна дефісів на тире).

– Автоматичне розставлення табуляцій для відповідних рівнів заголовків.

– Упорядкування номерів сторінок та перевірка їх правильності.

Цей підхід значно зменшує ручну роботу, підвищує точність даних і забезпечує їх сумісність із системами автоматизованої обробки, такими як Koha або інші АБІС.

Використання регулярних виразів дозволяє реалізувати складні трансформації тексту, які включають збереження та використання знайдених даних у процесі заміни. Зокрема, перший регулярний вираз виконує такі дії:

1. Знаходить в кінці рядка послідовність арабських або римських чисел, що представляють номери сторінок.

2. Замінює пробіли перед номером сторінки на мітку підполя, яка використовується для позначення сторінок у бібліографічному записі.

3. Вставляє знайдені номери сторінок у відповідне місце структури запису.

Інші пошукові запити, які виконуються, належать до типу Розширений пошук і включають:

– Використання розширених спеціальних символів для виявлення попереднього нового рядка.

– Аналіз кількості табуляцій на початку рядка, що відповідають рівню заголовку (одна табуляція для заголовків другого рівня, дві – для третього і так далі).

– Видалення зайвих пробілів або інших небажаних символів, які можуть порушувати структуру.

– Автоматичну заміну цих елементів мітками відповідних підполів, таких як мітка для заголовків чи підзаголовків.

Ця технологія дозволяє ефективно структурувати зміст, значно скорочуючи час на ручну обробку. Крім того, автоматизовані дії забезпечують високу точність і відповідність стандартам опису, що важливо для інтеграції даних у бібліотечні системи або інші бази даних.

Навіщо	Режим пошуку	Шукати	Замінити
Сторінки в кінці рядку	Регулярні вирази	\s+([\divxcdIVXCD]+)\s*$	‡p\1
Заголовок 5 рівня	Розширений	\r\n\t\t\t\t	‡f
Заголовок 4 рівня	Розширений	\r\n\t\t\t	‡e
Заголовок 3 рівня	Розширений	\r\n\t\t	‡d
Заголовок 2 рівня	Розширений	\r\n\t	‡c
Заголовок 1 рівня	Регулярні вирази	^	327 _ 1 ‡b

Рис. 3. Зміст в UNIMARC 327.
Цей макрос є послідовністю пошуку та замін

Навіщо	Режим пошуку	Шукати	Замінити
Поле і індикатори	Регулярні вирази	327\s[_012]\s[_01]\s	
Заголовок 1 рівня	Розширений	‡b	\r\n
Заголовок 2 рівня	Розширений	‡c	\r\n\t
Заголовок 3 рівня	Розширений	‡d	\r\n\t\t
Заголовок 4 рівня	Розширений	‡e	\r\n\t\t\t
Заголовок 5 рівня	Розширений	‡f	\r\n\t\t\t\t
Сторінки в кінці рядку	Звичайний	‡p	(пробіл)

Рис. 4. UNIMARC 327 в зміст.
Цей макрос є послідовністю пошуку та замін

Останній етап обробки тексту за допомогою регулярних виразів забезпечує додавання правильно оформлених міток поля до кожного заголовка першого рівня. Це особливо актуально для рядків, які починаються з нового рядка. Використання регулярних виразів дозволяє створити більш елегантний і гнучкий спосіб обробки, ніж простий пошук спеціальних символів, які вказують на новий рядок. Регулярні вирази також дозволяють додавати текст на початку першого рядка, що є важливою перевагою.

Аналогічно, регулярні вирази застосовуються для обробки відсканованих списків статей з метою формування посилань на аналітичні записи [6]. Перед застосуванням регулярних виразів список потребує попередньої підготовки. Однак, цей процес є дещо складнішим через специфіку списків статей. Зокрема, потребується:

1. Зміна порядку розташування прізвища та власного імені для приведення записів до стандартного формату.

2. Оформлення підполів для авторів додавання прізвища та ініціалів автора як заголовка.

3. Внесення перших відомостей про відповідальність, наприклад, зазначення співавторів, редакторів або перекладачів у відповідних підполях.

Ці дії спрямовані на стандартизацію записів, яка забезпечує відповідність аналітичних записів встановленим бібліографічним нормам. Регулярні вирази в цьому контексті стають незамінним інструментом, адже дозволяють швидко і автоматично виконувати масові трансформації тексту, які потребували б значних витрат часу в разі ручної обробки. Таким чином, застосування регулярних виразів є ключовим кроком для автоматизації та покращення обробки даних у бібліотечних системах, забезпечуючи ефективність і точність навіть у найскладніших сценаріях.

Практичний кейс: *Оптимізація обробки бібліографічних даних за допомогою регулярних виразів*

У бібліотечних інформаційних системах (БІС) важливим аспектом є обробка та структуризація бібліографічних записів. Багато з них формуються вручну, що може призводити до помилок і зайвої витрати часу. Для прискорення процесу та зменшення помилок важливо використовувати інструменти автоматизації. Один із таких інструментів – регулярні вирази (RegEx). Вони дозволяють швидко здійснювати пошук, заміну та видалення елементів даних, оптимізуючи таким чином процес обробки великих масивів інформації.

У бібліографічних записях часто виникають такі проблеми, як:

– Невідповідність форматів запису (наприклад, різні формати дати).

– Дублікатні записи, створені через помилки при введенні або скануванні.

Навіщо	Режим пошуку	Шукати	Замінити
Сторінки в кінці рядку	Регулярні вирази	\s([cCpP])?.?\s*([\divxcdIVXCD]+)\s*$	‡p\u\1. \2
Назва	Розширений	\r\n\t	‡t
Автор	Регулярні вирази	^	464 _ 1 ‡a

Рис. 5. Список статей в UNIMARC 464.
Цей макрос є послідовністю пошуку та замін

– Наявність непотрібних символів, пробілів або табуляцій, що ускладнюють подальшу обробку даних.

Крім того, багато бібліографічних записів містять складні структури, наприклад, зміст, який складається з багатьох рівнів заголовків. Для ручної обробки таких записів потрібен значний час і зусилля.

Метою кейсу є продемонструвати, як можна за допомогою регулярних виразів оптимізувати обробку бібліографічних даних, автоматизуючи такі процеси, як:

– Очищення даних від непотрібних символів.
– Переведення записів у єдиний формат.
– Створення аналітичних записів на основі відсканованого тексту.

Початкові бібліографічні записи часто містять зайві символи, пробіли або неправильне форматування після сканування або ручного введення. Для прикладу, припустимо, що є відсканований зміст книги, який містить багаторівневі заголовки та численні пробіли, розміщені не відповідно до структури.

1. Видалення зайвих пробілів та символів. Регулярні вирази дозволяють швидко знайти непотрібні символи, які залишаються після сканування або неправильного форматування. Наприклад:

– Видалення зайвих пробілів між словами.
– Замінити декілька пробілів на один.
– Видалення спецсимволів, які не є частинами бібліографічного опису.

Приклад регулярного виразу:

```
arduino
Копировать код
\s+ → « »
```

Цей вираз знаходить всі зайві пробіли (окрім одного) і замінює їх на єдиний пробіл.

2. Оформлення заголовків. Якщо необхідно автоматично перетворити зміст на структуровану форму, можна використовувати регулярні вирази для додавання табуляцій або інших символів для визначення рівнів заголовків.

Приклад регулярного виразу для заміни заголовків:

```
scss
Копировать код
^([0-9]+)\. (.+) → \t$2
```

Цей вираз дозволяє замінити заголовки другого рівня, додаючи табуляцію на початку кожного заголовка.

Автоматичне створення аналітичних записів Регулярні вирази можуть також бути використані для автоматизації створення аналітичних записів. Наприклад, при обробці сканованого списку статей можна за допомогою регулярних виразів автоматично змінювати порядок прізвища та імені авторів, або додавати необхідні дані для створення підполів «Автор» та «Відповідальність».

Приклад регулярного виразу для зміни порядку імені та прізвища:

```
bash
Копировать код
([A-Za-z]+), ([A-Za-z]+) → $2, $1
```

Цей вираз змінює місцями прізвище та ім’я автора.

3. Переваги використання регулярних виразів

1) *Швидкість обробки*. Регулярні вирази дозволяють значно зменшити час обробки великих обсягів даних, оскільки операції заміни та пошуку виконуються дуже швидко.

2) *Автоматизація*. Використання регулярних виразів дозволяє автоматизувати процеси, які раніше виконувались вручну, що мінімізує людську помилку.

3) *Гнучкість*. Регулярні вирази можуть бути налаштовані для виконання різних типів операцій на текстових даних, що дозволяє застосовувати їх до різних типів записів та форматів.

4) *Зручність*. Застосування регулярних виразів у таких текстових редакторах, як Notepad++

Навіщо	Режим пошуку	Шукати	Замінити
Сторінки в кінці рядку	Звичайний	‡p	(пробіл)
Назва	Розширений	‡t	\r\n\t
Автор	Звичайний	‡a	
Поле і індикатори	Регулярні вирази	464 [_01] [_01]	

Рис. 6. UNIMARC 464 в список статей.
Цей макрос є послідовністю пошуку та замін

або в БІС Koha, дозволяє швидко адаптувати інструмент до специфічних потреб бібліотеки.

Висновки. Використання регулярних виразів для обробки бібліографічних записів є важливим кроком до автоматизації процесів у бібліотечних системах. Аналіз показав, що, хоча введення бібліографічного опису вручну в окремі підполя менш залежить від функцій пошуку та заміни, наступна обробка записів, зокрема для підготовки структурованого змісту або створення аналітичних записів, значно виграє від застосування регулярних виразів. Розширений редактор, доступний в автоматизованій бібліотечній інформаційній системі (АБІС) Koha, у поєднанні з макросами текстового редактора Notepad++, відкриває широкі можливості для ефективної автоматизації таких завдань, як: вставка структурованого змісту в окремі підполя; створення аналітичних записів після обробки сканованого тексту; очищення тексту від зайвих символів, видалення помилок форматування, а також впорядкування заголовків різних рівнів.

Автоматизація створення аналітичних записів вимагає ширшого використання регулярних виразів для швидкої обробки масивів даних. Ці інструменти дозволяють: здійснювати складні пошуково-замінні операції, що включають трансформацію даних у структурований формат. Підготовлювати списки статей, змінюючи порядок прізвищ та ініціалів авторів, розподіляючи їх по відповідних підполях та додаючи інші елементи бібліографічного опису. Обробляти змісти багатотомних видань і наукових книг, які традиційно є трудомісткими для каталогізаторів.

Регулярні вирази також дозволяють бібліотечним фахівцям з мінімальними технічними знаннями виконувати завдання, які раніше вимагали б участі програмістів. Завдяки можливості автоматизації рутинних процесів вони сприяють економії часу, покращенню якості каталогів і зниженню ймовірності помилок, спричинених людським фактором. Узагальнюючи, можна стверджувати, що використання регулярних виразів у бібліотечній практиці є перспективним напрямом для вдосконалення автоматизованих бібліотечних інформаційних систем, що підвищує ефективність обробки бібліографічних даних і забезпечує високу якість управління інформацією.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі можуть включати удосконалення алгоритмів застосування регулярних виразів для складніших завдань обробки бібліографічних записів, таких як семантичний аналіз даних та визначення зв'язків між записами. Інтеграцію регулярних виразів із технологіями машинного навчання для автоматичного коригування бібліографічних описів. Розробку спеціалізованих модулів для автоматизованих бібліотечних інформаційних систем, які дозволять користувачам з мінімальними знаннями програмування ефективно застосовувати регулярні вирази. Порівняльний аналіз ефективності регулярних виразів у поєднанні з іншими методами обробки текстових даних, зокрема нейронними мережами та алгоритмами природної мови. Подальше дослідження цих аспектів сприятиме ще більшій автоматизації бібліотечних процесів і підвищенню якості управління бібліографічною інформацією.

Список літератури:

1. Bazoge A. Applying Natural Language Processing to Textual Data From Clinical Data Warehouses: Systematic Review. *JMIR Med Inform*. 2023. No. 11. URL: https://doi.org/10.2196/42477

2. CICERO: A Domain-Specific Architecture for Efficient Regular Expression Matching / D. Parravicini et al. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst*. 2021. P. 1–24. URL: https://surl.lu/asusnz (date of access: 21.11.2024).

3. Comparison of bibliographic data sources: Implications for the robustness of university rankings / C.-K. Huang et al. *Quantitative Science Studies*. 2020. No. 1(2). P. 445–478. URL: https://doi.org/10.1162/qss_a_00031

4. Grapefruit: An Open-Source, Full-Stack, and Customizable Automata Processing on FPGAs / R. Rahimi et al. *2020 IEEE 28th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM)*. New York, NY, 2020. P. 138–147. URL: https://doi.org/10.1109/FCCM48280.2020.00027

5. Heng G., Han M.-J. Revamping Metadata Maker for 'Linked Data Editor': Thinking Out Loud. *The Code4Lib Journal*. 2023. No. 55. URL: https://journal.code4lib.org/articles/16925 (date of access: 02.12.2024).

6. Muddana A., Vinayakam S. Regular Expressions. *Python for Data Science*. 2024. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-52473-8_11

7. Nagaraju S., Shanmugham B., Baskaran K. High throughput token driven FSM based regex pattern matching for network intrusion detection system. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 47, no. 1. P. 139–143. URL: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.028

8. New trends in bibliometric APIs: A comparative analysis / A. Velez-Estevez et al. *Information Processing & Management*. 2023. Vol. 60, no. 4. URL: https://doi.org/10.1016/j.ipm.2023.103385

9. Optimizing Regular Expressions via Rewrite-Guided Synthesis / J. McClurg et al. *PACT '22: Proceedings of the International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques*. 2022. P. 426–438. URL: https://doi.org/10.1145/3559009.3569664

10. Regex Matching with CountingSet Automata / L. Turoňová et al. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*. 2020. Vol. 4. 218. URL: https://doi.org/10.1145/3428286

11. Software-Hardware Codesign for Efficient In-Memory Regular Pattern Matching / L. Kong et al. *PLDI*. 2022. URL: https://arxiv.org/pdf/2209.05686

Vasylenko O. O. OPTIMIZATION OF BIBLIOGRAPHIC DATA PROCESSING USING REGULAR EXPRESSIONS

The article is dedicated to the study of the use of regular expressions (RegEx) in the processing of bibliographic data. The article reveals the importance of ensuring speed, accuracy, and automation in the processes of data entry, editing, and structuring. The mechanism of regular expressions as an effective tool for searching, replacing, and removing unnecessary elements in textual data is explored, contributing to the optimization of bibliographic information processing. It has been established that the use of regular expressions in library information systems (LIS) enables the automation of numerous stages of data processing, including text cleaning from unnecessary spaces, symbols, and unwanted formatting, as well as content structuring, which is critically important for the formation and further use of bibliographic records. It has been proven that this approach is particularly relevant for processes such as the processing of scanned annotation texts, tables of contents of scientific publications, the creation of analytical records, and the reformatting of article lists. Based on the example of the Koha library system, it has been determined that the application of regular expressions in combination with tools such as the Notepad++ text editor significantly simplifies and automates the processes of entering and editing bibliographic records. It has been substantiated that the use of regular expressions not only reduces the time required for data processing but also improves its quality by minimizing errors and ensuring consistency in formatting. The research results indicate that the application of regular expressions is particularly useful for large libraries that handle significant volumes of data, including scientific publications, where high accuracy and compliance with specific bibliographic description standards are required. It has been established that the automation of routine tasks through regular expressions allows librarians to focus on more important aspects of their work, such as content analysis and providing services to users.

Key words: *regular expressions, data processing optimization, bibliographic records, Koha, Notepad++, scanned data processing.*

УДК 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/06

Вовченко Д. С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Олещенко Л. М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ БАЛАНСУВАННЯ ВУЗЛІВ В ПРОГРАМНИХ СИСТЕМАХ РОЗПОДІЛЕНОЇ ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ДАНИХ

Алгоритми балансування навантаження відіграють важливу роль у розподілених системах обробки великих даних, забезпечуючи ефективне використання ресурсів, зменшення часу виконання запитів та підвищення надійності роботи. Вибір конкретного алгоритму залежить від характеристик системи, типу навантаження та вимог до продуктивності. У статті представлені актуальні алгоритмічні рішення для вирішення проблеми розподілення навантаження у системах з багатьма вузлами. Проаналізовано існуючі алгоритми балансування вузлів, зокрема, Least Loaded, Fair Scheduling, DAG Scheduler, Dynamic Resource Allocation, Least Request, Weighted Round Robin, Consistent Hashing, Adaptive Load Balancing та Partition-Aware Load Balancing, які спрямовані на покращення загальної ефективності розподілених систем обробки великих даних.

Метою даної статті є дослідження ефективності сучасних рішень, висвітлення проблем часу відповіді серверу, обробки запитів, використання ресурсів, а також обмеження при дослідженні великих даних. Аналіз алгоритмів балансування навантаження вузлів у розподілених системах обробки великих даних показав, що використання таких методів, як Dynamic Resource Allocation у Apache Spark, дозволяє підвищити пропускну здатність на 30–50 %, Adaptive Load Balancing у Netflix зменшує час очікування запитів до 40 % у пікові періоди, а Consistent Hashing у Google Cloud Load Balancer мінімізує перенаправлення запитів при зміні конфігурації кластера, що підвищує стабільність системи; проте основними недоліками розглянутих алгоритмів є обмежена адаптивність до непередбачуваних змін у навантаженні, затримки при масштабуванні, а також складність налаштування та обчислювальні витрати на динамічний перерозподіл ресурсів.

Подальші дослідження спрямовані на розробку алгоритму балансування вузлів з урахуванням усіх переваг та недоліків сучасних рішень. Запропонований удосконалений алгоритм балансування вузлів дозволить уникнути проблеми перевантаження одного з вузлів завдяки використанню технологій динамічного розрахунку ваги вузлів та машинного навчання на прикладах роботи в сучасних системах з урахуванням параметрів ефективності при обробці великих даних.

Ключові слова: *великі дані, розподілені програмні системи з багатьма вузлами, алгоритми балансування вузлів, CPU, серверна пам'ять, робота з базами даних, машинне навчання.*

Постановка проблеми. Обробка великих даних потребує ефективного розподілу обчислювальних ресурсів для забезпечення високої продуктивності, надійності та мінімізації часу виконання запитів. Одним із ключових аспектів розподілених систем є балансування навантаження між вузлами кластера. Ефективні алгоритми балансування навантаження забезпечують оптимальне використання обчислювальних потужностей, запобігають перевантаженню окремих серверів і підвищують загальну продуктивність системи. Усе більше сучасних вебзастосунків стикається з проблемою обробки великих даних – наборів інформації надвеликих розмірів, оскільки це потребує великої кількості ресурсів. Одним із шляхів її вирішення є розбиття серверу на декілька вузлів для досягнення масштабованості системи. Додавання нового вузла фактично створює новий сервер з власними ресурсами, який можна використати для кращої обробки інформації. Одним із найбільш поширених недоліків цього підходу є проблема з коректним розподіленням навантаження між вузлами. Доволі поширена ситуація – коли один з вузлів перенавантажений або, навпаки, недовантажений, що призводить до зниження швидкодії подібних систем шляхом створення черг вхідних запитів на одному з вузлів і збільшення загального часу їх

обробки. Щоб уникнути цієї ситуації, було створено ряд алгоритмів для балансування навантаження між вузлами [1]. Аналізуючи такі параметри, як пропускна здатність, кількість оброблених запитів, середній час обробки, вони розподіляють вхідний потік інформації на той чи інший вузол. Наразі запропоновано багато алгоритмів, деякі змінюють параметри для аналізу, експериментують з іншими алгоритмами, або ж використовують такі технології, як машинне навчання. Кожен з запропонованих варіантів модифікації має свої переваги та недоліки, однак, багато цих досліджень мало приділяють увагу проблемі обробки великих даних, що є особливо актуально при динамічному їх розподілені у вже працюючих системах [2]. При появі подібних проблем часто спостерігається зниження загальної продуктивності програмних систем через перенавантаження одного з вузлів.

Сучасні системи розподіленої обробки великих даних активно використовують алгоритми балансування навантаження для забезпечення рівномірного розподілу обчислювальних ресурсів між вузлами. Проте, незважаючи на значний прогрес у цій галузі, існує низка невирішених проблем, які обмежують ефективність таких систем.

В умовах змінного потоку даних традиційні алгоритми балансування, такі як Round Robin або статичний розподіл ваг, можуть демонструвати низьку ефективність. Вузли можуть бути перевантажені або недовантажені через нерівномірний розподіл задач.

У розподілених системах вузли можуть мати різну продуктивність, обсяг пам’яті та мережеву пропускну здатність. Багато класичних алгоритмів не враховують ці фактори, що призводить до неефективного використання ресурсів. Передача великих обсягів даних між вузлами може створювати додаткові затримки, особливо в умовах обмеженої мережевої пропускної здатності. Відсутність ефективних алгоритмів, що враховують ці обмеження, знижує загальну продуктивність системи.

Багато систем балансування не враховують можливі збої вузлів або варіації продуктивності в реальному часі. Відсутність механізмів адаптації до змін у доступності ресурсів може спричинити втрату продуктивності або навіть збої в обробці даних.

Сучасні алгоритми балансування рідко оптимізовані для мінімізації енергоспоживання, що стає критично важливим у масштабних обчислювальних кластерах та хмарних середовищах.

Зважаючи на вищезазначені проблеми, виникає необхідність у розробці удосконаленого алгоритму балансування вузлів у системах розподіленої обробки великих даних, який враховуватиме зміну навантаження у реальному часі та адаптуватиметься до поточного стану ресурсів; враховуватиме гетерогенність обчислювальних вузлів, оптимізуючи їх використання; мінімізуватиме затримки передачі даних шляхом ефективного розподілу задач між вузлами; підвищуватиме відмовостійкість системи за рахунок автоматичного перерозподілу навантаження у разі виходу вузлів з ладу; забезпечуватиме оптимізацію енергоспоживання для зниження експлуатаційних витрат.

Отже, актуальним є розробка нового підходу до балансування вузлів, що використовуватиме методи машинного навчання та динамічне обчислення ваги вузлів на основі їхньої поточної продуктивності та навантаження. Це дозволить підвищити ефективність розподілених систем обробки великих даних, забезпечуючи швидкість, надійність та оптимальне використання ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Алгоритми балансування навантаження вузлів поділяються на статичні та динамічні.

Статичні методи передбачають розподіл навантаження на початковому етапі роботи системи без можливості адаптації до змінних умов виконання. Розглянемо основні завдання алгоритмів цього типу.

Round Robin – використовує рівномірний розподіл запитів між серверами по черзі.

Least Connections – використовує спрямування запитів на сервери з найменшою кількістю активних з’єднань.

Weighted Round Robin – використовує розподіл запитів з урахуванням продуктивності вузлів.

Динамічні методи адаптуються до поточного стану системи, забезпечуючи рівномірне навантаження в реальному часі. До основних алгоритмів цього типу належать наступні.

Least Response Time – використовує спрямування запитів на сервери з найнижчим часом відгуку.

Adaptive Load Balancing – використовує штучний інтелект та машинне навчання для оптимізації розподілу навантаження.

Work Stealing – використовує динамічне перерозподілення завдань між вузлами в разі їх нерівномірного завантаження.

Сучасні програмні системи для розподіленої обробки великих даних, такі як Apache Hadoop, Apache Spark та Kubernetes, використовують різні

алгоритми балансування навантаження, зокрема, Hadoop YARN розподіляє ресурси на основі вимог до пам'яті та процесорного часу, Apache Spark – застосовує динамічний розподіл завдань між виконавцями, Kubernetes – використовує алгоритми розподілу подів між вузлами на основі навантаження та потужності обчислювальних ресурсів.

Одним із представлених у наукових роботах оптимізованих алгоритмів балансування вузлів є покращений алгоритм на основі обрахунку ваги та мінімальних з'єднань. Базові варіанти цих підходів широко використовуються у системах з декількома вузлами і є доволі поширеними, однак, вони мають недолік. Для коректного розподілення вхідного потоку необхідно динамічно розраховувати вагу кожного з вузлів і на основі цієї ваги керувати потоком, що не є можливо в базових варіантах цих методів. Покращений алгоритм усуває цей недолік та дозволяє динамічно розраховувати вагу. Для цього алгоритм використовує кілька параметрів, зокрема, L – навантаження на сервер, C – використання CPU та M – рівень заповненості пам'яті. Крім того, також використовуються: P – кількість з'єднань, B – пропускна здатність та D – використання диску. Для всіх цих параметрів характерне наступне: $C, M, P, B, D \in [1, 0]$. Ці параметри використовуються для розрахунку навантаження на сервер:

$$L = 1 - (1 - \lambda_c C)(1 - \lambda_m M) \times$$
$$\times (1 - \lambda_p P)(1 - \lambda_b B)(1 - \lambda_d D), \quad (1)$$
$$\lambda_i \geq 0, \quad 0 \leq (1 - \lambda_i X_i) \leq 1. \quad (2)$$

Розраховуючи навантаження на вузлах таким чином, можна динамічно спостерігати за навантаженням та розподіляти вхідний потік відповідно до його значення. Для цього розраховується порогове значення ∂:

$$\partial = \left| 1 - \frac{\dfrac{C(S_i)}{W(S_i)}}{\left(\dfrac{1}{n}\right)\sum_{1}^{n}\dfrac{C(S_i)}{W(S_i)}} \right|. \quad (3)$$

Параметр $W(S_i)$ репрезентує поточну вагу серверу i, а $C(S_i)$ – кількість підключень до нього. З формули (1), якщо значення $L(S_i)$ менше порогового значення δ, то навантаження на сервер i вважається низьким і, навпаки, при $L(S_i) \geq \delta$ – високим. Виходячи з цього, нову динамічну формулу ваги можна представити наступним чином:

$$W(S_i) = \begin{cases} W(S_i) + \partial, \ L(S_i) \leq \delta \\ W(S_i) - \partial, \ L(S_i) > \delta \end{cases} \quad (4)$$

Балансування навантаження між серверами за даним алгоритмом представляється блок-схемою на Рис. 1. Представлена блок-схема описує алгоритм балансування навантаження в розподіленій системі, який динамічно перерозподіляє ресурси між серверами для забезпечення оптимальної роботи. Алгоритм починається з перевірки, чи навантаження на кожен сервер пропорційне його обчислювальним можливостям. Якщо це так, сервер продовжує надавати послуги без змін. Якщо навантаження розподілене нерівномірно, перевіряється, чи всі сервери перевищують допустиме навантаження. Якщо ж ні, система працює в поточному режимі. Якщо ж перевищення є, алгоритм коригує вагові коефіцієнти серверів, що впливають на їхній пріоритет при розподілі навантаження. Після цього вибирається сервер, який найбільше підходить для обробки нових запитів, і перевіряється, чи його поточне навантаження не перевищує допустимого рівня. Якщо навантаження в межах норми, сервер продовжує працювати. Якщо ж він перевантажений, додається новий сервер для обробки частини запитів. Такий підхід дозволяє автоматично адаптуватися до змін у навантаженні та ефективно використовувати ресурси розподіленої системи.

Якщо аналізувати показники, то даний алгоритм порівнювався зі зваженими алгоритмами Round-Robin та найменших з'єднань, і в результаті показав покращення у часі відповіді, загальному навантажені на сервері та зменшив час затримки. Однак, дане дослідження має недолік, оскільки воно було виконане лише на тестовому середовищі, що не дає повної ясності при роботі з реальними даними, особливо з великими даними.

Іншим прикладом алгоритму балансування можна навести алгоритм на основі відстані клієнта до сервера [4]. За замовчуванням, будь-яку систему з декількома вузлами можна представити наступною архітектурою (Рис. 2).

Разом усі вузли системи працюють як одне ціле, однак, кожен вузол може знаходитись на різній відстані до певного клієнта. Кількість підключень, які необхідно виконати або отримати доступ до певного вузла, можна позначити параметром h. Інший параметр, який в цьому контексті вартий уваги це – це час затримки (Round-Trip Time або RTT), який позначають як t. Він означає час, за який користувач отримує відповідь від серверу на

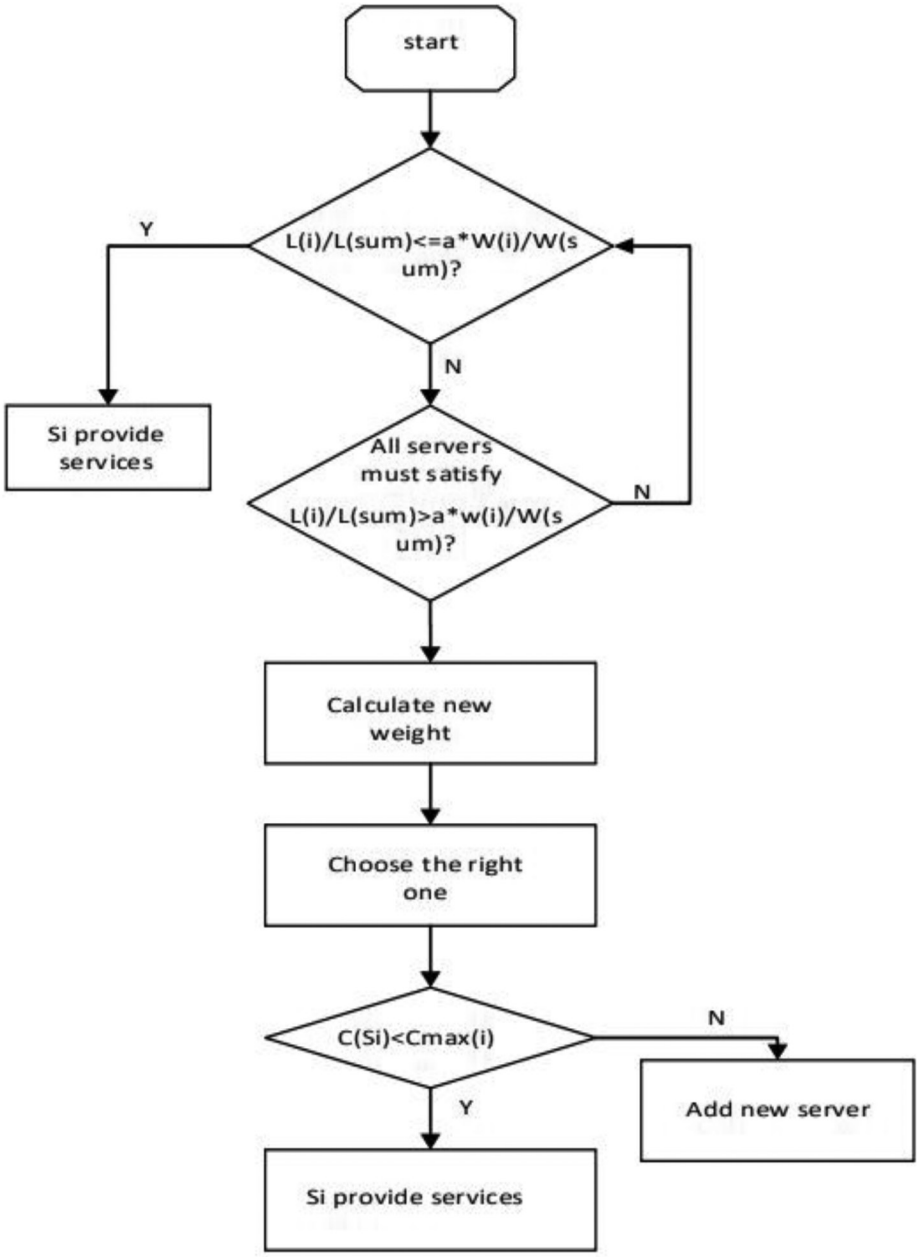


Рис. 1. Блок-схема процесу балансування навантаження між серверами [3]

свій початковий запит. На основі цих двох параметрів можна виділити значення P, що відображає відстань до серверу у даному алгоритмі:

$$P = h + t; \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{P}. \quad (6)$$

Значення Q репрезентує коефіцієнт вузла у алгоритмі відстані. З цього логічно випливає, що чим більше значення P, тим менше буде Q для цього вузла, дасть меншу вірогідність потрапляння запиту на нього. Чим менше значення P, тим з більшою вірогідністю цей вузол обробить запит.

Для визначення відстані до кожного з вузлів спочатку клієнт надсилає запит до всіх доступних вузлів і з отриманих відповідей розраховує значення P для них. На основі цих даних будується упорядкований масив вузлів, де на першому місці буде вузол з найменшим значення P. При подальшому надходженні наступних N запитів вони по одному розподіляються між серверами у порядку створеного масиву. Для наступних масивів запитів $N + i$ в алгоритмі вже враховується поточне навантаження на вузлах і на його основі формується новий упорядкований масив вузлів. На основі цих кроків досягається баланс між вузлами при використанні алгоритму на основі відстані

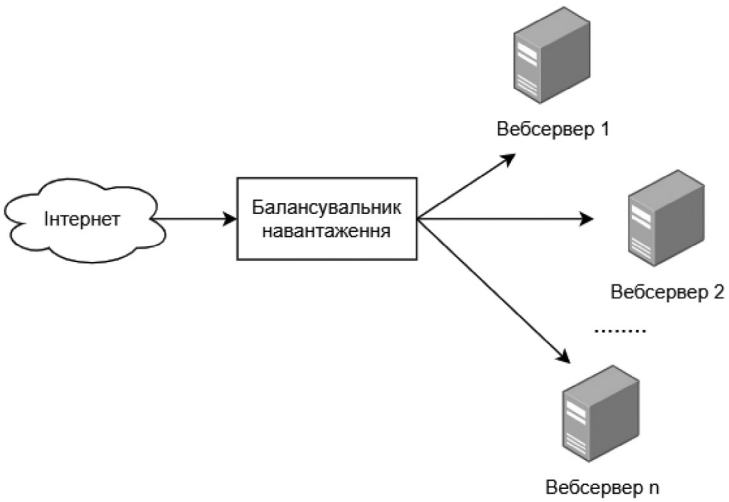


Рис. 2. Архітектура системи з декількома вузлами

між клієнтом і сервером. Даний алгоритм показав свою ефективність у порівнянні з RR алгоритмом та покращив значення часу відповіді серверу та загального навантаження.

Наступний запропонований алгоритм базується на параметрах навантаження на відповідному вузлі і використовує чотири аргументи: використання CPU, пам'яті, мережі та пропорційне відношення використаної пам'яті на контейнері [5]. Використання CPU розраховується як відношення суми витраченого CPU в користувацькому режимі та режимі центрального процесора до суми CPU у всіх трьох можливих режимах: користувацькому, режимі процесора та режимі очікування:

$$CPU_{Ratio_i(t)} = \frac{CPU_{usr(t)} + CPU_{kernel(t)}}{CPU_{usr(t)} + CPU_{kernel(t)} + CPU_{free(t)}}. \quad (7)$$

Наступний параметр використання пам'яті розраховується через відношення вільної пам'яті до загальної:

$$MEM_{Ratio_i(t)} = 1 - \frac{MEM_{free(t)}}{MEM_{total(t)}}. \quad (8)$$

Використання мережі знаходиться через відношення суми надісланих та отриманих байт до загальної пропускної здатності вузла за часовий проміжок t:

$$NET_{Ratio_i(t)} = \frac{NET_{sent(t)} + NET_{rev(t)}}{NET_{band}}. \quad (9)$$

Останній параметр відповідає за відношення використаної пам'яті на контейнері. Варто зазначити, що під контейнерами маються на увазі вузли у середовищі утиліти Docker. Ця утиліта використовується для поєднання усіх наявних вузлів системи і без неї вони не можуть працювати злагоджено. Цей параметр розраховується за формулою:

$$D_{i(t)} = \frac{\sum mem_{usage}}{\sum mem_{limit}}. \quad (10)$$

Сам алгоритм передбачає розрахунок ваги для кожного з доступних вузлів на основі чотирьох раніше зазначених параметрів. Для кожного вузла з самого початку проставляється значення ваги рівне 100, однак, від нього віднімається значення параметру навантаження в реальному часі $L_i(t)$, формула якого:

$$L_i(t) = \alpha_1 \cdot CPU_{Ratio_i(t)} + \alpha_2 \cdot MEM_{Ratio_i(t)} + \\ + \alpha_3 \cdot NET_{Ratio_i(t)} + \alpha_4 \cdot D_{i(t)}. \quad (11)$$

Коефіцієнти α обираються довільно, однак вони мають відповідати наступним вимогам:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1 \quad 0 < \alpha_i < 1. \quad (12)$$

Виходячи з цього, значення ваги на поточному вузлі розраховується як:

$$W_i(t) = 100 - L_i(t). \quad (13)$$

Варто зазначити, що значення ваги – це динамічний параметр, який розраховується в кожний заданий момент часу t та може змінюватись для кожного вузла. Іншими словами, для кожного вузла в окремий момент часу є своє значення $W_i(t)$ і в залежності від нього система обирає, на який з вузлів краще перенаправити вхідні запити.

В результаті тестування даний алгоритм позитивно вплинув на швидкість відповіді серверу у порівнянні з базовими RR та алгоритмом на основі найменших з'єднань.

Варто зазначити, що в даній роботі не розглядаються статичні алгоритми балансування вузлів, вони обчислюються вагу кожного вузла на основі його конфігурації і в процесі роботи вона не змінюється. Це може призвести до перевантаження одного з вузлів і в той же час, недовантаження іншого. Динамічні алгоритми набагато практичніші за рахунок можливості змінювати вагу через певні проміжки часу.

Сучасні динамічні алгоритми часто відрізняються лише тими параметрами, на основі яких розраховується вага і як приклад цього можна навести інший алгоритм [6], який використовує частоту з'єднань до вузла та навантаження на буферну зону ядра, також відому як Kernel Socket Buffer.

Частота з'єднань до вузла розраховується як відношення кількості з'єднань T на певному вузлі системи за проміжок часу до середньої кількості з'єднань усієї системі, де N – кількість вузлів системи:

$$L(T)_i = T_i \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} T_i}{N} \right)^{-1} . \qquad (14)$$

У системі Linux пакети проходять через протоколи TCP/IP та загальне програмне забезпечення мережевого драйвера. Все це відбувається завдяки буферу сокетів Kernel Socket Buffer, який відповідає за передачу повідомлень між джерелом і приймачем. Крім цих двох параметрів алгоритм також використовує стандартні для багатьох подібних алгоритмів значення утилізації CPU та пам'яті на вузлі. З певною періодичністю часу система збирає інформацію про навантаження, CPU, частоту з'єднань та буферу сокетів з кожного з вузлів. У разі відсутності зв'язку з певним вузлом, його вага змінюється на 0 і він більше не буде отримувати нові повідомлення. У разі успішного результату, на основі отриманих параметрів розраховується поточна вага вузла, чим вона більша, тим більша ймовірність того, що новий запит потрапить саме на цей вузол. Окрім того, в подібних алгоритмах розрахунку ваги існує певний ліміт, іншими словами, якщо нова розрахована вага не суттєво відрізняється від попереднього значення, то вона не буде встановлена як поточна. Це необхідно для того, аби уникнути занадто частих змін у налаштуваннях, що може призвести до перевантажень усієї системи. Також завдяки подібним алгоритмам можливо відповісти, чи потрібно додавати в систему новий вузол. Якщо вага усіх вузлів на сервері наближена до певного фіксованого значення w, то тоді це вказує на перенавантаження і необхідність масштабування системи. Це працює і в зворотній бік, якщо значення ваги на всіх вузлах високе, то це говорить про стабільну роботу системи. Для аналізу даного алгоритму він був порівняний з алгоритмом найменших з'єднань і в результаті показав кращі значення часу відповіді серверу.

Усі ці дослідження показали свою ефективність у порівнянні з базовими алгоритмами RR або мінімальних з'єднань, однак, всі вони мають певний недолік, оскільки розраховують лише вагу вузлів, але не беруть до уваги зміст вхідних запитів. Самі по собі вхідні запити відрізняються за складністю і тому на їх виконання необхідні різні ресурси і різний час. Доцільно також розподіляти складні запити на відповідні вузли, оскільки не виключено, що навіть легко навантажений вузол може швидко перенавантажитись через складність запитів на ньому. У зв'язку з цим варто також розглянути алгоритм, який вираховує можливу тривалість вхідного запиту і на цій основі передає його на відповідний вузол [7]. Найперше, що виконується в даному алгоритмі, це розрахунок очікуваного часу обробки вхідного запиту. Досягається це шляхом використання онлайн системи машинного навчання. Метод онлайнового машинного навчання – це підтип машинного навчання, у якому модель в режимі реального часу оброблює дані та надає результат. Перевагою його використання в даному випадку є те, що непотрібно зберігати результат обробки, створюючи при цьому додаткове навантаження. Також сам по собі процес машинного навчання є ресурсоємним, аби викликати його кожного разу, і тому в даному алгоритмі процес розрахунку очікуваної тривалості запитів розділений з самим процесом навчання. Це необхідно для того, аби система не витрачала ресурси на це. В алгоритмі обирається певний проміжок часу і для запитів у ньому машинне навчання розраховує потенційну тривалість, це відбувається паралельно до того, як на основі минулого проміжку і вже отриманих результатів відбувається розподілення запитів до вузлів.

Для обчислення ймовірної тривалості запиту модель машинного навчання аналізує представлення цього запиту в базі даних. По своїй суті, кожен запит в систему представляє собою операцію CRUD з даними, які містяться всередині БД [8]. Це може бути як запит на створення, читання, редагування або видалення інформації, в БД ці операції відображаються мовою SQL. Модель машинного навчання аналізує запит SQL та вибирає з нього чотири параметри:

– до якої таблиці направлений запит;
– які умови вибірки з цієї таблиці;
– чи присутні в запиті регулярні вирази;
– чи всередині запиту міститься запит до іншої таблиці.

На основі перших трьох пунктів можливо отримати очікуваний час виконання запиту і додаток до цього, завдяки останньому пункту можна також зрозуміти його складність. Обчисливши очікуваний час, даний алгоритм також аналізує стандартні для багатьох інших алгоритмів такі параметри як: навантаження на вузлі та кількість поточних з'єднань, і на основі всієї отриманої інформації розподіляє запити на відповідні вузли. Аналіз даного підходу показав ефективність у зменшенні часу обробки у порівнянні з базовими алгоритмами RR та мінімальних з'єднань.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є аналіз недоліків наявних алгоритмів та пропозиція удосконаленого алгоритму балансування вузлів з використанням машинного навчання та динамічного обчислення ваги кожного вузла, що визначає його поточну обчислювальну спроможність, завантаженість та здатність до обробки додаткових задач у динамічних умовах. Це дозволить підвищити ефективність розподілу ресурсів, зменшити час обробки запитів та покращити загальну продуктивність системи за рахунок адаптивного коригування навантаження на кожен вузол у режимі реального часу.

Виклад основного матеріалу. Аналіз алгоритмів балансування навантаження вузлів в розподілених системах обробки великих даних базується на оцінці ключових метрик продуктивності, таких як середній час відгуку, рівень завантаженості вузлів, пропускна здатність та масштабованість.

Алгоритм Round Robin демонструє швидку обробку запитів у рівномірних середовищах з подібними вузлами, забезпечуючи середній час відгуку близько 20–30 мс у системах із рівномірним навантаженням, проте в умовах неоднорідного середовища цей показник може зростати на 50–70 %. Least Connections дає кращі результати в умовах змінного навантаження, зменшуючи середній час відгуку на 15–25 % у порівнянні з Round Robin, але збільшує затримки через додатковий моніторинг стану вузлів. Weighted Round Robin у великих системах забезпечує зниження дисбалансу до 10 %, але ефективність залежить від правильного налаштування ваг. Least Response Time може зменшити час відгуку на 20–40 % у порівнянні з простими алгоритмами, однак потребує постійного вимірювання продуктивності вузлів, що призводить до додаткових обчислювальних витрат. Consistent Hashing добре працює у масштабованих середовищах, дозволяючи знизити кількість перенаправлених запитів на 70–80 % під час змін у кластері, проте ефективність розподілу навантаження залежить від рівномірності хеш-функції. Централізоване балансування навантаження показує високу продуктивність у малих кластерах (до 100 вузлів), але зростання затримок до 30–50 % при розширенні системи робить його менш ефективним для великих кластерів. Децентралізовані методи забезпечують кращу масштабованість, але мають вищі витрати на координацію вузлів. Використання алгоритмів на основі штучного інтелекту дозволяє досягти приросту продуктивності на 15–35 % у динамічних середовищах за рахунок глибокого аналізу поточного навантаження та прогнозування майбутніх змін, хоча такі методи вимагають значних ресурсів для навчання та реалізації. Таким чином, вибір оптимального алгоритму залежить від вимог до продуктивності, масштабованості та характеристик навантаження системи, а поєднання декількох методів дозволяє досягти найкращих показників ефективності (Таблиця 1).

Алгоритми балансування навантаження вузлів використовуються у відомих програмних системах розподіленої обробки великих даних для підвищення ефективності обчислень та рівномірного розподілу ресурсів. У системі Apache Hadoop YARN застосовується комбінація Least Loaded та Fair Scheduling, що дозволяє рівномірно розподіляти обчислювальні завдання між вузлами та забезпечує мінімальний час очікування для критичних задач. Apache Spark використовує DAG Scheduler у поєднанні з Dynamic Resource Allocation, що оптимізує балансування навантаження між кластерами, дозволяючи підвищити пропускну здатність на 30–50 % у порівнянні зі статичним розподілом ресурсів. У Kubernetes, який забезпечує оркестрацію контейнеризованих додатків, застосовуються алгоритми Least Request і Weighted Round Robin, що дозволяє ефективно розподіляти навантаження між сервісами та динамічно масштабувати поділ ресурсів. Google Cloud Load Balancer використовує методи Consistent Hashing, що мінімізує кількість перенаправлених запитів під час змін у кластері, що є критично важливим для масштабованих мікросервісних архітектур. У Netflix застосовують алгоритми Adaptive Load Balancing, які базуються на машинному навчанні для передбачення навантаження та динамічного розподілу запитів між

Таблиця 1

Аналіз алгоритмів балансування навантаження вузлів

Алгоритм	Переваги	Недоліки
Round Robin	Простота реалізації, рівномірний розподіл навантаження, швидкість прийняття рішення	Не враховує продуктивність вузлів, неефективний при неоднорідному навантаженні
Least Connections	Враховує поточне навантаження вузлів, адаптується до змін у навантаженні	Вимагає додаткових обчислень для аналізу стану вузлів
Weighted Round Robin	Враховує продуктивність вузлів, ефективніший за класичний Round Robin	Потребує правильного налаштування ваг для вузлів, складніший у реалізації
Least Response Time	Мінімізує затримки обробки запитів, динамічно адаптується до змін	Вимагає постійного моніторингу часу відгуку вузлів
Consistent Hashing	Зменшує кількість переміщень даних при зміні кількості вузлів, добре підходить для кешування	Вимагає додаткових обчислень для розрахунку хешу, не завжди забезпечує рівномірний розподіл
Centralized Load Balancing	Глобальне бачення системи, можливість оптимального розподілу навантаження	Один вузол є «вузьким місцем», може стати точкою відмови
Distributed Load Balancing	Висока масштабованість, відсутність центральної точки відмови	Складність реалізації та координації між вузлами
AI/ML-based Load Balancing	Автоматична адаптація до змін у системі, оптимізація розподілу навантаження	Велика обчислювальна складність, потребує навчання моделі

серверами, що дозволяє зменшити час очікування до 40 % у пікові години навантаження. У системах обробки потокових даних, таких як Apache Kafka, використовується Partition-Aware Load Balancing, що забезпечує рівномірний розподіл повідомлень між брокерами та знижує ризик перевантаження окремих вузлів. Таким чином, різні алгоритми балансування навантаження знаходять застосування у провідних програмних платформах для забезпечення ефективності, надійності та масштабованості обробки великих даних.

Не дивлячись на наведені результати порівняння та покращення таких показників, як час обробки запиту та швидкість відповіді серверу, питання ефективності даних алгоритмів все ще відкрите. Всі вони фокусуються лише на одному або декількох параметрах, не охоплюючи загальну картину. Дуже часто при зменшенні часу відповіді значно зростає утилізація ресурсів чи вартість підтримки самої системи, що знецінює ефективність алгоритму. Іншим недоліком є те, що ці алгоритми порівнювались лише з базовими алгоритмами (RR або мінімальних з'єднань), що не є об'єктивно, оскільки дані алгоритми вже не є актуальними у сучасних системах обробки великих даних. Також в розглянутих наукових роботах зазначається, що випробування проводились у експериментальних умовах без тестування в реальних програмних системах обробки великих даних. Також сучасні алгоритми балансування вузлів майже не піднімають питання розподіленої обробки великих даних, про що зазначено в дослідженнях [9]. Наведені приклади не є виключенням, навіть при умовах лабораторних досліджень не проводилась симуляція генерування великих даних, і тому цей аспект лишається відкритим.

У зв'язку з розглянутими недоліками, у даній роботі планується розробити удосконалений алгоритм балансування вузлів з використанням машинного навчання та динамічного обчислення ваги з подальшим тестуванням отриманого результату на великих даних. Причина використання машинного навчання полягає у тому, що на основі проведеного дослідження даний підхід показав найкращі результати у порівняні з алгоритмами RR та мінімальних з'єднань. Недоліком цього підходу є те, що машинне навчання потребує додаткових ресурсів для своєї роботи. В самому дослідженні був акцент на цьому аспекті, однак, не зазначено чи покращення результатів вартувало росту використання ресурсів. Через використання динамічного обчислення ваги планується обійти даний недолік, оскільки подібні алгоритми не вимагають надлишкових ресурсів і, не дивлячись на нижчу ефективність у порівнянні з використанням машинного навчання, все одно показали покращення ключових параметрів. Через поєднання цих двох підходів планується досягти балансу між використанням можливостей машинного навчання та покращити ефективність динамічного розрахунку ваги.

У запропонованому алгоритмі після надходження нового запиту система буде розраховувати вагу кожного з вузлів, після чого буде розраховуватися очікувана тривалість цього запиту з урахуванням отриманої ваги і вже на основі отри-

маного результату відбуватиметься розподіл між доступними варіантами (для кращого розуміння вважаєм, що сервер має два вузли). Даний метод потребує експериментального дослідження, адже теоретично неможливо прорахувати його ефективність, тільки дослідження з живим набором даних може дати точні результати.

Запропонований алгоритм вибору вузла для обробки запиту базується на розрахунку метрик продуктивності кожного доступного вузла. Після надходження запиту система аналізує такі характеристики вузлів, як поточне завантаження, швидкість обробки та інші параметри, і на їх основі обчислює вагові коефіцієнти для кожного вузла. Далі виконується розрахунок очікуваної тривалості виконання запиту на кожному вузлі. На основі цих значень алгоритм приймає рішення про розподіл запиту, вибираючи найбільш оптимальний вузол (N1 або N2) для обробки, що мінімізує час виконання та забезпечує рівномірне балансування навантаження.

Висновки. Аналіз алгоритмів балансування вузлів у розподілених програмних системах обробки великих даних показав, що кожен із розглянутих підходів має свої переваги та обмеження залежно від конкретного сценарію використання. Least Loaded та Fair Scheduling забезпечують рівномірний розподіл навантаження, але можуть не враховувати специфіку оброблюваних задач. DAG Scheduler оптимізує виконання складних багатозалежних процесів, однак його складність обмежує масштабованість. Алгоритм Dynamic Resource Allocation ефективний для адаптивних систем, проте потребує додаткових обчислювальних ресурсів для моніторингу.

Алгоритми Least Request та Weighted Round Robin добре працюють у високонавантажених сервісах, але можуть страждати від нестабільності при різкій зміні навантаження. Consistent Hashing зменшує витрати на перенаправлення запитів, проте менш ефективний для рівномірного балансування. Adaptive Load Balancing та Partition-Aware Load Balancing забезпечують високу продуктивність у масштабованих системах, але вимагають складної конфігурації.

Результати дослідження показали, що комбіновані або гібридні підходи, що поєднують адаптивність та контекстну оптимізацію, мають найбільший потенціал для використання в сучасних розподілених середовищах. Усі проаналізовані методи мали обмежене тестування з експериментальним набором даних, порівнювались лише з базовими застарілими алгоритмами балансування, такими як RR та мінімальних з'єднань і фокусувались лише на небагатьох параметрах, ігноруючи значення інших. Крім того, в даних алгоритмах не було розкрите питання розподіленої обробки великих даних та ефективності роботи з ними. У зв'язку з цим виникає потреба у розробці алгоритму балансування вузлів з використанням найкращих практик існуючих алгоритмів, таких як машинне навчання та розрахунок ваги. Для вдосконаленого алгоритму планується виконати тестування з урахуванням недоліків попередніх підходів. Планується порівняння даного алгоритму з сучасними аналогами та дослідженням його ефективності при роботі з великими даними з урахуванням значень усіх параметрів ефективності. Незважаючи на розвиток алгоритмів балансування, існують проблеми, пов'язані з високою варіативністю робочих навантажень, необхідністю швидкої адаптації та ефективного управління ресурсами у розподілених системах обробки великих даних. Перспективними напрямами досліджень є використання глибокого навчання для прогнозування навантаження, інтеграція балансування з технологіями Edge Computing для розподілених обчислень на периферії мережі, а також оптимізація енергоспоживання в дата-центрах через адаптивні алгоритми балансування.

Список літератури:

1. Zhou S. An Improved dynamic load-balancing Algorithm for Cluster. *Journal of Computer and Modernization*. 2012. Vol. 1. P. 135–139. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2475.2012.01.036

2. Singh N., Hamid Y., Juneja S. Load balancing and service discovery using Docker Swarm for microservice based big data applications. *Journal of Cloud Computing 12, 4*. 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s13677-022-00358-7

3. Pan Z., Jiangxing Z. Load Balancing Algorithm for Web Server Based on Weighted Minimal Connections. *Journal of Web Systems and Applications*. 2017. Vol. 1. P. 1–8. DOI: https://dx.doi.org/10.23977/jwsa.2017.11001

4. Pei-rui J., Li-min M., Yu-zhou S., Yang-tian-xiu H. A client proximity based load balance algorithm in web sever cluster. *2nd International Conference on Wireless Communication and Network Engineering*. 2017. P. 317–322.

5. Li R., Li Y., Li W. An integrated load-balancing scheduling algorithm for nginx-based web application clusters. *Journal of Physics: Conference Series 1060 012078*. 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1060/1/012078

6. Wei C., Hou J., Ma D., Zhao J., Sun Y. Design and implementation of a TCP long connection load balancing algorithm based on negative feedback mechanism. *Journal of Physics: Conference Series 1659 012001*. 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1659/1/012001

7. Omori M., Nishi H. Request Distribution for Heterogeneous Database Server Clusters with Processing Time Estimation. *International Conference on Industrial Informatics* (INDIN), Porto. 2018, P. 278–283. DOI: 10.1109/INDIN.2018.8471931

8. Truica C.-O., Radulescu F., Boicea A., Bucur I.. Performance Evaluation for CRUD Operations in Asynchronously Replicated Document Oriented Database. *International Conference on Control Systems and Computer Science*. Bucharest. 2015. P. 191–196, DOI: 10.1109/CSCS.2015.32

9. Jafarnejad Ghomi E., Masoud Rahmani A., Nasih Qader N.. Load-balancing algorithms in cloud computing: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. Vol. 88. 2017. P. 50–71. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.04.007.

Vovchenko D. S., Oleshchenko L. M. ANALYSIS OF NODE BALANCING ALGORITHMS IN DISTRIBUTED BIG DATA PROCESSING SOFTWARE SYSTEMS

Load balancing algorithms play a crucial role in distributed big data processing systems by ensuring efficient resource utilization, reducing query execution time, and enhancing system reliability. The choice of a specific algorithm depends on system characteristics, workload type, and performance requirements. This paper presents current algorithmic solutions to the load balancing problem in multi-node systems. The research examines existing node balancing algorithms, including Least Loaded, Fair Scheduling, DAG Scheduler, Dynamic Resource Allocation, Least Request, Weighted Round Robin, Consistent Hashing, Adaptive Load Balancing, and Partition-Aware Load Balancing, aimed at improving the overall efficiency of distributed big data processing systems.

The objective of this paper is to investigate the effectiveness of modern solutions and highlight unresolved timeliness issues: the predominant focus on common parameters such as server response time and query processing time while ignoring other efficiency factors such as resource utilization and cost, as well as limitations in research that overlook the specifics of big data processing. The analysis of load balancing algorithms in distributed big data processing systems has shown that methods such as Dynamic Resource Allocation in Apache Spark can increase throughput by 30–50 %, Adaptive Load Balancing in Netflix reduces request wait time by up to 40 % during peak periods, and Consistent Hashing in Google Cloud Load Balancer minimizes request redirection when cluster configurations change, thereby enhancing system stability. The main drawbacks of the analyzed algorithms include limited adaptability to unpredictable workload changes, delays in scaling, as well as complexity in configuration and computational overhead for dynamic resource redistribution.

Future research aims to develop a node balancing algorithm that takes into account all the advantages and disadvantages of modern solutions. The proposed improved node balancing algorithm will prevent the issue of overloading specific nodes and demonstrate the feasibility of using dynamic node weight calculation technologies and machine learning in modern systems, considering a broader range of efficiency parameters and big data processing requirements.

Key words: *big data, distributed multi-node software systems, node balancing algorithms, CPU, server memory, database operations, machine learning.*

UDC 004.942:622.7
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/07

Volovetskyi O. O.
Kryvyi Rih National University

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A SYNTHETIC DATA GENERATOR FOR MODELING TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE IRON ORE BENEFICIATION PROCESS

The paper presents the results of developing a specialized synthetic data generator for modeling technological parameters of the iron ore beneficiation process. The developed generator implements a modular approach that includes parameter configuration, basic signal generation, and controlled noise addition. Methods for generating basic signals are proposed considering the specifics of various technological parameters through the use of normal distribution for parameters with natural grouping tendencies and uniform distribution for parameters with uniform change patterns. The noise addition system provides four intensity modes with individual settings for each parameter. The experimental study included 486 *experiments with different training sample configurations. Analysis of generation quality showed that SNR values are in the range of 25–50 dB, which corresponds to the characteristics of real industrial measurements. A critical dependence of prediction quality on training sample size was established: with sample sizes over* 4096 *records, consistently high prediction quality is achieved* (R^2 = 90–95 %). *The developed generator enables the creation of synthetic datasets with controlled noise characteristics and statistical properties that correspond to real technological parameters. Validation mechanisms for generated data are implemented through comprehensive analysis of statistical characteristics, spectral analysis, and evaluation of correlation dependencies. The results confirmed the effectiveness of the developed generator for creating training datasets in the development and testing of control systems for iron ore beneficiation processes, which significantly reduces time and resources during the control system development phase.*

Key words: *synthetic data generation, iron ore beneficiation, controlled noise, technological parameters, machine learning.*

Problem statement. In modern industrial production, the issue of measurement reliability for technological parameters is extremely relevant as it directly affects product quality and economic efficiency of enterprises. This is especially true for iron ore beneficiation processes, where measurement accuracy determines the quality of the final product. The ore beneficiation process is characterized by complexity, multiple factors, and high requirements for technological parameter measurements, making it relevant to create specialized software tools for modeling these processes.

The development of process control systems for beneficiation requires significant amounts of data for training and testing algorithms. Collecting such data in real production conditions is resource-intensive and often limited, necessitating the use of synthetic data. Existing approaches to synthetic data generation do not take into account the specifics of iron ore beneficiation, which creates a need for developing specialized generators with controlled noise characteristics.

Analysis of recent research and publications. The problems of operational quality control of iron ore and optimization of the enrichment process are discussed in the work of Toporov et al. [1], where methods for improving the efficiency of technological operations through enhancement of measurement systems at the ore preparation input are proposed. These studies emphasize the importance of accurate and reliable measurements of technological parameters to ensure final product quality.

Theoretical aspects of synthetic data generation for modeling technological processes are actively researched in various fields [2, 3]. Specifically, Dankar and Ibrahim [2] proposed comprehensive recommendations for effective synthetic data generation that ensures maximum correspondence to real conditions. In [3], Pei and Zaïane developed a synthetic data generator for clustering analysis and outlier detection, allowing modeling of various distribution types.

Methods of synthetic data generation for the energy sector are presented in the work of Alnumay et al. [4], where an approach to controlled noise addition is proposed, simulating fluctuations of technological parameters based on normal distribution. Murray-Smith and Girard [5] thoroughly examined the

application of Gaussian processes with ARMA models to improve prediction accuracy with minimal computational costs, considering the correlation structure of noise.

Mannino and Abouzied [6] proposed methods for generating synthetic data that are visually indistinguishable from real data, which is an important aspect for developing technological process visualization systems. Paper [7] presents an overview of machine learning methods for synthetic data generation with analysis of their advantages and limitations.

Kothare et al. [8] developed the SynGen system for synthetic data generation with parameter adjustment and quality control capabilities.

Analysis of existing research indicates a lack of specialized tools for modeling iron ore enrichment process parameters considering their interconnections and noise characteristics [6–8]. Specifically, methods for controlled noise addition considering normal distribution and different noise levels for various technological parameters of the enrichment process have not been developed.

The aim of the article is to develop a specialized software generator of synthetic data for modeling technological parameters of the iron ore enrichment process. The proposed system aims to create datasets with controlled noise levels that correspond to real production conditions. This will reduce data collection costs and accelerate control system development.

To achieve this goal, the following tasks must be solved:

1. Develop a synthetic data generator architecture with modular structure;
2. Propose methods for generating basic signals for various technological parameters;
3. Develop a controlled noise addition system;
4. Conduct experimental research on generated data quality;
5. Determine the dependency of prediction quality on training sample size.

Presentation of the main research material. The developed data generator is implemented as a NoisedDataGenerator class, which provides a comprehensive approach to creating synthetic technological data with controlled noise levels. The generator's architecture is based on a modular principle and includes four main components: initialization, data handling, signal generation, and noise processing (Fig. 1).

During the initialization phase, detailed configuration of the generator's basic parameters and error level settings for each technological parameter are established separately. This stage is critically important, as the quality of all subsequent operations depends on the correct setup of initial parameters. Data handling includes a comprehensive process of loading the source dataset and careful determination of allowable parameter value ranges, ensuring generated data corresponds to real technological constraints [9]. This stage also includes input data validation and verification of compliance with established criteria.

Signal generation is implemented through creating a sequence of control points and their subsequent interpolation to obtain continuous smooth signals that closely approximate real technological parameters. The final stage is comprehensive noise processing with detailed value verification and correction to ensure data reliability.

Base signal generation is carried out through a carefully selected combination of methods with different types of statistical distributions, considering the specifics of each technological parameter. For parameters that naturally demonstrate a tendency to cluster around the mean value, such as iron content in concentrate and tailings, normal distribution is applied, most accurately reflecting their statistical

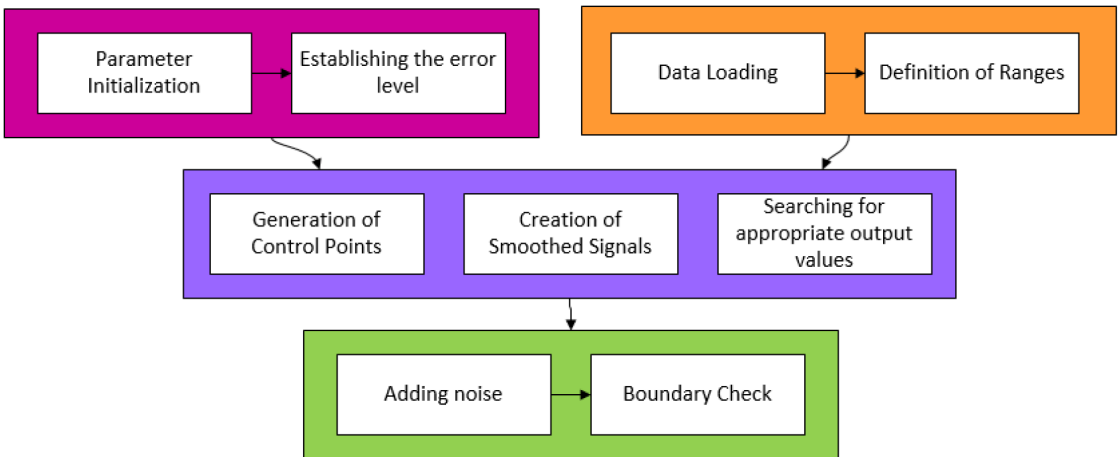


Fig. 1. Structural diagram of a synthetic technological data generator with controlled noise level

nature [10]. Parameters characterized by uniform changes throughout the technological process, such as ore consumption and conveyor speed, are generated using uniform distribution, which best matches their behavior in real conditions. Continuity and smoothness of all signal changes are ensured by applying cubic spline interpolation, allowing for realistic enrichment process dynamics and avoiding sharp transitions between values [11].

The noise addition process is implemented as a multi-stage procedure, considering specific features of each technological parameter and its permissible deviations. The system provides four different noise intensity modes (null, min, aver, max), enabling modeling of various production conditions and equipment operation scenarios. The noise component for each parameter is generated using normal distribution, with its statistical characteristics calculated based on the specified error percentage and specific parameter characteristics. A particularly important aspect is continuous monitoring of allowable value limits and comprehensive validation of results through calculating various statistical characteristics, ensuring generated data corresponds to real technological constraints.

To ensure high quality of generated data, comprehensive analysis of each technological parameter was conducted, with results presented in Fig. 2. Detailed analysis includes multifactor comparison of clean and noisy signals, in-depth study of noise distribution patterns, thorough analysis of signal power spectrum, and comprehensive evaluation of correlations between different signals. The obtained results convincingly demonstrate that generated data fully preserves all main characteristics of the real technological process, while added noise has clearly controlled statistical properties that accurately match real production environment conditions and measurement system characteristics.

For comprehensive evaluation of iron ore enrichment process stability and thorough analysis of experimental data quality, detailed research was conducted using four key metrics, each characterizing an important process aspect. Signal-to-noise ratio (SNR_db) is a fundamental metric used for quantitative assessment of data noise levels, with higher values clearly indicating better signal quality and fewer noise components. Correlation analysis enables deep investigation and evaluation of relationships between different process parameters, critical for understanding overall system dynamics. Relative deviation indicator was chosen as a universal tool enabling correct comparison of various technological parameters' variability regardless of their absolute values and measurement scale. The fourth metric – outliers percentage – is an important indicator clearly showing the frequency of anomalous value occurrence in measurements, allowing comprehensive characterization of overall process stability and measurement system quality.

To evaluate generated data quality, comprehensive analysis was conducted under different noise intensity modes (min, aver, max). Results of detailed analysis of main technological parameters at three data noise levels – minimum (Min exp), average (Average exp), and maximum (Max exp) – are systematized and presented in Table 1. This structured presentation of results allows comparative analysis of different noise levels' impact on data quality and process stability, as well as evaluation of measurement reliability under various experimental conditions.

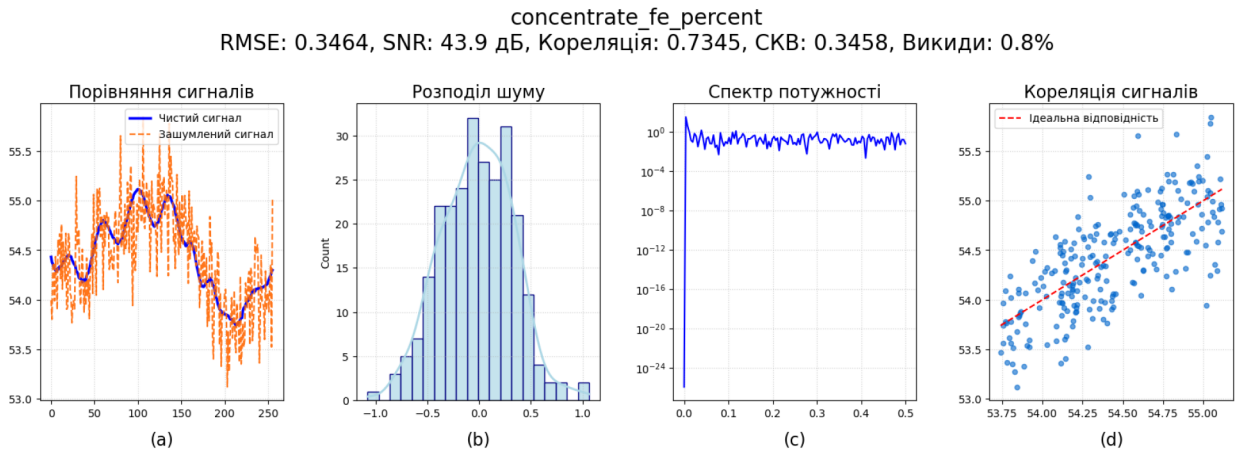


Fig. 2. Complex analysis of generated data quality for iron content parameter in concentrate: (a) comparison of clean and noisy signals; (b) noise distribution histogram; (c) signal power spectrum; (d) correlation relationship between signals

Table 1

Process Stability Metrics at Different Noise Levels

Metric	Min exp	Average exp	Max exp	Difference (Max-Min)
feed_fe_percent				
snr_db	46.0077	42.5046	39.9858	–6.0219
correlation	0.9105	0.8518	0.7650	–0.1456
relative_deviation	0.0009	0.0002	–0.0011	–0.0020
outliers_percent	0.2618	0.2946	0.2584	–0.0034
solid_feed_percent				
snr_db	39.9965	36.4947	34.0018	–5.9948
correlation	0.9894	0.9758	0.9565	–0.0329
relative_deviation	–0.0019	–0.0057	–0.0042	–0.0022
outliers_percent	0.3187	0.3140	0.3022	–0.0164
ore_mass_flow				
snr_db	39.9903	32.0362	27.9772	–12.0131
correlation	0.0031	–0.0003	0.0010	–0.0020
relative_deviation	–0.0066	0.0106	–0.0010	0.0057
outliers_percent	0.2655	0.2579	0.2694	0.0039
concentrate_fe_percent				
snr_db	50.4553	46.0438	43.0792	–7.3761
correlation	0.9252	0.8482	0.7493	–0.1758
relative_deviation	–0.0013	–0.0005	0.0008	0.0021
outliers_percent	0.2801	0.2893	0.2737	–0.0064
concentrate_mass_flow				
snr_db	34.0069	29.1430	26.0346	–7.9723
correlation	0.5692	0.3773	0.2784	–0.2908
relative_deviation	0.0039	–0.0037	–0.0149	–0.0188
outliers_percent	0.2667	0.2453	0.2602	–0.0066
tailings_fe_percent				
snr_db	47.9872	43.7661	40.9070	–7.0803
correlation	0.3099	0.2102	0.1454	–0.1645
relative_deviation	0.0004	–0.0020	–0.0007	–0.0011
outliers_percent	0.2854	0.2632	0.2826	–0.0028
tailings_mass_flow				
snr_db	32.0210	27.9305	25.1859	–6.8351
correlation	0.5815	0.4201	0.3170	–0.2645
relative_deviation	–0.0072	–0.0022	0.0059	0.0131
outliers_percent	0.2798	0.2677	0.2765	–0.0033

Analysis of results presented in Table 1 shows SNR values range from 25–50 dB, corresponding to real industrial measurement characteristics. Iron content parameters (feed_fe_percent, concentrate_fe_percent, tailings_fe_percent) demonstrate best SNR (40–50 dB) with specified errors of 0.3–1.0 %, while mass flow rates are characterized by lower SNR (25–34 dB) with errors of 2.0–5.5 %. Correlation analysis confirms expected dependence of signal quality on specified errors – parameters with small errors have high correlation (>0.75), while mass flow rates show lower correlation. Relative deviations of all parameters remain close to zero (±0.015), indicating absence of systematic error.

During experimental research, 486 experiments with different training sample configurations were conducted. Statistical analysis of results showed critical dependence of prediction quality on training sample size. With minimum sample size (256 records), complete degradation of prediction quality is observed with R^2 close to zero. Increasing sample size to 2048–4096 records shows gradual improvement but with significant prediction quality variability (R^2 fluctuates between 65–85 %). When sample size exceeds 4096 records, consistently high prediction quality is achieved with $R^2 = 90–95$ %, with further data volume increase not leading to significant improvement in results.

Experiment results also confirmed high prediction quality for multilayer perceptron models and support vector regression method. Importantly, result stability is maintained regardless of data noise level, confirming reliability of the developed generator.

Conclusions. This paper presents the results of developing and researching a synthetic technological data generator for the iron ore beneficiation process. The developed generator enables creation of datasets with controlled noise levels, implementing a modular approach that includes parameter configuration, base signal generation, and controlled noise addition.

The proposed methods for generating base signals account for the specifics of various technological parameters through the use of normal distribution for parameters with natural grouping tendencies and uniform distribution for parameters with uniform change patterns. The application of cubic spline interpolation ensures the necessary signal smoothness that corresponds to the real process dynamics.

The developed noise addition system provides four intensity modes with individual settings for each parameter. Experimental study of the generated data quality revealed significant differences in the behavior of various technological parameters as noise levels increase. Mass flow parameters proved most sensitive to noise, showing the largest SNR drop (up to 12 dB) and lowest correlation indicators. Iron content parameters demonstrate greater noise resistance, confirmed by lower SNR reduction (6–7 dB) and higher correlation values. The stability of relative deviation indicators and outlier percentages across all parameters confirms the effectiveness of the developed generator in creating realistic datasets with controlled noise levels.

The practical value of the developed generator is confirmed by its potential use in creating training datasets for developing and testing control systems for iron ore beneficiation processes.

Further research should focus on expanding the generator's functionality to model abnormal situations, implement anomaly generation methods, and adapt to other types of technological processes. Another important direction is developing methods for automatic adjustment of generation parameters based on real data analysis.

Bibliography:

1. Toporov, V., Axelrod, V., Tukeyev, U. Operative control of ore quality at the input of ore preparation operations of enrichment fabric. *Journal of Information and Telecommunication*, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 465–479. DOI: 10.1080/24751839.2019.1630792

2. Dankar, F.K., Ibrahim, M. Fake It Till You Make It: Guidelines for Effective Synthetic Data Generation. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 1–18. DOI: 10.3390/app11052158

3. Pei, Y., Zaïane, O. A synthetic data generator for clustering and outlier analysis. DOI: 10.7939/R3B23S

4. Alnumay, Y., et al. Synthetic Data Generation for Machine Learning Applications in the Energy Industry. *In Proc. SPE ADIPEC 2022*, Abu Dhabi, UAE, Oct. 2022, pp. 1–8. DOI: 10.2118/211821-MS

5. Murray-Smith, R., Girard, A. Gaussian Process Priors with ARMA Noise Models. *In Proc. Irish Signals and Systems Conference*, Glasgow, UK, 2001, pp. 1–6. URL: https://www.dcs.gla.ac.uk/~rod/publications/MurGir01.pdf

6. Mannino, M., Abouzied, A. Is this real? Generating synthetic data that looks real. *In Proc. 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*, Oct. 2019, pp. 549–561. DOI: 10.1145/3332165.3347866

7. Lu, Y., et al. Machine Learning for Synthetic Data Generation: A Review. *arXiv preprint arXiv:2302.04062*, Feb. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2302.04062

8. Kothare, A., Chaube, S., Moharir, Y., Bajodia, G., Dongre, S. SynGen: Synthetic Data Generation. *In Proc. Int. Conf. Computational Intelligence and Computing Applications (ICCICA)*, Nagpur, India, Nov. 2021, pp. 53–57. DOI: 10.1109/ICCICA52458.2021.9697232

9. King, R.P. Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2001. 399 p. DOI: 10.1016/C2009-0-26303-3

10. Maeland, E. On the Comparison of Interpolation Methods. *IEEE Trans. Medical Imaging*, 1988, vol. 7, no. 3, pp. 213–217. DOI: 10.1109/42.7784

Воловецький О.О. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА СИНТЕТИЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

У роботі представлено результати розробки спеціалізованого програмного генератора синтетичних даних для моделювання технологічних параметрів процесу збагачення залізної руди. Розроблений генератор реалізує модульний підхід, що включає конфігурацію параметрів, генерацію базових сигналів та контрольоване додавання шуму. Запропоновано методи генерації базових сигналів

з урахуванням специфіки різних технологічних параметрів через використання нормального розподілу для параметрів з природною тенденцією до групування та рівномірного розподілу для параметрів з рівномірним характером змін. Система додавання шуму забезпечує чотири режими інтенсивності з індивідуальними налаштуваннями для кожного параметра. Експериментальне дослідження включало 486 експериментів з різними конфігураціями навчальних вибірок. Аналіз якості генерації показав, що значення SNR знаходяться в діапазоні 25–50 дБ, що відповідає характеристикам реальних промислових вимірювань. Встановлено критичну залежність якості прогнозування від розміру навчальної вибірки: при розмірі вибірки понад 4096 записів досягається стабільно висока якість прогнозування (R^2 = = 90–95 %). Розроблений генератор забезпечує можливість створення синтетичних наборів даних з контрольованими характеристиками шуму та статистичними властивостями, що відповідають реальним технологічним параметрам. Реалізовано механізми валідації згенерованих даних через комплексний аналіз статистичних характеристик, спектральний аналіз та оцінку кореляційних залежностей. Результати підтвердили ефективність розробленого генератора для створення навчальних наборів даних при розробці та тестуванні систем керування технологічними процесами збагачення залізної руди, що дозволяє значно скоротити час та ресурси на етапі розробки систем керування.

Ключові слова: *генерація синтетичних даних, збагачення залізної руди, контрольований шум, технологічні параметри, машинне навчання.*

УДК 004.056:338
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/08

Гладка О. М.
Національний університет водного
господарства та природокористування

Карпович І. М.
Національний університет водного
господарства та природокористування

Сех О. Б.
Національний університет водного
господарства та природокористування

МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК – ПЛАТФОРМА ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ АНГЛІЙСЬКОЇ МОВИ

Статтю присвячено дослідженню процесу розробки мобільного застосунку для підтримки процесу вивчення, актуалізації чи кращого опанування навичками володіння англійською мовою. Вивчення та використання у професійній діяльності чи міжособистісному спілкуванні англійської мови, яка є однією з найпоширеніших у світі, стає важливим елементом особистісного та професійного розвитку. Сучасні методи неформального та інформального навчання потребують використання інноваційних технологій, що спрощують доступ до знань, підтримують індивідуальні темпи навчання та сприяють підвищенню мотивації.

Проведено дослідження та аналіз можливостей використання електронного словника в процесі вивчення англійської мови за допомогою мобільного застосунку, розглянуто основні функціональні характеристики, а також переваги і недоліки схожих мобільних застосунків і аналогічного програмного забезпечення, виконано UI/UX аналіз розроблюваного додатку, що дозволило визначити оптимальний функціонал і основні характеристики користувацького інтерфейсу.

Розроблено мобільний застосунок – платформу для використання англійської мови, що передбачає проєктування та створення бази даних для зберігання словникових записів, розробку користувацького інтерфейсу, реалізацію функціоналу пошуку та додавання нового контенту. Для проєктування додатку використано UML діаграми, що моделюють відповідні етапи роботи і візуалізують процеси розробки функціональних модулів системи. Засобами розробки обрано платформу Android Studio та мову програмування Kotlin, базу даних реалізовано з використанням Realtime Database Firebase.

Створений функціональний мобільний застосунок дозволяє користувачам швидко знаходити значення слів, додавати нові записи, створювати персоналізовані списки слів (словосполучень, фраз тощо) для вивчення, а також отримувати аналітику щодо прогресу у вивченні лексики.

Ключові слова: *мобільний застосунок, словник, англійська мова, автоматизація, Android Studio, Kotlin, база даних Firebase.*

Постановка проблеми. Сучасні технології значно змінюють підходи до організації процесів навчання та управління інформацією. Мобільні пристрої та застосунки відкрили нові можливості для оптимізації освітніх процесів, як формальних, так і неформальних чи інформальних, зробивши навчання доступнішим, інтерактивнішим і персоналізованішим. Серед багатьох напрямів використання мобільних застосунків особливу увагу привертають інструменти для вивчення мов.

Вивчення та використання англійської мови, яка є однією з найпоширеніших у світі, стає важливим елементом особистісного та професійного розвитку. Сучасні методи навчання потребують використання інноваційних технологій, що спрощують доступ до знань, підтримують індивідуальні темпи навчання та сприяють підвищенню мотивації. Однак традиційні інструменти, такі як друковані словники, вже не задовольняють потреб сучасного користувача, адже вони малоефективні в умовах теперішнього життя.

Основною проблемою є необхідність створення універсального рішення, яке поєднувало б зручність використання, швидкість пошуку інформації та інтерактивність. Таким рішенням може бути мобільний застосунок, що є платформою

для покращеного словника з англійської мови, який дозволить не лише забезпечити користувачам зручний доступ до лексичних одиниць, але й підвищити ефективність вивчення мови завдяки розширеним функціям, забезпечити швидкий доступ до необхідної лексики, полегшити процес запам'ятовування слів і відстеження прогресу у навчанні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення англійської мови є однією з основних потреб сучасного глобалізованого суспільства, де знання іноземних мов стало важливим фактором успіху в професійній діяльності, навчанні та міжособистісному спілкуванні [1]. У світі, де комунікація між людьми різних культур і країн відбувається на щоденній основі, здатність вільно спілкуватися англійською мовою відкриває нові можливості для розвитку особистості та кар'єри. Це особливо важливо у контексті зростання значення англійської мови як глобальної мови бізнесу, науки та технологій. У зв'язку з цим, питання ефективного та зручного вивчення англійської мови набуває все більшої актуальності, особливо в умовах швидких змін на ринку освітніх послуг та технологій.

Мобільні застосунки для вивчення іноземних мов, зокрема англійської, є одними з найпопулярніших і доступних інструментів, які дозволяють користувачам в будь-який час та в будь-якому місці покращувати свої мовні навички [2–3]. Завдяки мобільним технологіям, навчання стало значно доступнішим та ефективнішим, оскільки дозволяє інтегрувати навчальний процес у повсякденне життя, не вимагаючи постійної прив'язки до часу і місця [4]. Мобільні додатки дозволяють зручно організувати процес вивчення, забезпечуючи доступ до різноманітних ресурсів та функцій, таких як інтерактивні вправи, словники, відео та аудіоматеріали.

В основі будь-якого мовного мобільного застосунку є мобільний словник – інтерактивний інструмент, який відрізняється доступністю, швидкостю і зручностю, та дозволяє користувачам легко отримати необхідну інформацію про слова, їхні значення, вимову і приклади вживання, що значно полегшує процес вивчення чи використання іноземної мови.

Сфера мобільних додатків для вивчення англійської мови є важливим напрямком у розвитку інформаційних технологій, оскільки вони сприяють покращенню процесу навчання, забезпечують доступність матеріалів та інтерактивний підхід до вивчення. Такі додатки дозволяють користувачам зосереджуватися на ключових аспектах мови, включаючи лексику, граматику, вимову та контекстне використання.

Нами детально проаналізавано такі програми як Oxford Dictionary [5], Merriam-Webster Dictionary [6], Cambridge Advanced Learner's Dictionary (CALD) [7] та Duolingo [8], які, на нашу думку, користуються особливою популярністю. Перевагами зазначених словників є: авторитетність джерела (Oxford Dictionary визнано стандартом англійської мови); розширена база даних (Oxford Dictionary, Merriam-Webster Dictionary містять велику кількість слів, фраз, ідіом та термінів з детальними поясненнями, синонімами, антонімами та додатковою інформацією про походження слова); приклади використання речень в реальних контекстах, що допомагає краще розуміти стилістичні та семантичні особливості (Oxford Dictionary, CALD); адаптованість лексикографічного контенту до потреб тих, хто вивчає англійську (CALD добре підходить для підготовки до іспитів IELTS, BEC, Cambridge English First, Advanced і Proficiency); голосовий пошук та аудіовимова, фільтри (Oxford Dictionary, Merriam-Webster Dictionary); інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та доступність на різних платформах, включаючи Android та iOS (Merriam-Webster Dictionary, CALD, Duolingo); граматична підтримка (CALD); інтерактивність (Merriam-Webster Dictionary, Duolingo пропонують вікторини, тести, «Слово дня» та інші елементи геймифікації, що підвищують цікавість і мотивованість процесу навчання); офлайн-доступ (Oxford Dictionary можна використовувати без підключення до інтернету, що є великою перевагою для подорожей або роботи в зонах з обмеженим доступом до мережі).

Однак, кожен із цих додатків має не лише переваги, а й недоліки. Наприклад, Oxford Dictionary та Merriam-Webster забезпечують вичерпні словникові дані, але їхній інтерфейс може бути занадто складним для початківців. Більшість систем пропонують дороговартісну преміум-підписку; а якщо і пропонують базову версію програми, то розширені функції доступні лише за додаткову плату. Застосунок Duolingo є привабливим завдяки своїй гейміфікації, проте його можливості для глибокого вивчення мови обмежені. Cambridge Advanced Learner's Dictionary є корисним для детального вивчення значень слів, але не надає інтерактивної практики мовних навичок тощо.

Постановка завдання. Мобільний застосунок для вивчення англійської мови повинен враховувати всі проблеми і забезпечити користувачам

доступ до ефективного та зручного інструменту з вивчення мови. Зокрема, застосунок повинен бути простим у використанні і мати інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Користувачі повинні мати змогу швидко знаходити потрібні слова та отримувати всю необхідну інформацію про них. Застосунок має також надавати розширену інформацію про кожне слово, включаючи приклади використання, вимову та інформацію про його вживання в різних контекстах. Це дозволить користувачам краще розуміти, коли і як використовувати це слово в реальному житті.

Важливим аспектом є персоналізація навчання. Мобільний застосунок повинен адаптуватися до рівня знань користувача та його інтересів. Наприклад, якщо користувач вивчає англійську для професійних цілей, він повинен мати можливість отримати доступ до спеціалізованої лексики та виразів, пов'язаних з його сферою діяльності. Таким чином, кожен користувач зможе отримувати той навчальний матеріал, який найбільше відповідає його потребам.

Не менш важливою є можливість відстежувати прогрес користувача. Це дозволить не лише оцінювати результати навчання, але й мотивувати користувачів, показуючи їм, як вони покращують свої знання з часом. Вбудовані інструменти для моніторингу прогресу допоможуть користувачам краще організувати свій процес навчання, відстежувати слабкі місця та робити акцент на їх усуненні.

Метою даної роботи є дослідження можливостей використання електронного словника в процесі користування іноземною мовою за допомогою мобільного застосунку та розробка такого застосунку для підтримки процесу вивчення, актуалізації чи кращого опанування навичками володіння англійською мовою. Для досягнення цієї мети виконані такі завдання як аналіз та дослідження предметної області; вивчення систем-аналогів; проєктування і розробка бази даних для зберігання словникових записів; розробка користувацького інтерфейсу з урахуванням UI/UX підходу до дизайну додатку; реалізація функціоналу системи з використанням платформи Android Studio та мови програмування Kotlin.

Виклад основного матеріалу. Ринок мобільних додатків для вивчення мов сьогодні є дуже динамічним і різноманітним. Багато компаній та стартапів розробляють нові продукти, які обіцяють зробити процес вивчення мови швидким і ефективним. Однак, незважаючи на широкий асортимент, більшість існуючих рішень не здатні повністю задовольнити потреби користувачів.

Першою значною проблемою, на нашу думку, є недостатня інтерактивність традиційних мобільних словників. Багато електронних словників обмежуються лише базовими функціями перекладу і пояснення значень слів, не надаючи достатньої кількості прикладів їх використання в реальних життєвих ситуаціях. Наприклад, традиційні словники надають лише суху інформацію про те, що означає те чи інше слово, не враховуючи контексту, в якому це слово може бути використане. Це створює труднощі для користувачів, які хочуть краще розуміти, як і коли використовувати певне слово.

Ще однією проблемою є недоступність додаткових функцій для моніторингу прогресу в навчанні. Багато мобільних додатків не забезпечують можливість відстеження успіхів користувачів, що призводить до зниження мотивації. Без системи оцінювання та відстеження навчальних результатів користувачі не можуть адекватно оцінити свій рівень володіння мовою, а також не мають змоги коригувати стратегію навчання. Користувач може вивчати слова, не знаючи, на якому етапі знаходиться, або витрачати надмірно багато часу на вивчення вже знайомих слів.

Крім того, багато мобільних додатків мають проблеми з інтерфейсом, що також ускладнює їх використання. Важливо, щоб користувач міг легко орієнтуватися в додатку та швидко знаходити потрібну інформацію. Якщо інтерфейс є надто складним або непривабливим, це може відлякати користувача і призвести до зниження ефективності навчання.

Проведені дослідження дозволили визначити такі головні функціональні елементи розробленого застосунку (рис. 1):

- головний екран – відображає основні категорії користувача: пошук слова, історія запитів, персоналізовані рекомендації та статистики прогресу;
- пошук слів – користувач може швидко знайти слово, вводячи його вручну або за допомогою голосового введення; після вибору слова надається повна інформація: визначення, приклади використання, вимова, синоніми та антоніми;
- функціонал додавання нового контенту – користувач може додавати нові слова (словосполучення, фрази) до свого словника, а також власні зауваження або примітки;
- історія пошуку – зберігаються всі нещодавні пошукові запити користувача для швидкого доступу для повторного використання;
- прогрес – користувач може переглядати статистику своєї активності, кількість вивчених слів,

Рис. 1. Загальна схема мобільного застосунку

час, витрачений на навчання, а також досягнуті результати.

Проєктування застосунку здійснено шляхом побудови відповідних UML діаграм, що моделюють і візуалізують процеси розробки програмного забезпечення різних етапів [9–10], зокрема, діаграми класів (рис. 2), діаграм компонентів (рис. 3), прецедентів, активностей та послідовностей.

Для реалізації мобільного застосунку вибрано мову програмування Kotlin, яка є сучасною статично типізованою мовою програмування з відкритим кодом, що розроблена для повної суміс-

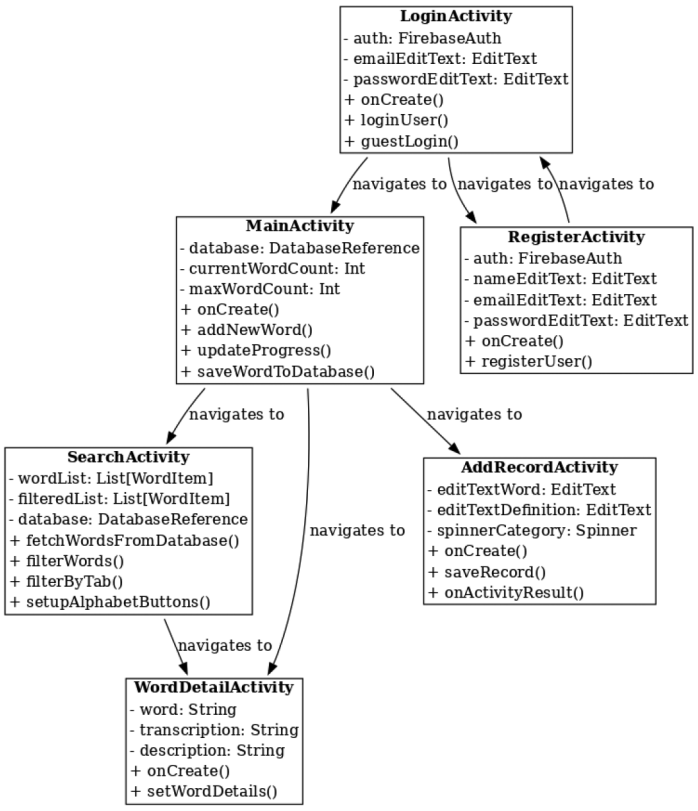


Рис. 2. Діаграма класів застосунку

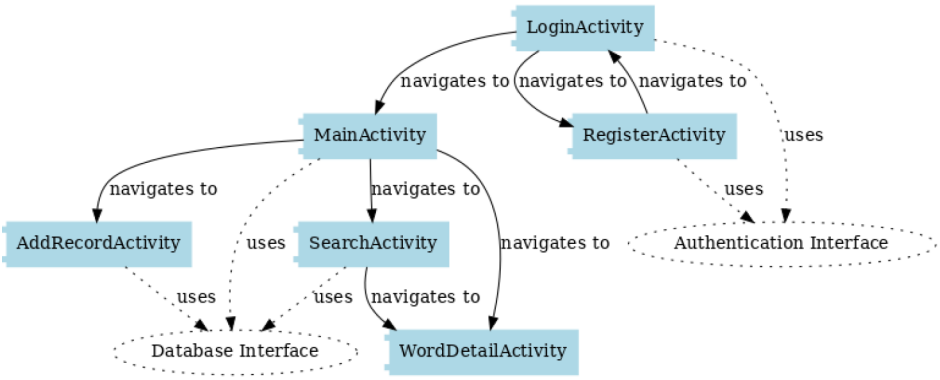


Рис. 3. Діаграма компонентів застосунку

ності з JVM [11–12]. Водночас можливості Kotlin виходять за межі JVM, забезпечуючи підтримку інших середовищ, таких як веб-браузери. Ця мова поєднує функціональні та об'єктно-орієнтовані концепції, що робить її універсальним інструментом для розробки. Kotlin, на відміну від Java, пропонує більш компактний, виразний та безпечний синтаксис [13]. Завдяки сумісності з Java, Kotlin дозволяє використовувати існуючий код, бібліотеки та фреймворки за допомогою технології Kotlin/JS [14], що значно спрощує міграцію проєктів або інтеграцію з уже існуючим середовищем. У 2017 році Google офіційно визнала Kotlin мовою для розробки застосунків на платформі Android. Це рішення стимулювало значне поширення Kotlin серед Android-розробників і сприяло його інтеграції в нові мобільні проєкти [15].

Мобільний застосунок створено за допомогою Kotlin (Android) з інтеграцією Firebase Realtime Database та Firebase Authentication. Для реалізації входу в мобільний застосунок використано клас *com.google.firebase.auth.FirebaseAuth* з бібліотеки Firebase, який забезпечує основний інтерфейс для роботи з Firebase Authentication. Він дозволяє додатку виконувати аутентифікацію користувачів за допомогою різних методів: електронна пошта та пароль, Google, Facebook, анонімний (гостьовий) вхід тощо. Основні методи цього класу включають createUserWithEmail AndPassword() для створення нового користувача, signInWithEmailAndPassword() для входу, signInAnonymously() для анонімного входу, signOut() для виходу та getCurrentUser() для отримання інформації про поточного користувача. Він також обробляє події автентифікації, такі як успішний вхід або помилки, через механізм зворотних відгуків.

Для зберігання та синхронізації даних у реальному часі вибрано NoSQL систему керування базами даних Firebase Realtime Database, яка, на нашу думку, найкраще підходить для розроблюваного мобільного застосунку. Нереляційні бази даних NoSQL спеціально створюються для конкретних моделей даних і зберігають інформацію за гнучкими схемами, які легко масштабуються для різних програм [16]. Однією з основних переваг, що стала вирішальною у виборі, є масштабованість NoSQL баз даних, які легко адаптуються до зростання навантаження за рахунок горизонтального масштабування, що робить їх придатними для систем із великим обсягом даних. Крім того, NoSQL підтримує високу швидкість обробки операцій читання та запису, що важливо для застосунків реального часу. Бази даних NoSQL часто обирають для проєктів, які вимагають гнучкості структури даних, наприклад, для розробки застосунків, що активно змінюються або працюють із нестандартними наборами даних [16].

Firebase Realtime Database надає простий інтерфейс для синхронізації даних між клієнтами та сервером, що дозволяє зберігати і оновлювати словникові записи в режимі реального часу. Вона працює за принципом документо-орієнтованої бази даних, де дані зберігаються у вигляді ієрархії JSON [17].

Висновки. Сучасні мобільні застосунки відіграють важливу роль у навчанні, автоматизації процесів і спрощенні доступу до інформації. У сфері вивчення та використання іноземних мов вони допомагають користувачам удосконалювати свої знання та швидко і якісно виконувати переклад завдяки інтерактивним інструментам і зручному інтерфейсу.

Розроблений мобільний застосунок на базі Android для вивчення англійської мови є покращеним словником – платформою для підтримки процесу використання та удосконалення навичок володіння англійською мовою. Він надає можливості реєстрації користувачів, пошуку слів, додавання нових записів (слів, прислів'їв, фраз) та коментарів користувача, сортування за кате-

горіями та перегляду прогресу у вивченні. Використання Firebase Realtime Database забезпечує надійне збереження даних, їх швидку обробку та синхронізацію між пристроями, а Firebase Authentication дозволяє здійснювати безпечну автентифікацію користувачів.

Застосунок має простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що дозволяє користувачам швидко адаптуватися. Користувачі можуть взаємодіяти із системою, додаючи слова, переглядаючи їхні транскрипції та описи, а також слідкувати за своїми досягненнями у навчанні.

Для розробки застосунку використано засоби програмування Kotlin та Android Studio, які забезпечують широкий функціонал і зручність створення сучасних мобільних інтерфейсів. Система створена з акцентом на ефективність і доступність з метою допомоги користувачам у використанні англійської мови, та має потенціал до доповнення і розширення функцій.

Список літератури:

1. Cristal David. English as a Global Language. Second edit1ion. Cambridge University Press. 2003. URL: https://surl.li/vcqivs (дата звернення 03.03.2025)

2. Gorbatiuk, L. V., Kravchenko, N. V., Alekseeva, H. M., & Rozumna, T. S. Mobile Applications as a Means of Foreign Language Lexical Competence Formation of Non-Philological Specialties' Students. 2019. *Information Technologies and Learning Tools*, *74*(6), 150–164. DOI; https://doi.org/10.33407/itlt.v74i6.2529

3. Application fundamentals. URL: https://developer.android.com/guide/components/fundamentals (дата звернення 03.03.2025).

4. Robert Godwin-Jones. Emerging technologies: Mobile apps for language learning? *Language, Learning and Technology, 15*(2), 2–11. 2011.URL: https://surl.li/iiezvi (дата звернення 03.03.2025).

5. Oxford English Dictionary. URL: https://www.oed.com/ (дата звернення 03.03.2025).

6. G. & C. Merriam Company. Merriam-Webster Dictionary. URL: http://hdl.handle.net/10079/fa/beinecke.merriam (дата звернення 03.03.2025).

7. Cambridge Advanced Learner's Dictionary. URL: https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/ (дата звернення 03.03.2025).

8. Duolingo. URL: https://uk.duolingo.com/ (дата звернення 03.03.2025).

9. Martin Fowler. UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language. Addison-Wesley Professional, 2004. 175 p.

10. James Rumbaugh, Ivar Jacobson. Unified Modeling Language User Guide. URL: https://patologia.com.mx/informatica/uug.pdf (дата звернення 03.03.2025).

11. IBM. What is Java? URL: https://www.ibm.com/topics/java (дата звернення 03.03.2025).

12. Geeksforgeeks. Introduction to Java. URL: https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-java/ (дата звернення 03.03.2025).

13. Ben Lutkevich. Definition Kotlin. TechTarget. URL: https://www.techtarget.com/whatis/definition/Kotlin (дата звернення 03.03.2025).

14. Developer Android. Android's Kotlin-first approach. URL: https://developer.android.com/kotlin/first (дата звернення 03.03.2025).

15. Kajal Suthar. Kotlin vs Java for Android Development: Which One Should You Choose? Medium, 2024. URL: https://surl.li/lnojaq (дата звернення 03.03.2025).

16. MongoDB. What is NoSQL? URL: https://www.mongodb.com/resources/basics/databases/nosql-explained (дата звернення 03.03.2025).

17. Ramadan Sayed. Firebase, Firebase Realtime Database, and Firestore. Medium, 2024. URL: https://surl.li/pnbwvz (дата звернення 03.03.2025).

Hladka O. M., Karpovich I. M., Sekh O. B. MOBILE APPLICATION – PLATFORM FOR USING ENGLISH

The paper is devoted to the study of the process of developing a mobile application to support the process of learning, updating or better mastering English language skills. Learning and using English, which is one of the most common languages in the world, in professional activities or interpersonal communication, is becoming an important element of personal and professional development. Modern methods of non-formal and informal learning require the use of innovative technologies that simplify access to knowledge, support individual learning pace, and help increase motivation.

The research and analysis of the possibilities of using an electronic dictionary in the process of learning English using a mobile application was conducted, the main functional characteristics, as well as the advantages and disadvantages of similar mobile applications and similar software were considered, and a UI/UX analysis

of the developed application was performed, which allowed us to determine the optimal functionality and main characteristics of the user interface.

We have developed a mobile application – a platform for using the English language, which involves designing and creating a database for storing dictionary entries, developing a user interface, implementing search functionality, and adding new content. To design the application, UML diagrams were used that model the relevant stages of work and visualize the processes of developing functional modules of the system. The Android Studio platform and the Kotlin programming language were chosen as development tools, and the database was implemented using Realtime Database Firebase.

The created functional mobile application allows users to quickly find word meanings, add new entries, create personalized lists of words (word combinations, phrases, etc.) for study, and also receive analytics on progress in vocabulary learning.

Key words: *mobile application, dictionary, English, automation, Android Studio, Kotlin, Firebase database.*

УДК 004.4
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/09

Горбань Г. В.
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Фісун М. Т.
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Раленко В. С.
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Стоєв Є. Д.
Чорноморський національний університет імені Петра Могили

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПЕРЕВІРКИ ПРОГРАМНОГО КОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті розглянуто проблему підвищення ефективності та якості процесу рев'ю коду шляхом розробки платформи для автоматизованої перевірки програмного коду з використанням технологій штучного інтелекту. Проаналізовано сучасні інструменти автоматизованого аналізу коду та виявлено їх обмеження: стандартні статичні аналізатори коду (наприклад, SonarQube, Codacy, ESLint) здатні знайти синтаксичні помилки чи порушення стилю, але не враховують контекст програмної логіки та можуть генерувати хибно-позитивні зауваження. Запропоновано архітектуру інформаційної системи, що інтегрується з платформою GitHub та використовує модель GPT-4 для «розумної» перевірки коду. Платформу побудовано за мікросервісним принципом: виділено модуль інтеграції з GitHub (обробник подій pull request), модуль аналізу коду на базі ШІ та модуль керування даними pull request. Наведено UML-діаграми архітектури системи та послідовності взаємодії її компонентів. Розроблено веб-застосунок (Angular) для відображення результатів аналізу та реалізовано автоматичне коментування виявлених проблем безпосередньо у pull request на GitHub. Прототип платформи протестовано на прикладі реального репозиторію: система успішно виявила логічні помилки та надала рекомендації щодо покращення коду (зокрема, в тестовому pull request було знайдено 6 помилок і запропоновано 11 покращень), що підтверджує працездатність та ефективність підходу. Зроблено висновки про переваги використання штучного інтелекту в перевірці коду (зменшення навантаження на команду, більш глибокий аналіз програмної логіки) та окреслено напрямки подальшого розвитку системи, такі як підтримка більшої кількості мов програмування, оптимізація витрат на виклики до API мовних моделей та розширення функціональності платформи.

Ключові слова: *автоматизована перевірка коду, рев'ю коду, штучний інтелект, pull request, GitHub,. NET, Angular.*

Постановка проблеми. Рев'ю коду є невід'ємною частиною сучасного процесу розробки програмного забезпечення. Воно дозволяє виявити дефекти та покращити якість програмного коду на ранніх етапах, попереджаючи потенційні помилки у продуктивному середовищі. Традиційно перевірка коду здійснюється розробниками вручну: один або кілька рецензентів аналізують зміни в коді (наприклад, у форматі pull request) та залишають коментарі з зауваженнями чи пропозиціями. Такий підхід, хоча і ефективний у забезпеченні високої якості, має суттєві недоліки – значні витрати часу та людських ресурсів, суб'єктивність оцінок, можливість пропуску дефектів через людський фактор. Автоматизація цього процесу є актуальним завданням, що може підвищити продуктивність команди розробки та стандартизувати перевірку коду. Останнім часом, зі стрімким розвитком технологій штучного інтелекту (ШІ), з'явилися нові можливості для автоматизації аналізу програмного коду. Сучасні мовні моделі, зокрема архітектури на основі трансформерів (GPT-3, GPT-4), демонструють здатність розуміти контекст та семантику коду і генерувати осмислені тексти-відповіді [1, 2]. Це відкриває перспективи створення інтелектуальних

систем автоматизованого рев'ю коду, які можуть функціонувати подібно до досвідченого рецензента: виявляти не лише синтаксичні помилки, але й логічні дефекти, порушення архітектурних принципів, недотримання кращих практик програмування тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання автоматизації перевірки програмного коду привертало увагу дослідників та індустрії протягом останніх десятиліть. Традиційно для виявлення дефектів у коді застосовуються статичні аналізатори коду – інструменти, що перевіряють вихідний код на наявність помилок без виконання програми. Прикладами є SonarQube, Codacy, ESLint та інші. SonarQube – потужний інструмент статичного аналізу, який підтримує понад 25 мов програмування і здійснює комплексну перевірку коду на відповідність стандартам, вразливості та продуктивність [3]. Він інтегрується з системами контролю версій та CI/CD, що дозволяє автоматично перевіряти код після кожного коміту або створення pull request. Codacy має подібний функціонал і забезпечує швидке хмарне розгортання, пропонуючи зручну інтеграцію з Git-платформами (GitHub, GitLab тощо) для коментування результатів аналізу прямо у pull request. Такі системи значно полегшують підтримку стандартів кодування в команді. Проте, вони зазвичай базуються на наперед визначених правилах і шаблонах, через що обмежені у розумінні контексту. Наприклад, інструмент Danger дозволяє автоматизувати деякі аспекти рев'ю коду, виконуючи задані розробниками правила на етапі CI. Однак, його потрібно вручну налаштовувати під кожен проєкт, додаючи власні правила перевірки [4]. Це ускладнює використання Danger нефахівцями та може призвести до пропуску нетривіальних логічних помилок, які не були явно прописані в правилах. Окрім статичних аналізаторів, існують лінтери та інші спеціалізовані інструменти для окремих мов. Зокрема, ESLint – популярний статичний аналізатор для JavaScript/TypeScript, що допомагає виявляти синтаксичні помилки та порушення стилю [5]. Проте він обмежений лише цими мовами і набором правил, визначених спільнотою, і не виконує глибшого семантичного аналізу.

Значний прогрес у галузі штучного інтелекту для аналізу коду спостерігається з появою інструментів, що використовують машинне навчання та великі мовні моделі. Компанія DeepCode (нині технологія інтегрована в продукт Snyk Code) застосувала ML-моделі, навчені на мільйонах репозиторіїв, для виявлення уразливостей і багів, які не завжди фіксуються традиційними лінтерами. Такі AI-інструменти можуть пропонувати автоматичні виправлення коду та інтегруються в середовища розробки. Ще одним прикладом є сервіс GitHub Copilot, який на базі моделі GPT-3 (Codex) допомагає розробникам писати код, а також може підказувати виправлення. Хоч Copilot більше орієнтований на генерацію коду, деякі дослідження зазначають його потенціал і для автоматизації рев'ю – зокрема, Copilot здатен попереджати про прості помилки чи субоптимальні конструкції під час написання коду [6].

В наукових публікаціях останніх років описано перші спроби інтеграції великих мовних моделей (LLM) безпосередньо у процес перевірки коду. Наприклад, у роботі [7] представлено результати впровадження інструмента на базі GPT-3.5 (Qodo PR Agent) для автоматичного рев'ю pull request у промисловому середовищі. Згідно з цим дослідженням, автоматизовані коментарі, згенеровані мовною моделлю, були корисними і розробники погодилися приблизно з 73,8 % таких зауважень, що свідчить про їх практичну цінність [7]. Водночас виявлено і недолік – середній час закриття pull request дещо збільшився через необхідність опрацювання згенерованих AI-коментарів [7]. Це підкреслює, що хоча ШІ-асистенти здатні підвищити якість рев'ю коду, повністю замінити експерта-людину вони поки що не можуть, а їх використання вимагає додаткового контролю.

Постановка завдання. Проблема, яка вирішується в рамках даного дослідження, полягає у створенні платформи, що здатна автоматично аналізувати зміни у вихідному коді програмного проєкту та надавати змістовні рекомендації щодо покращення коду в режимі, інтегрованому в робочий процес розробників. Аналіз існуючих рішень показав, що, незважаючи на наявність потужних статичних аналізаторів, розробники все ще витрачають значний час на ручне рев'ю коду, особливо перевіряючи логіку та архітектурні аспекти змін. Людський фактор може призводити до непослідовності в оцінках та пропуску помилок. З іншого боку, застосування надто загальних автоматичних інструментів (лінтерів) часто генерує занадто багато непріоритетних зауважень, що знижує довіру команди до таких інструментів.

Тому згідно до зазначеного вище сформульовано такі основні завдання:

– розробити архітектуру програмної системи, яка інтегрується з популярною платформою спільної розробки (GitHub) та реагує на події відкриття/оновлення pull request;

– забезпечити аналіз коду із врахуванням контексту – для цього обрати і інтегрувати сучасну модель штучного інтелекту, здатну розуміти програмний код (зокрема, мовну модель GPT-4 від OpenAI);

– реалізувати модуль видачі результатів у зручній формі – як безпосередні коментарі в системі контролю версій та/або структуровані звіти у власному веб-застосунку;

– перевірити працездатність розробленої платформи на реальних сценаріях, порівняти результати з ручним рев'ю та оцінити, чи дійсно платформа допомагає виявити важливі проблеми.

Таким чином, поставлена задача охоплює повний цикл створення інформаційної системи: від проектування архітектури до імплементації та тестування прототипу в наближених до реальних умовах.

Виклад основного матеріалу. Запропонована платформа автоматизованої перевірки коду спроєктована з використанням мікросервісної архітектури. Це означає, що різні функціональні підсистеми реалізовані у вигляді незалежних сервісів, які взаємодіють через чітко визначені інтерфейси (HTTP API). Такий підхід полегшує підтримку і масштабування системи, дозволяючи модифікувати або замінювати окремі компоненти без впливу на інші. На рис. 1 зображено загальну архітектуру платформи у вигляді структурної схеми з основними модулями та їх зв'язками.

Як видно з архітектурної діаграми, система складається з таких ключових компонентів:

– *Інтеграційний модуль з GitHub (Event Handler API)*. Це мікросервіс, що відповідає за взаємодію з інфраструктурою контролю версій, зокрема з подіями платформи GitHub. Він отримує повідомлення (Webhooks) про створення або оновлення pull request у відстежуваному репозиторії. При надходженні такого повідомлення Event Handler ініціює процес автоматичної перевірки коду – тобто надсилає відповідний запит до сервісу аналізу коду. Крім того, інтеграційний модуль

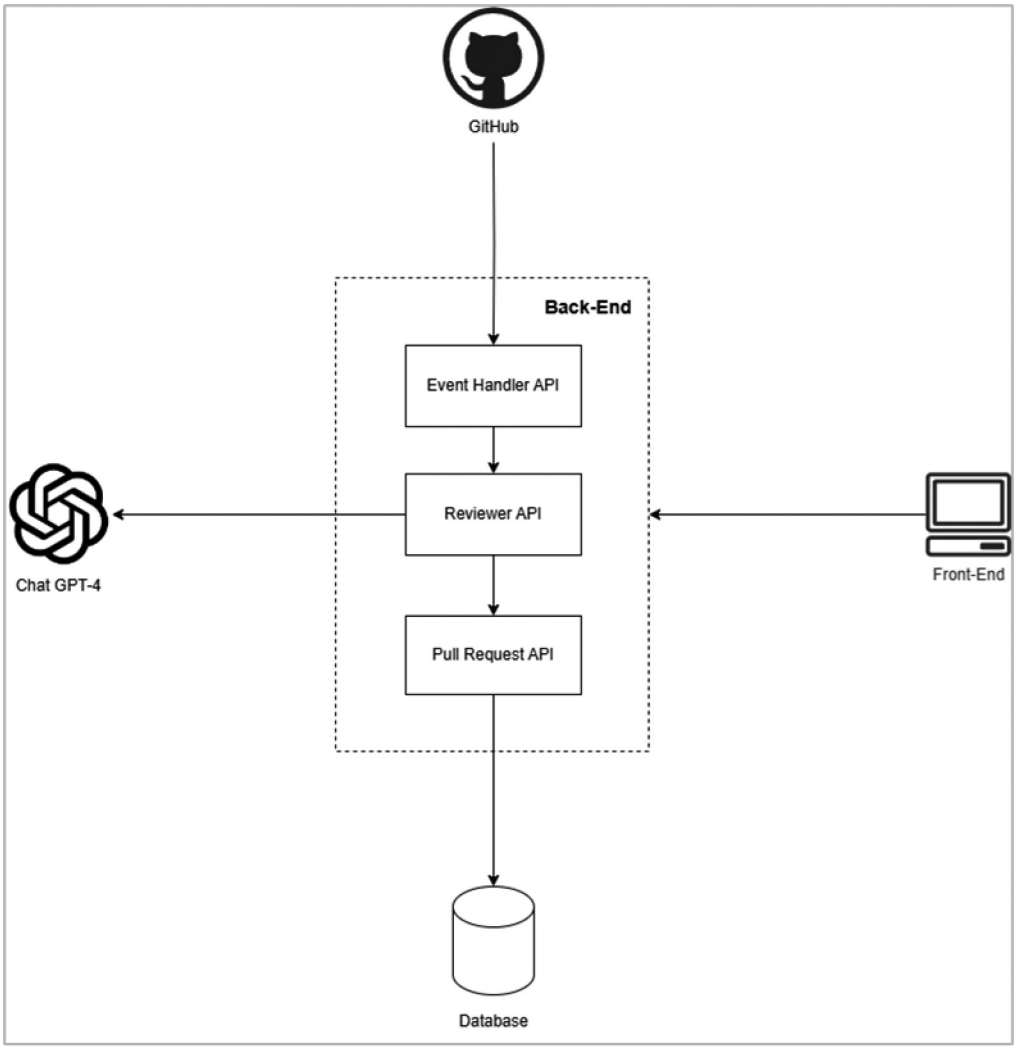


Рис. 1. Загальна архітектура платформи автоматизованого рев'ю коду (структурні компоненти та інтеграції)

може через GitHub API розміщувати коментарі з результатами аналізу у тому ж pull request (від імені бота або користувача, що авторизував систему).

– *Сервіс аналізу коду (Reviewer API).* Даний мікросервіс реалізує безпосередньо логіку перевірки коду із використанням штучного інтелекту. Отримавши від Event Handler запит на аналіз конкретного pull request, цей сервіс звертається до зовнішнього API мовної моделі (OpenAI API) з підготовленим prompt-запитом, що містить потрібну інформацію: фрагменти коду або diffs змін, контекст (назва проєкту, опис змін) та допоміжні вказівки (які саме проблеми слід шукати). Для взаємодії з моделлю GPT-4 у компоненті Reviewer API використано офіційний SDK OpenAI для. NET, що спрощує надсилання запитів і отримання відповідей від моделі. Отримавши відповідь від моделі (список знайдених потенційних проблем та рекомендацій), Reviewer API структурує ці дані (наприклад, у форматі списку коментарів із прив'язкою до конкретних рядків коду) і передає результати назад до Event Handler або безпосередньо у базу даних.

– *Сервіс керування pull request (Pull Request API)*. Це окремий мікросервіс, що виконує допоміжні функції: зберігає інформацію про репозиторії та pull request, керує авторизацією користувачів платформи, надає інтерфейс для отримання списку pull request і деталей аналізу через вебдодаток. По суті, Pull Request API виступає як бекенд для фронтенду системи, забезпечуючи доступ до даних, збережених у базі (результати аналізу, історія перевірок тощо). Через цей же API користувач може налаштувати інтеграцію системи зі своїм GitHub-репозиторієм (наприклад, додати Webhook або прив'язати OAuth-токен для доступу).

– *База даних*. Для зберігання інформації про користувачів, підключені репозиторії, pull request та результати їх перевірки використовується реляційна база даних. У прототипі реалізовано схему БД, що містить таблиці для сутностей "Repository", "PullRequest", "Comment" тощо. База необхідна, щоб мати історію всіх аналізів – це дозволяє у будь-який момент переглянути звіт по старих pull request, а також уникнути повторного аналізу одних і тих самих змін. Збереження даних відбувається переважно на етапі аналізу: Reviewer API після обробки відповіді від ШІ-сервісу створює запис про результати (список знайдених проблем) у БД, а також Event Handler фіксує факт перевірки конкретного pull request.

– *Фронтенд (клієнтський застосунок)*. Для зручності користувачів створено веб-інтерфейс, що дозволяє переглядати підключені репозиторії та їх pull request, запускати аналіз вручну (за потреби) та ознайомлюватися з детальними результатами перевірки. Фронтенд розроблено на основі сучасного фреймворку Angular; він взаємодіє з бекендом через HTTPS-запити до Pull Request API. Головний екран фронтенду відображає перелік останніх pull request зі статусом їх перевірки, а екран деталей аналізу – список виявлених помилок і рекомендацій з поясненнями. Для покращення користувацького досвіду реалізовано механізм push-нотифікацій: після завершення аналізу коду (що може тривати декілька десятків секунд при зверненні до моделі GPT-4) фронтенд отримує сигнал (через WebSocket) і автоматично оновлює інтерфейс з результатами, щоб розробник бачив зауваження майже в реальному часі.

Важливо зазначити, що вибір мікросервісної архітектури зумовлений вимогами до масштабованості та гнучкості системи. Зокрема, модуль Reviewer API (аналіз коду) є потенційно ресурсоємним, оскільки виконує запити до мовної моделі, що можуть мати затримки та обмеження по частоті. Тому цей модуль можна розгорнути окремо і масштабувати горизонтально (запустити кілька екземплярів), щоб обробляти кілька запитів паралельно. Інші компоненти (Event Handler, Pull Request API) здатні обробляти значно більшу кількість запитів з мінімальними ресурсами, тому їх можна масштабувати незалежно. Для взаємодії між сервісами використовуються легковагові REST-запити HTTP, що спрощує відлагодження та дозволяє при необхідності замінити один з сервісів (наприклад, перейти на іншу AI-модель у Reviewer API) без зміни коду інших.

Робота системи побудована навколо подій, що надходять від платформи контролю версій (у нашому випадку – GitHub). Загальний сценарій можна описати наступним чином: коли розробник створює новий pull request або додає зміни в існуючий, GitHub відправляє повідомлення (HTTP POST-запит) на спеціальний URL нашого сервісу Event Handler (цей URL реєструється як Webhook при підключенні репозиторію до платформи). Отримавши таке повідомлення, Event Handler виконує кілька кроків: перевіряє, чи належить pull request підключеному проєкту і чи потрібно його аналізувати, після чого формує запит на аналіз коду і надсилає його до Reviewer API. Reviewer API, у свою чергу, звертається до моделі GPT-4 з відповідним prompt (текстом-запитом) і отри-

мує від неї список знайдених проблем/порад. Цей список повертається в Event Handler, який зберігає результати у базі та додатково може зробити запит до GitHub API для автоматичного розміщення коментарів у pull request з описом кожної проблеми. Після завершення цих кроків розробники отримують сповіщення або можуть оновити сторінку pull request, щоб побачити коментарі від бота-рецензента.

На рис. 2 наведено UML-діаграму послідовності, що ілюструє взаємодію між користувачем, системою контролю версій та компонентами платформи у процесі автоматизованої перевірки коду.

Описана послідовність забезпечує повністю автоматизований цикл рев'ю коду одразу після створення pull request, без участі людини-рецензента на початковому етапі. Це дозволяє відфільтрувати тривіальні та очевидні проблеми (які система здатна знайти самостійно) ще до того, як до перегляду коду підключаться члени команди. Таким чином, економиться час досвідчених розробників: вони можуть зосередитись лише на нетривіальних аспектах змін, тоді як стилістичні питання, дрібні баги та інші речі, що легко перевіряються, вже будуть висвітлені в автоматичних коментарях.

З метою перевірки функціональності сторінки аналізу коду було створено pull request у власному репозиторії GameRecomendations, який на сторінці налаштування репозиторію підключено до платформи автоматизованої перевірки коду (рис. 3). Цей pull request під номером 4 має назву «Changes in FileDataLoader.cs» та включає зміну одного файлу, у якому код навмисно погіршено для зниження його якості та внесення помилок.

Після відкриття pull request він відобразився на сторінці списку (рис. 3). Згідно з результатами автоматизованої перевірки, у цьому pull request було виявлено 6 помилок і запропоновано 11 рекомендацій щодо покращення коду.

Частину рекомендацій також продемонстровано на сторінці аналізу коду (рис. 4).

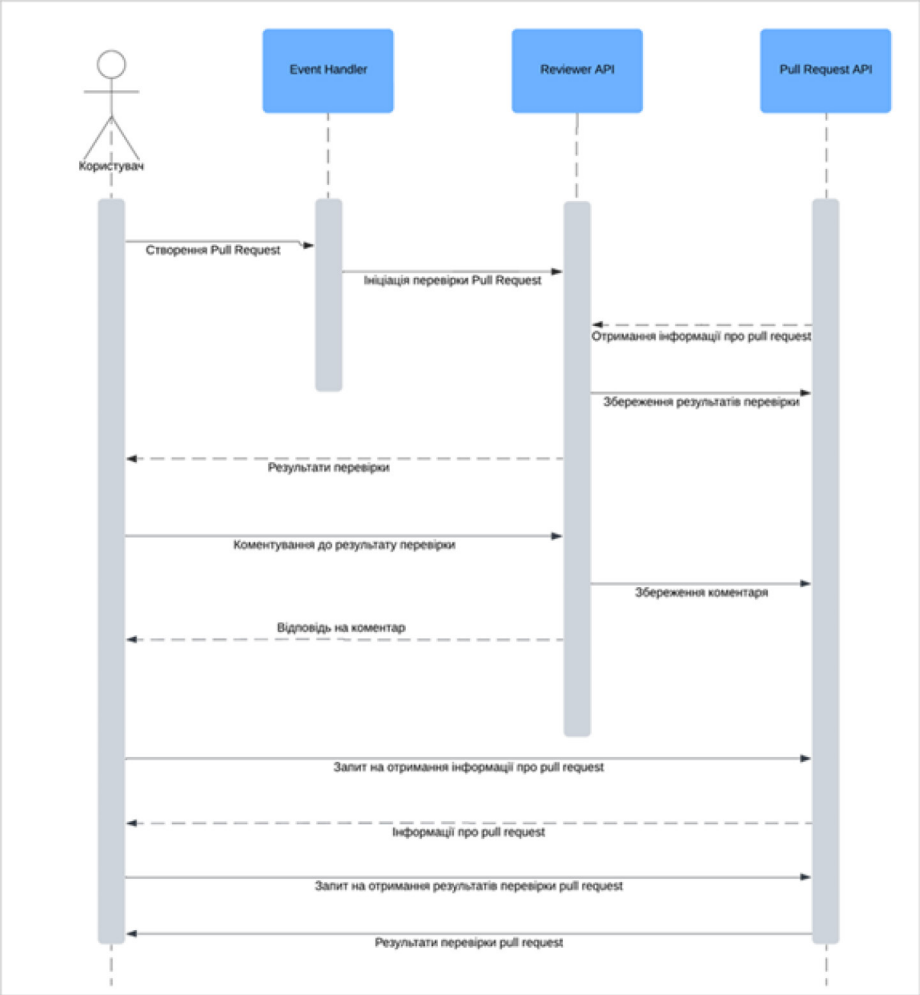


Рис. 2. Діаграма послідовності процесу автоматизованого рев'ю коду (взаємодія користувача, GitHub та мікросервісів платформи)

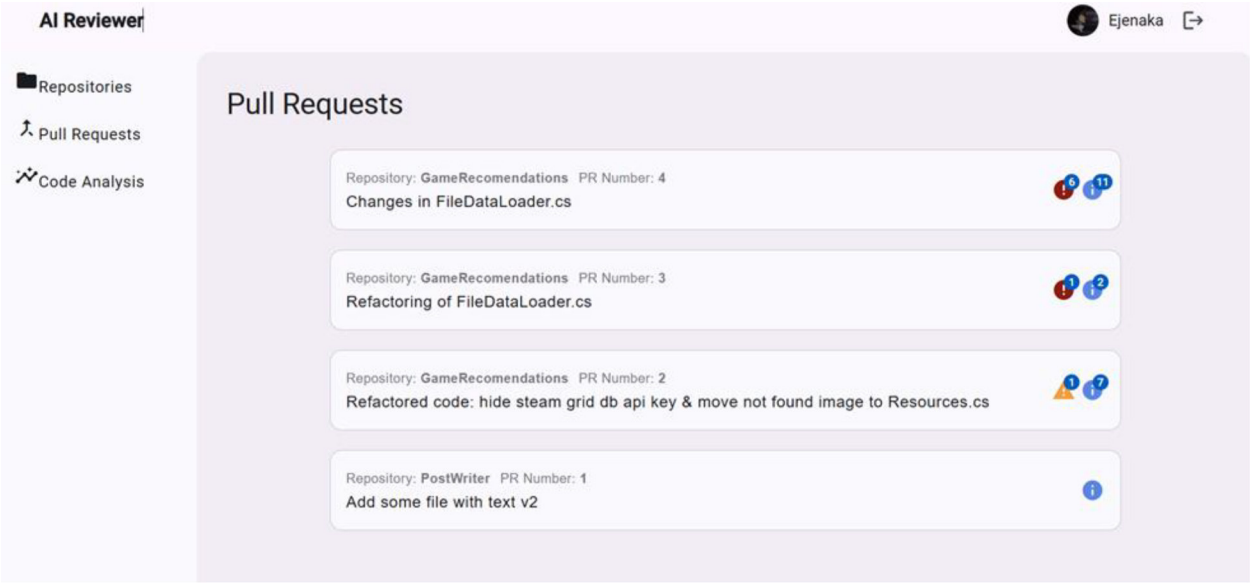


Рис. 3. Сторінка списку Pull Requestів у веб-застосунку платформи

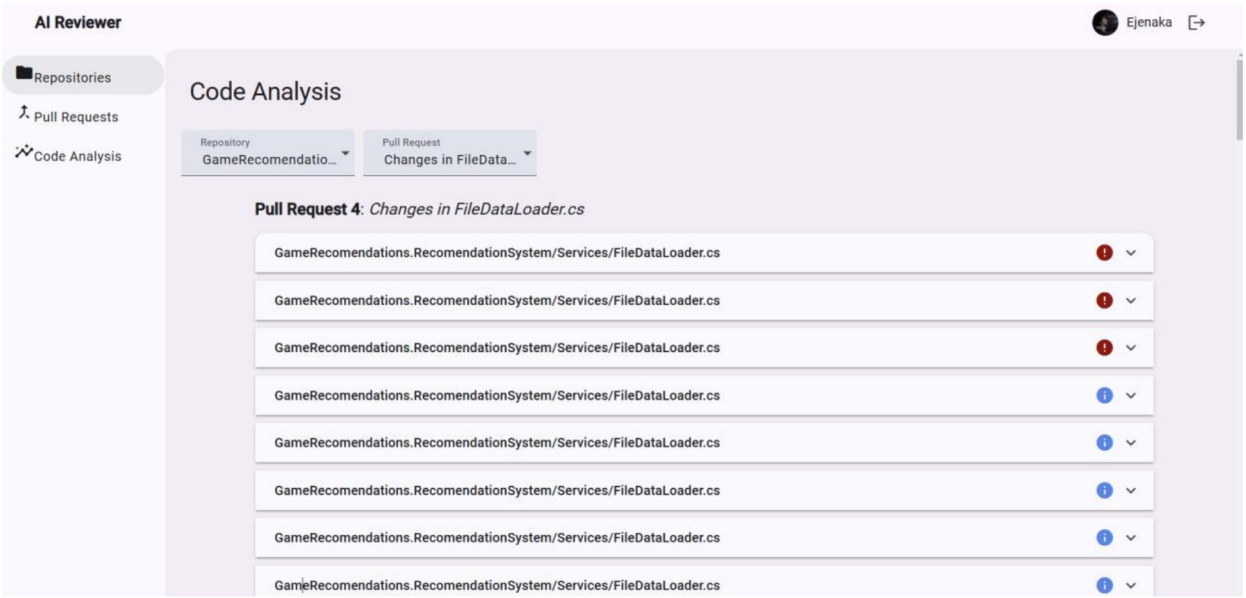


Рис. 4. Вигляд сторінки аналізу коду для створеного pull request

Декілька рекомендацій було переглянуто, і серед них виокремлено такі:

– помилка некоректного використання типів у C# (рис. 5);

– рекомендація щодо належного використання пробілу в коді (рис. 6);

– помилка при додаванні числового та рядкового значень, яка показана на рис. 7;

– рекомендація щодо видалення невикористовуваного методу (рис. 8).

З наведених рисунків видно, що система перевірки коду на платформі дійсно працює: вона аналізує програмний код на наявність помилок і пропонує покращення, які можна в ньому реалізувати.

Для перевірки роботи системи коментарів було залишено коментар з поясненням до рекомендації щодо належного використання пробілу в коді (рис. 6). Даний коментар разом із відповіддю на нього показано на рис. 9.

Система розгорнуто відповіла на коментар користувача та пояснила, які стандарти стосуються використання пробілів між операторами у мові програмування C#.

Для перевірки механізму зміни статусу рекомендації на «вирішено» для декількох рекомендацій було натиснуто кнопку «Resolve». Результат цих дій наведено на рис. 10.

Як видно, п’ять рекомендацій закрито для перегляду, оскільки їхній статус було змінено

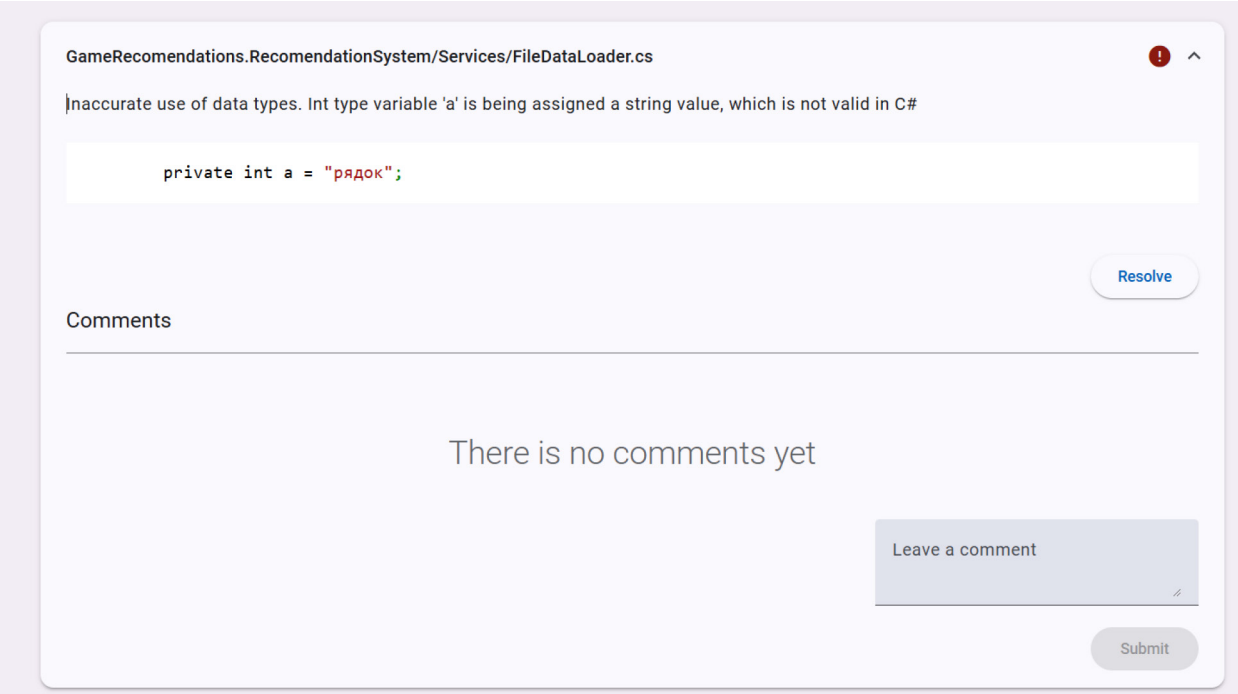


Рис. 5. Помилка некоректного використання типів

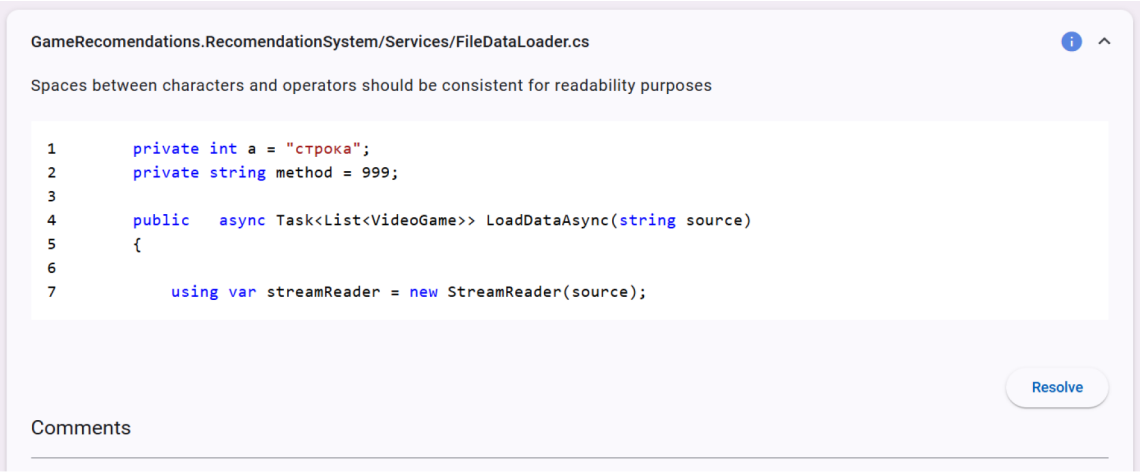


Рис. 6. Рекомендація щодо належного використання пробілу в коді

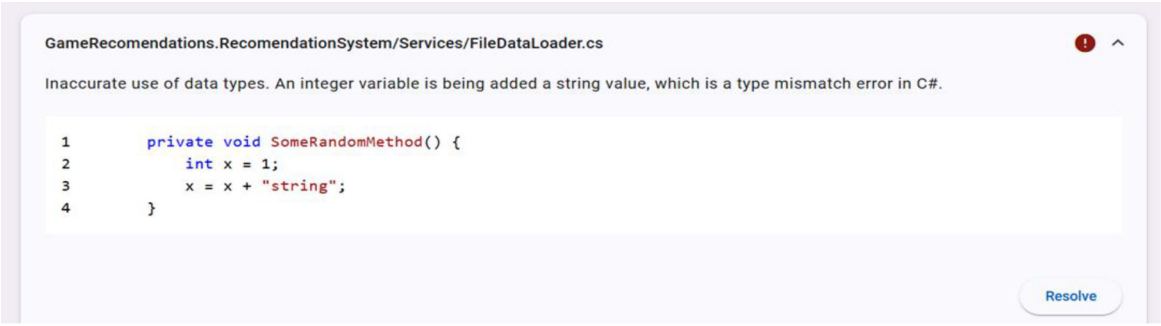


Рис. 7. Помилка при додаванні числового та рядкового значень

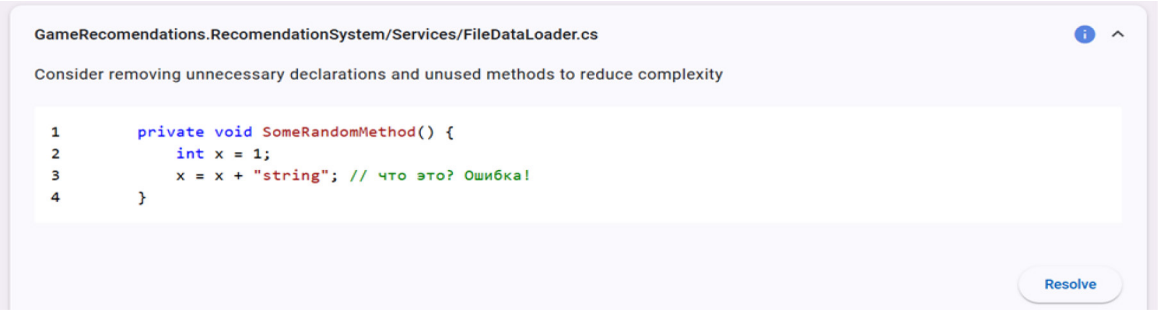


Рис. 8. Рекомендація щодо видалення невикористовуваного методу

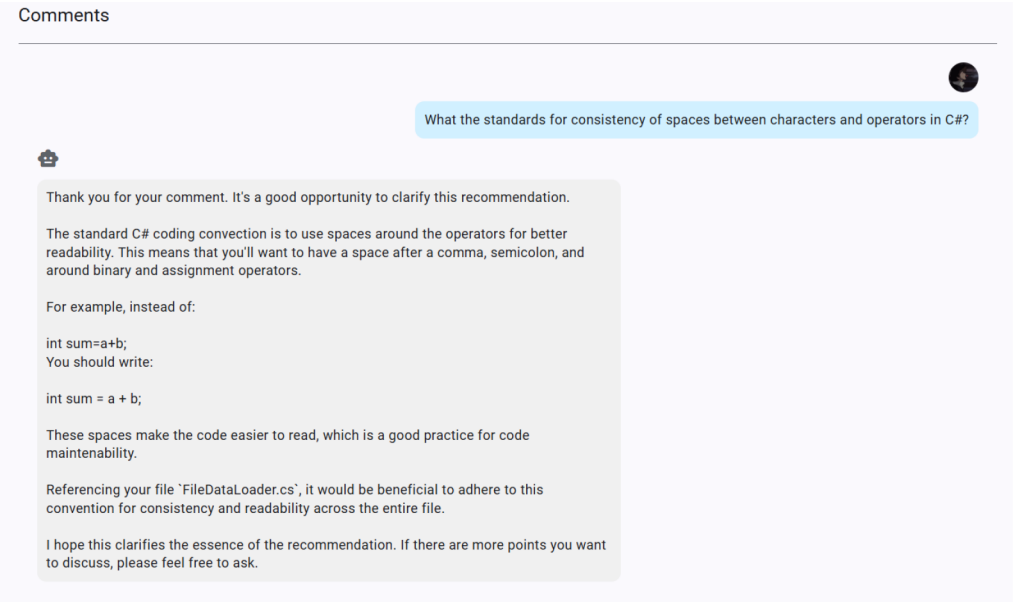


Рис. 9. Коментар і відповідь на нього

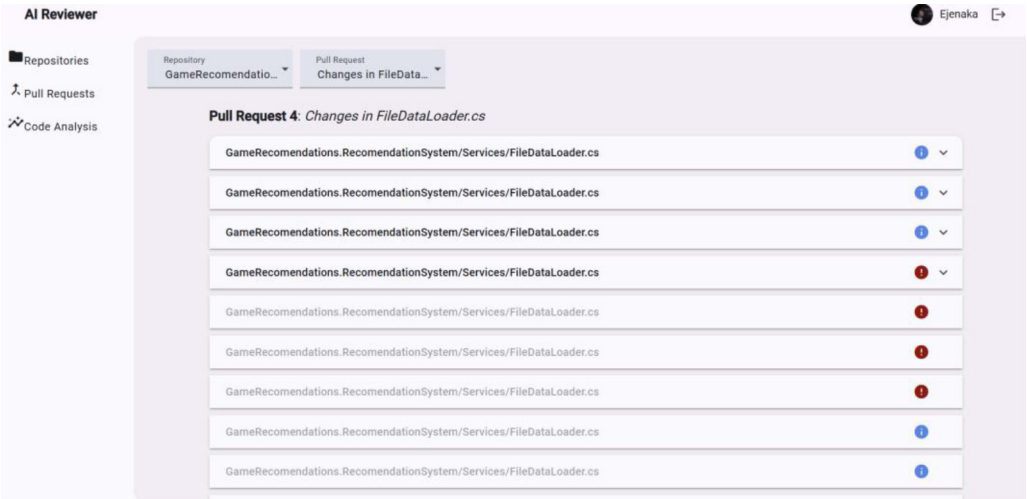


Рис. 10. Рекомендації зі статусом «вирішено»

на «вирішено». Отже, практичне випробування прототипу підтвердило, що запропонована платформа справді здатна полегшити процес рев'ю коду. Вона автоматично виявляє вагому частину тих проблем, на які зазвичай звертають увагу колеги-рецензенти, і робить це відразу після створення pull request. Безумовно, не всі зауваження, згенеровані моделлю, були ідеальними – окремі з них потребували додаткової перевірки. Однак під час тестування жодне важливе виправлення не

пройшло повз увагу системи. Ба більше, модель GPT-4 надала кілька порад з рефакторингу, які на перший погляд були неочевидними (наприклад, порадила винести дубльований код в окремий метод), що підкреслює цінність інтелектуального аналізу.

Висновки. Інтеграція сучасної мовної моделі (на прикладі GPT-4) у процес аналізу коду суттєво розширює можливості автоматизованого рев'ю. Система здатна виявляти не лише тривіальні помилки, але й складніші проблеми, пов'язані з логікою та дизайном коду, надаючи при цьому корисні пояснення. Це зменшує навантаження на команду та прискорює процес перевірки, особливо на ранніх етапах. Обраний підхід із використанням мікросервісної архітектури та інтеграції через GitHub Webhooks показав свою дієвість. Платформа органічно вбудовується в стандартний workflow розробників, автоматично реагуючи на події pull request і надаючи результати у звичному вигляді (коментарі у системі контролю версій). В ході тестування підтверджено, що якість зауважень AI-системи є досить високою: більшість згенерованих рекомендацій були корисними і виправданими. Водночас виявлено окремі випадки хибних або зайвих спрацьовувань, що вимагає обережності при інтерпретації результатів. На практиці це означає, що розробники повинні переглядати автоматичні коментарі критично, особливо якщо вони стосуються неоднозначних аспектів.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні як самої AI-моделі, так і платформи загалом. По-перше, варто розглянути можливість тонкого налаштування мовної моделі на домен програмування. Використання технік навчання з підкріпленням на основі зворотного зв'язку від розробників могло б зменшити кількість хибно-позитивних результатів. По-друге, актуальним є завдання підтримки більш широкого спектру мов програмування та фреймворків. GPT-4 вже зараз справляється з багатьма мовами, але спеціалізовані знання (наприклад, специфічні для низькорівневих мов C/C++ питання управління пам'яттю) можуть вимагати додаткових правил чи підказок. Розширення платформи на інші системи контролю версій (GitLab, Bitbucket) також є практично важливим, аби зробити її універсальнішою. По-третє, потрібно оптимізувати витрати на виконання аналізу: дослідження напряму використання локальних відкритих моделей (наприклад, StarCoder, CodeGen) або гібридного підходу (коли швидкий попередній аналіз виконується меншою моделлю, а тільки складні випадки надсилаються до GPT-4) допоможе зробити платформу економічнішою та автономнішою. І нарешті, цікавим напрямом є доповнення функціоналу системи засобами динамічного аналізу – інтеграція з інструментами тестування, запуск тестів або аналіз виконання програми для виявлення тих проблем, які статичному аналізу не підвладні.

Таким чином, впроваджений підхід продемонстрував життєздатність і доцільність використання ШІ для автоматизації рев'ю коду. Надалі слід зосередитися на підвищенні точності і доречності рекомендацій штучного інтелекту та розширенні можливостей платформи, що сприятиме ще більшому поширенню таких інструментів у індустрії розробки програмного забезпечення. Це, у свою чергу, допоможе командам розробників підтримувати високий рівень якості коду і ефективніше керувати складністю сучасних програмних проєктів.

Список літератури:

1. Bansal G., Chamola V., Hussain A. Transforming Conversations with AI – A Comprehensive Study of ChatGPT. Cognitive Computation, 2024, Vol. 16, No 8, pp. 2487–2510. DOI: 10.1007/s12559-023-10236-2

2. Diksha K. та ін. Natural language processing: state of the art, current trends and challenges. Multimedia Tools and Applications, 2023, Vol. 82, pp. 3713–3744. DOI: 10.1007/s11042-022-13428-4

3. SonarQube. SonarSource: вебсайт. URL: https://www.sonarsource.com/products/sonarqube (дата звернення: 18.09.2024).

4. What is Danger? GitHub: вебсайт. URL: https://github.com/danger/danger (дата звернення: 18.09.2024).

5. ESLint. ESLint: вебсайт. URL: https://eslint.org (дата звернення: 20.09.2024).

6. Finn T., Downie A. AI Code Review. IBM Blog, 15 Oct 2024. URL: https://www.ibm.com/think/insights/ai-code-review (дата звернення: 01.03.2025).

7. Umut C., Haratian V. Automated Code Review In Practice [Електронний ресурс] / arXiv preprint. 2024. № arXiv:2412.18531. 13 p. URL: https://arxiv.org/abs/2412.18531 (дата звернення: 07.03.2025)

Horban H. V., Fisun M. T., Ralenko V. S., Stoiev Ye. D. PLATFORM FOR AUTOMATED CODE VERIFICATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

The paper addresses the problem of improving the efficiency and quality of the code review process by developing a platform for automated code verification using artificial intelligence technologies. Modern automated code analysis tools and their limitations are analyzed: standard static code analyzers (such as SonarQube, Codacy, ESLint) can detect syntax errors or style violations but do not consider the context of program logic and may generate false positives. The architecture of an information system integrated with the GitHub platform and using the ChatGPT-4 model for "intelligent" code review is proposed. The platform is built on a microservice principle: a GitHub integration module (pull request event handler), an AI-based code analysis module, and a pull request data management module are delineated. UML diagrams of the system's architecture and component interaction sequence are provided. A web application (Angular) has been developed to display analysis results, and automatic commenting of identified issues directly in the GitHub pull request is implemented. The platform prototype was tested on a real repository example: the system successfully identified logical errors and provided code improvement recommendations (in a test pull request, 6 errors were found and 11 improvements suggested), confirming the viability and effectiveness of the approach. Conclusions are drawn about the advantages of using artificial intelligence in code verification (reducing the burden on the team, deeper analysis of program logic), and directions for further system development are outlined, such as supporting more programming languages, optimizing the cost of API calls to language models, and expanding the platform's functionality.

Key words: *automated code review, code inspection, artificial intelligence, pull request, GitHub, .NET, Angular.*

УДК 62-97; 519.876.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/10

Григорчук Г. В.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Григорчук Л. І.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Храбатин Р. І.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ УТФЕЛЮ

У статті розглянуто процес сушіння утфелю як один із ключових етапів технологічного циклу цукрового виробництва, який суттєво впливає на якість кінцевої продукції та енергоефективність усього процесу. Виконано математичне моделювання процесу тепломасообміну в барабанній сушильній установці, що дозволяє врахувати зміну температури, вологості сировини, швидкості її переміщення та інтенсивності обдування повітрям. Запропоновано систему диференціальних рівнянь, що описують динаміку зміни основних параметрів процесу сушіння, а також рівняння теплового балансу, яке дає змогу визначити залежність температури сушильного повітря від поточної вологості утфелю. Проведено графічне моделювання, яке демонструє зміну цих параметрів у часі та дає можливість здійснювати оптимізацію режимів сушіння відповідно до вимог енергоощадності й стабільності роботи обладнання. Запропонована модель дозволяє адаптувати систему автоматизованого керування сушильним процесом, що може бути реалізована на основі сучасних мікропроцесорних засобів з підтримкою зворотного зв'язку. Використання запропонованого підходу дає змогу значно покращити контроль температури та вологості, зменшити втрати цукру та забезпечити стабільну роботу цукрового заводу в умовах змінного навантаження та різної якості сировини.

Ключові слова: *осушування утфелю, сировина, барабанна сушильна установка, регулювання вологості, тепле повітря.*

Постановка проблеми. Сушіння утфелю залежить від здатності повітря поглинути і відвести вологу а також часу взаємодії сировини із теплим сухим повітрям. При обертанні барабану сушильної установки сировина переміщається по ній зі швидкістю, яка залежить від своєї текучості і під дією сил тяжіння. Текучість залежить від багатьох факторів, тому її змінювати складно. Змінювати швидкість просування сировини вздовж барабану можна змінюючи взаємодію сировини із силою тяжіння, шляхом зміни кута нахилу осі сушильного барабану установки. Постає питання, як ефективно інтегрувати процес сушки сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науковій літературі представлено низку досліджень, присвячених термічним процесам, зокрема сушінню, у цукровій промисловості. У роботі Свинчак У.В. (2020) досліджено кінетику уварювання утфелю та модернізацію вакуум-випарного обладнання, що є важливою підготовчою стадією до сушіння. Значну увагу автоматизації та моделюванню теплотехнічних процесів у цукровій галузі приділено в дисертації Григорчук Г.В. (2022) [1], яка розробила адаптивні моделі керування об'єктами барабанного типу. Подібні підходи можуть бути використані для вдосконалення системи сушіння утфелю.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена відсутністю цілісної моделі сушіння утфелю як специфічної цукрової маси з особливими фізико-хімічними властивостями.

Постановка завдання. Метою дослідження є впровадження систем автоматизації технологічних процесів цукрових заводів на основі витратомірів і рівнемірів різних типів, що дозволить істотно скоротити енергоспоживання, зменшити втрати цукру і поліпшити якість продукту, що випускається.

Виклад основного матеріалу. Автоматизація виробничого та технологічного процесів повинні розглядатись як з точки зору вдосконалення устаткування, технологічного оснащення і якості процесу,

так і з точки зору забезпечення техніко-економічної ефективності. Розглянемо цукрову промисловість з точки зору удосконалення роботи технологічного процесу забезпечення сушки утфелю.

Автоматизація цукрової промисловості забезпечує якісну, ефективну роботу всіх технологічних ділянок цукрового заводу тільки за допомогою комплексного підходу до рішення даної задачі.

Первинні перетворювачі і прилади з високими експлуатаційними характеристиками, використовувані в автоматичній системі управління технологічних процесів (АСУ ТП), дають можливість мати достовірні значення контрольованих параметрів технологічного процесу, роблять системи автоматизації функціонально завершеними і високонадійними.

Технологічний комплекс підприємства цукрової промисловості складається з ділянок приймання, зберігання, підготовки сировини до переробки, відділень отримання соку, очищення дифузійного соку, ділянок отримання готового продукту, допоміжного виробництва, зберігання, переробки цукру-сирцю. І на кожній з цих ділянок контроль витрат або рівня є одним з найважливіших завдань [1].

Так, наприклад, в дифузійній установці необхідно контролювати: рівень суміші «стружка + гаряча вода» в чотирьох зонах похилого дифузійного апарату; рівень буряків в завантажувальному бункері; рівень в ємності дифузійного соку; витрата гарячої води в дифузійному апараті.

На станції дефекосатурації необхідний контроль: витрати соку на випарку; витрати і щільності вапняного молока; витрати дифузійного соку і вапняного молока в бригель Мюллера; рівень дифузійного соку в холодному і гарячому дефекаторах. Контроль цих параметрів так само важливий на випарній станції, вакуум-апараті, і інших ділянках [5].

Впровадження систем автоматизації технологічних процесів цукрових заводів на основі витратомірів і рівнемірів різних типів дозволить істотно скоротити енергоспоживання, зменшити втрати цукру і поліпшити якість продукту, що випускається.

Розглянемо запропоновану нами структурну схему системи осушування утфелю. Цукор містить зволожені кристали. Видалення вологи проходить шляхом випаровування. Волога в газоподібному виді відводиться в повітря. Відведення вологого повітря здійснюється примусовим обдуванням. Для інтенсифікації процесу випаровування повітряний потік має вищу температуру за сировину. При контакті повітря з сировиною частина енергії передається сировині. З нагрітої сировини волога випаровується інтенсивніше. В нагріте повітря піднімається більша частка вологи ніж в холодне. Однак нагріта сировина гірше зберігається. Кількість випаруваної вологи залежить від інтенсивності виділення вологи на поверхні кристалів сировини, адсорбуючої властивості оточуючого повітря і часу взаємодії вологи на поверхні із осушуючим повітряним потоком. Виділення вологи залежить від температури (яка впливає на в'язкість вологи), глибини і розміру пор (розміру каналів по яких волога піднімається на поверхню)кристалів та площі волого відведення (розміру кристалів) [1].

Адсорбуюча властивість повітря залежить від його вологості і температури.

При сушінні кристалів інтенсифікують виділення вологи нагрівом, перемішуванням, подрібненням. Адсорбуючу властивість інтенсифікують нагрівом, обдуванням.

Є декілька параметрів, які впливають на кінцеву кількість питомої вологи в сировині. Такими параметрами, при незмінній питомій вологості сировини, є час сушіння, температура нагрівника, об'єм повітря обдування, його вологість, конструкція системи обдування.

Оскільки нагрівання сировини здійснюється потоком сухим, теплим повітрям, то температура повітря впливає одразу на два параметри: інтенсивність виділення вологи з міжкристалічного простору і адсорбуючої властивості повітря. При незмінній конструкції сушильної системи із фіксованою масою осушуваної сировини змінними параметрами залишаються час сушіння, температура повітря, вологість повітря до взаємодії з сировиною, об'єм повітря.

Сушіння великих об'ємів утфелю здійснюється за допомогою барабанної сушильної установки. Її конструкція передбачає нагрівання сировини поданим ззовні теплим повітрям а також перемішування сировини в процесі сушіння для збільшення площі взаємодії кристалів із теплим сухим повітрям.

Тепле сухе повітря здійснює нагрівання сировини, що інтенсифікує процес поглинання вологи. Крім того потік повітря після обтікання сировини і поглинання вологи виносить її на зовні. Кількість повітря, яке поступає в сушильний барабан прямо впливає на інтенсивність висушування.

Час сушіння залежить від здатності повітря поглинути і відвести вологу а також часу взаємодії сировини із теплим сухим повітрям. При обертанні барабану сушильної установки сиро-

вина переміщається по ній зі швидкістю, яка залежить від своєї текучості і під дією сил тяжіння. Текучість залежить від багатьох факторів, тому її змінювати складно. Змінювати швидкість просування сировини вздовж барабану можна змінюючи взаємодію сировини із силою тяжіння, шляхом зміни кута нахилу осі сушильного барабану установки.

Отже при достатній адсорбуючій здатності теплого сухого повітря і досягненні заданої вологості вихідної сировини може бути змінений час перебування цієї сировини в сушильному барабані. Зменшення часу перебування сировини в барабані зменшить витрату енергії на проведення сушіння.

Нагріта і осушена сировина має охолодитися перед зберіганням. Охолодження відбувається потоком холодного сухого повітря до заданої температури. Таким чином для роботи системи використовується три контури керування (5).

1. Підтримання заданої вологості вихідної сировини шляхом керування питомим часом перебування сировини в барабані.

2. Підтримання заданої вологості вихідної сировини шляхом керування інтенсивністю потоку нагрітого повітря.

3. Підтримання заданої температури висушеного середовища на виході барабану шляхом керування інтенсивністю охолоджуючого повітря.

Розглянемо оптимізація процесу сушіння сировини в барабанній сушильній установці. При обертанні барабана сушильної установки сировина переміщується вздовж нього під дією власної текучості та сили тяжіння. Текучість сировини визначається багатьма факторами і змінюється складно. Однак швидкість її просування уздовж барабана можна регулювати шляхом зміни кута нахилу осі сушильного барабана, що змінює силу взаємодії між сировиною та гравітацією. Після нагрівання та осушення сировина повинна охолодитися перед зберіганням. Це охолодження відбувається за допомогою потоку холодного сухого повітря, який доводить матеріал до заданої температури. Таким чином, робота системи контролюється трьома основними контурами керування:

– регулювання вологості сировини шляхом зміни питомого часу перебування матеріалу в барабані;

– контроль вологості на виході шляхом регулювання інтенсивності потоку нагрітого повітря;

– підтримання необхідної температури висушеного матеріалу через зміну інтенсивності потоку охолоджуючого повітря.

При фіксованій конструкції сушильної системи та незмінній масі сировини, головними регульованими параметрами залишаються:

– час сушіння,
– температура повітря,
– вологість повітря до взаємодії з матеріалом,
– об’єм повітряного потоку.

Час сушіння залежить від здатності повітря поглинати та відводити вологу, а також від тривалості контакту сировини з нагрітим сухим повітрям.

Вологість сировини на виході з барабана визначається тривалістю взаємодії з осушуючим повітрям та інтенсивністю обдуванням.

Структурна схема системи регулювання заданої вологості сировини наведена на рис. 1.

Процес роботи барабанної сушильної установки можна описати диференціальними рівняннями, які враховують зміну вологості сировини, температури повітря, часу сушіння та швидкості просування матеріалу. Розглянемо рівняння, що описує зміну вологості повітря вздовж барабана. Даний процес називають масообміном. Рівняння показує зміну вологості W від швидкості руху сировини $v(x)$ та випаровування $H(x, t)$ (1).

$$\frac{\partial W}{\partial t} + v(x) \cdot \frac{\partial W}{\partial x} = -H(x,t). \qquad (1)$$

Позначимо змінні процесу:

- $W(x, t)$ – вологість сировини у точці x барабана в момент часу t;
- $T(x, t)$ – температура повітря у точці x барабана в момент часу t;
- $v(x)$ – швидкість руху сировини вздовж барабана;
- $h(x, t)$ – інтенсивність теплообміну між повітрям і сировиною;
- $H(x, t)$ – інтенсивність масообміну (швидкість випаровування вологи).

Зміну температури повітря при теплообміні повітря і сировини опишемо наступним чином:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v(x) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -h(x,t) \cdot (T - T_s), \qquad (2)$$

де T_s – температура сировини.

В процесі масообміну температура повітря зменшується при передачі тепла сировині. Визначимо залежність випарування води від температури середовища і вологості сировини:

$$H(x,t) = k \cdot (W - W_{eq}) \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}}. \qquad (3)$$

Щоб показати залежність поданої температури для сушіння утфелю від вологості сиро-

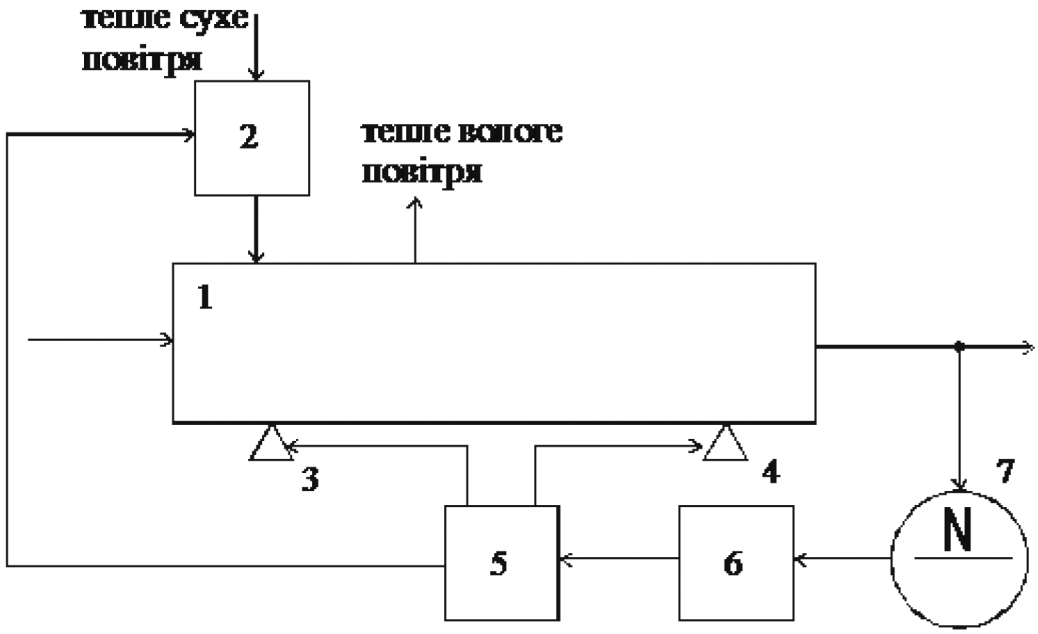


Рис. 1. Структурна схема регулювання вологості сировини на виході сушильної установки

вини, можна використати диференціальне рівняння теплового балансу з урахуванням процесу випаровування вологи. При сушінні утфелю частина тепла йде на нагрівання сировини, а частина – на випаровування вологи. Рівняння теплового балансу буде мати вигляд:

$$h(T_p - T_s) = C_s \cdot \frac{dT}{dt} + C_w \cdot W \frac{dT_s}{dt} + L \cdot \frac{dW}{dt}, \quad (4)$$

де T_p – температура сушильного повітря (°C).; W – вологість сировини (кг вологи / кг сухої речовини); T_s – температура сировини (°C); $H(W)$ – швидкість випаровування вологи; C_s – питома теплоємність сировини (Дж/(кг · °C)); C_w – питома теплоємність води (Дж/(кг · °C)); L – питома теплота випаровування вологи (Дж/кг); h – коефіцієнт теплообміну між гарячим повітрям і сировиною.

В даному рівнянні теплового балансу ліва частина визначає передачу тепла від сушильного повітря до сировини. Перша частина правої частини – тепло, що йде на нагрівання сировини. Друга частина – тепло на нагрівання вологи всередині сировини. Третя частина – тепло, що необхідно використати для випаровування вологи.

Отже для визначення температури сушильного повітря і отримання відповідного результату при початкових даних вологості сировини отримаємо наступне рівняння: Це рівняння (5) є енергетичним балансом для процесу сушіння і описує температуру повітря на виході з сушарки через інші параметри процесу.

$$T_p = T_s + \frac{C_{s+C_wW}}{h} \cdot \frac{dT_s}{dt} + \frac{L}{h} \cdot \frac{dW}{dt}. \quad (5)$$

Для визначення залежності між температурою сушильного повітря розв'яжемо дане диференціальне рівняння (фрагменти коду) і побудуємо графік відповідності. Нижче наведено початкові умови і фрагменти коду

```
#Параметри сушіння
Cs = 1500 Дж/(кг·°C) - питома теплоємність
сировини
Cw = 4186 Дж/(кг·°C) - питома теплоємність
води
L = 2260000 Дж/кг - питома теплота випаро-
вування води
h = 100 Вт/(м^2·°C) - коефіцієнт теплообміну
Ts = 30 #Початкова температура сировини (°C)
W0 = 0.5 Початкова вологість (кг води/кг
сухої сировини)
Wfinal = 0.1 Кінцева вологість
# Час моделювання (у хвилинах)
t_span = [0, 60]
t_eval = np.linspace(t_span[0], t_span[1],
100)
# Диференціальне рівняння для температури
сушильного повітря
def drying_process(t, y):
    T_s, W = y
    dW_dt = -0.005 * (W - 0.1) # Емпірична
модель випаровування
    dT_s_dt = (h * (T_s + 50 - T_s) - L *
dW_dt) / (c_s + c_w * W)
    return [dT_s_dt, dW_dt]
```

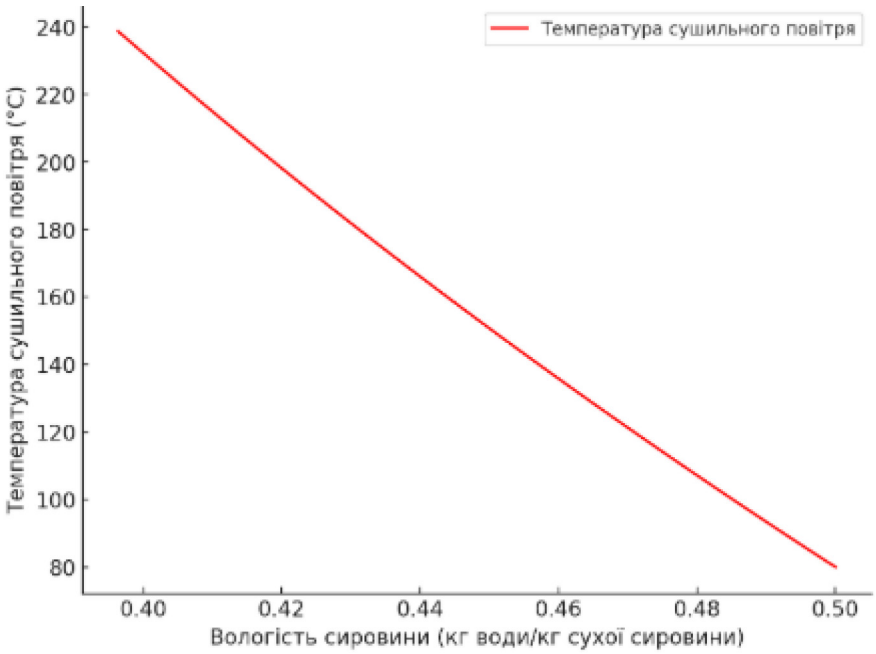


Рис. 2. Залежність поданої температури для сушіння сировини

```
# Розв'язання рівняння
sol = solve_ivp(drying_process, t_span, [T_
s0, W0], t_eval=t_eval)
# Отримані дані
T_s_values = sol.y[0] # Температура сировини
W_values = sol.y[1] # Вологість сировини
T_p_values = T_s_values + (c_s + c_w *
W_values) / h * np.gradient(T_s_values,
t_eval) + L / h * np.gradient(W_values, t_
eval)
```

В результаті на графіку показано залежність поданої температури для сушіння утфелю в залежності від вологості сировини.

Згідно даного графіка бачимо, що по осі ох – показана зміна вологості сировини (від 0.5 до 0.1 кг води/кг сухої сировини). По осі *оу* – показано зміну температуру сушильного повітря (°C). Крива зміни температури показує, як потрібно коректувати температуру сушильного повітря при зміні вологості сировини. На початку сушіння ($W \approx 0.5$) потрібна вища температура, бо випаровується більше води. При зниженні вологості ($W \to 0.1$) температура теж зменшується, щоб уникнути пересушування сировини.

Висновки. Результати дослідження показують, що чим вища початкова вологість сировини, тим вищою повинна бути температура сушильного повітря, щоб забезпечити ефективне випаровування вологості та сушки цукру.

Температура повітря залежить від швидкості випаровування і теплоємності сировини. При зменшенні вологості, потрібно поступово знижувати температуру, щоб уникнути пересушування утфелю.

Для покращення роботи сушильного барабана в подальшому розглянемо вплив швидкості сухого повітря від зміни кута нахилу барабана.

Список літератури:

1. Григорчук Г. В. Методи та засоби підвищення ефективності автоматизованого контролю технологічних процесів на протяглих квазіциліндричних обертових об'єктах. Дисертація. 151, Івано-Франківськ., 2021. 162 с.
2. Суслов В. І. Основи технології сушіння харчових продуктів. – Харків : ХДУХТ, 2010. 256 с.
3. Бабак В. П. Тепломасообмін у технологічних процесах. К. : Либідь, 2014. 288 с.
4. Шутюк В. В., Левківська Т. М., Дущак О. В., Рубанка К. В., Бессараб О. С., Бут С. А. Технології сушіння: навч. посіб. Київ : НУХТ; АртЕк, 2024. 355 с.
5. Grygorchuk G., Grygorchuk L., Bandura V., Tsareva O. Study of the efficiency of automatic control systems // Věda a perspektivy. 2024. № 6(37). P. 258–265. DOI: https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-6(37)-c. 258–265.
6. Foust A. S., Wenzel L. A., Clump C. W., Maus L., Andersen L. B. Principles of Unit Operations. 2nd ed. New York : Wiley, 2008. 768 p.
7. Kudra T., Mujumdar A. S. Advanced Drying Technologies. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 320 p.
8. Keey R. B. Fundamentals of Industrial Drying. – New York: Springer, 2012. 280 p.

Grygorchuk G. V., Grygorchuk L. I., Khrabatyn R. I. MODELING OF THE MASSECUITE DRYING PROCESS

The article presents a detailed analysis of the massecuite drying process as a critical stage in the technological cycle of sugar production, significantly affecting the final product quality and overall energy efficiency. A mathematical model is developed to describe the heat and mass transfer within a drum drying system, taking into account variations in temperature, raw material moisture content, product flow rate, and airflow intensity. A system of differential equations is proposed to describe the dynamic behavior of the process parameters, along with a heat balance equation that defines the relationship between the drying air temperature and the current moisture level in the massecuite. The model also includes graphical simulations showing time-dependent changes, allowing the optimization of drying modes in terms of energy conservation and process stability. The approach offers the possibility of integrating the model into an automated control system based on modern microprocessor technology with real-time feedback. This enables improved control over drying temperature and moisture, reduces sugar losses, and enhances the reliability of sugar plant operations under varying loads and raw material quality. The proposed method supports the development of intelligent process control systems to meet the current demands of the sugar industry in terms of efficiency and product consistency.

Key words: *massecuite, drying, mathematical modeling, moisture, temperature, heat balance, automation, sugar industry.*

УДК 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/11

Дутка Х. Б.
Національний університет «Львівська політехніка»

Бешлей М. І.
Національний університет «Львівська політехніка»

Бешлей Г. В.
Національний університет «Львівська політехніка»

РОЗРОБКА КРОСПЛАТФОРМЕНОГО ВЕБЗАСТОСУНКУ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ТА СОРТУВАННЯ ВІДХОДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті розглядається процес розроблення кросплатформеного вебзастосунку для розпізнавання та сортування відходів із використанням технологій штучного інтелекту. Актуальність даної теми зумовлена глобальною екологічною кризою, зростанням обсягів побутових і промислових відходів, а також низьким рівнем поінформованості населення щодо правильного сортування сміття. Запропоноване рішення має на меті підвищення ефективності управління відходами через впровадження інтелектуальних цифрових інструментів.

Основною особливістю запропонованого підходу є інтеграція штучного інтелекту безпосередньо в клієнтську частину вебзастосунку за допомогою бібліотеки TensorFlow.js. Це дозволяє виконувати розпізнавання типів відходів у реальному часі без необхідності надсилання даних на сервер, що значно підвищує швидкодію системи, забезпечує конфіденційність та зменшує обчислювальне навантаження. Навчання моделі проводилося за допомогою власного набору зображень через платформу Teachable Machine, що забезпечило адаптацію системи до цільового середовища використання. У межах вебзастосунку реалізовано функціональні можливості: аутентифікація користувачів, додавання і перегляд записів про відходи, категоризація, інтерактивна карта з пунктами збору сміття, а також модуль для розпізнавання об'єктів через камеру. Структура системи розроблена на основі стеку технологій React.js, Node.js, PostgreSQL, Prisma та інших сучасних рішень, що забезпечує масштабованість, зручність і стабільність у роботі.

У статті також окреслено потенційні сфери застосування запропонованого інструменту, зокрема в освітніх закладах, комунальних службах, промисловості та побуті. Зроблено акцент на швидкодії, простоті використання та доступності технології для широкого кола користувачів. Застосунок є кросплатформеним і легко інтегрується з іншими цифровими системами, що розширює можливості його використання в різних середовищах та підвищує гнучкість впровадження. Запропонований вебзастосунок може виступати як основа для подальшого розвитку інтелектуальних рішень у сфері екологічного управління та цифрової трансформації утилізації відходів.

Ключові слова: *штучний інтелект, розпізнавання відходів, сортування сміття, вебзастосунок, TensorFlow.js, автоматизація, екологічні технології, клієнтська модель, інтерактивна карта, управління відходами.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростання обсягів побутових і промислових відходів питання їхнього ефективного сортування набуває особливої актуальності. Щороку в Україні утворюються сотні мільйонів тонн сміття, значна частина якого потрапляє на полігони без попереднього сортування, що призводить до істотного забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосфери. Така ситуація ставить під загрозу не лише екологічну рівновагу, а й здоров'я населення, порушуючи основи екологічної безпеки держави. Попри наявність законодавчих вимог щодо обов'язкового сортування відходів, їх дотримання залишається низьким. Основними причинами цього є відсутність зручних та інтуїтивно зрозумілих інструментів для роздільного збору сміття, низький рівень екологічної культури та поінформованості громадян, недовіра до системи утилізації та переробки, а також недостатнє впровадження інноваційних цифрових технологій у сфері поводження з відходами.

Особливої уваги потребує питання залучення сучасних інформаційних технологій, зокрема веб-

платформ та штучного інтелекту, до автоматизації процесів і підвищення мотивації населення до правильного поводження з відходами. Існує нагальна потреба у створенні інтелектуальних рішень, здатних не лише розпізнавати типи відходів, а й інтерактивно навчати користувачів, сприяючи формуванню екологічно відповідальної поведінки. Таким чином, відсутність доступного цифрового інструменту з функціями інтелектуального розпізнавання та сортування відходів становить суттєву прогалину в системі екологічної безпеки, що зумовлює необхідність розроблення вебзастосунку на основі штучного інтелекту, здатного автоматизувати процес сортування сміття, підвищити екологічну обізнаність населення та сприяти ефективному управлінню відходами..

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років інтенсивно зростає інтерес до використання технологій штучного інтелекту (ШІ) у сфері управління твердими побутовими відходами. Основним напрямом досліджень є автоматизація процесів сортування за допомогою глибокого навчання, зокрема технологій комп'ютерного зору. У роботі [2] автором запропоновано мобільний застосунок, що реалізовує систему класифікації побутових відходів за допомогою моделі глибокого навчання. Застосунок здатен класифікувати об'єкти в шість основних категорій з точністю понад 90 %, що робить його ефективним засобом підтримки екологічно свідомої поведінки користувачів. Важливою особливістю є зручний мобільний інтерфейс та акцент на використання у побуті, однак рішення залишається орієнтованим на окрему платформу й вимагає встановлення.

Інше дослідження [3] присвячене розробці багатокласової моделі, здатної класифікувати 28 типів сміття. Автори використовують згорткові нейронні мережі та досягають загальної точності понад 83 %. Хоча рішення не орієнтоване на кінцевого користувача, воно має пермпективи для інтеграції у промислові сортувальні системи та роботизовані комплекси. У роботі [4] використано модель YOLOv5 для точного розпізнавання та класифікації кількох типів відходів: пластик, скло, папір, метал, картон та органіка. Дослідження акцентує увагу на продуктивності моделі, що дозволяє розгортати її у реальному часі. Проте архітектура рішення вимагає високих обчислювальних потужностей, і його застосування залишається обмеженим до спеціалізованого обладнання. Серед готових користувацьких рішень, що вже представлені на ринку, варто відзначити Oscar Pocket [5] – мобільний застосунок, який ідентифікує понад 100 тисяч продуктів та надає інструкції з їх утилізації. Його перевагою є глибока база даних і простота використання, проте він вимагає постійного інтернет-з'єднання та не забезпечує автономної роботи моделі. Інший приклад – Wasteless [6], який адаптує інструкції до локальних умов сортування, проте наразі перебуває на етапі розробки. Система Oscar Sort [7], встановлена у кампусі Університету Кентуккі, спрямована на просвітницьку функцію та автоматизацію викидання сміття. Має обмежену доступність через потребу в спеціальному обладнанні та технічній підтримці.

Постановка завдання. З огляду на аналіз, можна зробити висновок, що більшість існуючих рішень орієнтовані на мобільні платформи або промислове обладнання з високими вимогами до ресурсів. При цьому майже відсутні універсальні вебзастосунки, що поєднують високу швидкодію, автономність, кросплатформеність і простоту впровадження. Саме тому метою роботи розроблення клієнтського вебзастосунку з вбудованою моделлю штучного інтелекту, що працює безпосередньо в браузері, з метою забезпечення миттєвого розпізнавання та сортування відходів, підвищення доступності й конфіденційності користувацьких даних, а також популяризації екологічно свідомого поводження з відходами серед широкого кола населення без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення.

Виклад основного матеріалу. У рамках дослідження розроблено інтелектуальний вебзастосунок для розпізнавання та сортування відходів, що поєднує в собі технології штучного інтелекту, обробки зображень, аналітики користувацьких дій і просторової навігації. Основна ідея полягає у створенні універсального інструменту, доступного через вебінтерфейс, який дозволяє користувачу за допомогою камери пристрою автоматично визначати тип відходу та отримувати рекомендації щодо його утилізації. Розроблена система включає повний функціонал вебзастосунку: модулі аутентифікації, управління користувачами, ведення обліку відходів, відображення статистики, сортування за категоріями, а також інтерактивну карту з можливістю додавання пунктів збору. Усе це об'єднано сучасною клієнт-серверною архітектурою на основі стеку React.js – Node.js – PostgreSQL.

На рис. 1 представлено структуру інформаційних потоків між основними компонентами системи. Користувач працює через вебінтер-

Рис. 1. Схема інформаційної архітектури

фейс, побудований на React.js, який забезпечує доступ до функціональних модулів застосунку. Кожна дія користувача, що стосується взаємодії з даними (реєстрація, додавання відходів, перегляд статистики, робота з картою), призводить до формування HTTP-запитів, які надсилаються на сервер.

Серверна частина, реалізована з використанням Node.js та Express, приймає ці запити та обробляє їх відповідно до бізнес-логіки. Верифікація прав доступу, валідація даних і логіка роботи з обліковими записами користувачів реалізовані саме на цьому рівні. Дані зберігаються у реляційній базі даних PostgreSQL, доступ до якої здійснюється через ORM Prisma. Такий підхід дозволяє легко керувати сутностями та зменшує ризик помилок при взаємодії з БД. Інформаційна архітектура проєкту передбачає чітке розмежування ролей клієнта і сервера, централізоване зберігання даних і модульність функціоналу, що забезпечує зручність підтримки системи, можливість масштабування та інтеграцію додаткових функцій у майбутньому. Для кращого розуміння функціональних можливостей системи на рис. 2 наведено діаграму варіантів використання (use-case діаграму), яка відображає основні сценарії взаємодії користувача з вебзастосунком.

Також, передбачено на головній сторінці вебзастосунку (рис. 3) реєстрацію, авторизацію, роботу з особистими даними, управління категоріями відходів, використання AI-модуля для розпізнавання, перегляд статистики та додавання пунктів збору на інтерактивну карту (рис. 4).

Розроблений вебзастосунок орієнтований на широке коло користувачів – як побутових, так і навчальних або комунальних структур. Його основною цінністю є доступність, простота у використанні та можливість масштабування. На відміну від існуючих мобільних або серверних рішень, запропонований застосунок забезпечує повноцінний локальний аналіз вхідних даних, не покладаючись на зовнішні API чи хмарні сервіси. Такий підхід забезпечує автономність роботи, високу швидкодію та збереження конфіденційності зображень.

Універсальність вебзастосунку дозволяє інтегрувати її в різноманітні цифрові екосистеми. Зокрема, застосунок може бути використаний:

– в освітніх закладах – як інтерактивний навчальний інструмент з екологічної грамотності, де учні можуть у реальному часі досліджувати види відходів, навчатися сортуванню та працювати з картою пунктів прийому;

– у житлово-комунальних підприємствах – як частина цифрового сервісу для мешканців, що допомагає правильно сортувати сміття безпосередньо вдома, підвищуючи якість вторинної сировини;

– у закритих корпоративних або виробничих середовищах – для контролю сортування відходів персоналом (наприклад, в офісах, коворкінгах, цехах);

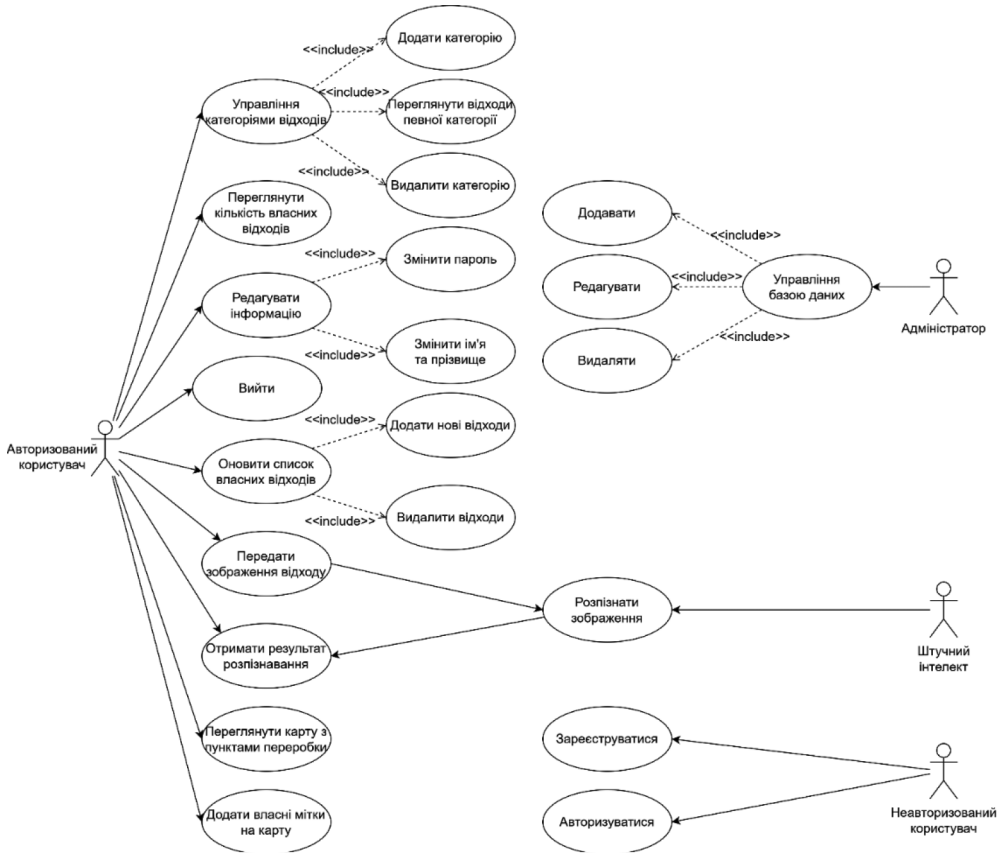


Рис. 2. Use-case діаграма взаємодії користувача із системою

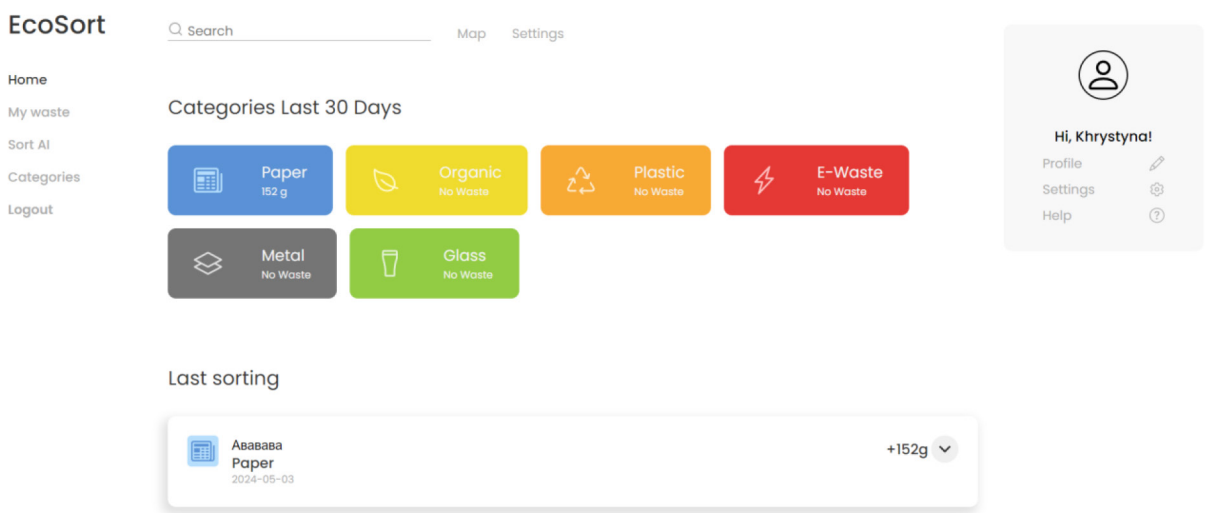


Рис. 3. Головна сторінка вебзастосунку

– як частина більшого порталу або мобільного додатку, пов'язаного з екологічними сервісами – через веб-інтеграцію (наприклад, додавання у вже існуючі сайти громад або міст);

– у проєктах громадського моніторингу – як інструмент збору даних про поведінку користувачів та мапування точок утилізації.

Гнучка архітектура та відсутність залежності від сторонніх сервісів дозволяють адаптувати систему під різні сценарії використання, розширювати її функціональність або локалізовувати відповідно до потреб конкретного регіону чи організації. Ключовим компонентом, який забезпечує автономність і технологічну цінність сис-

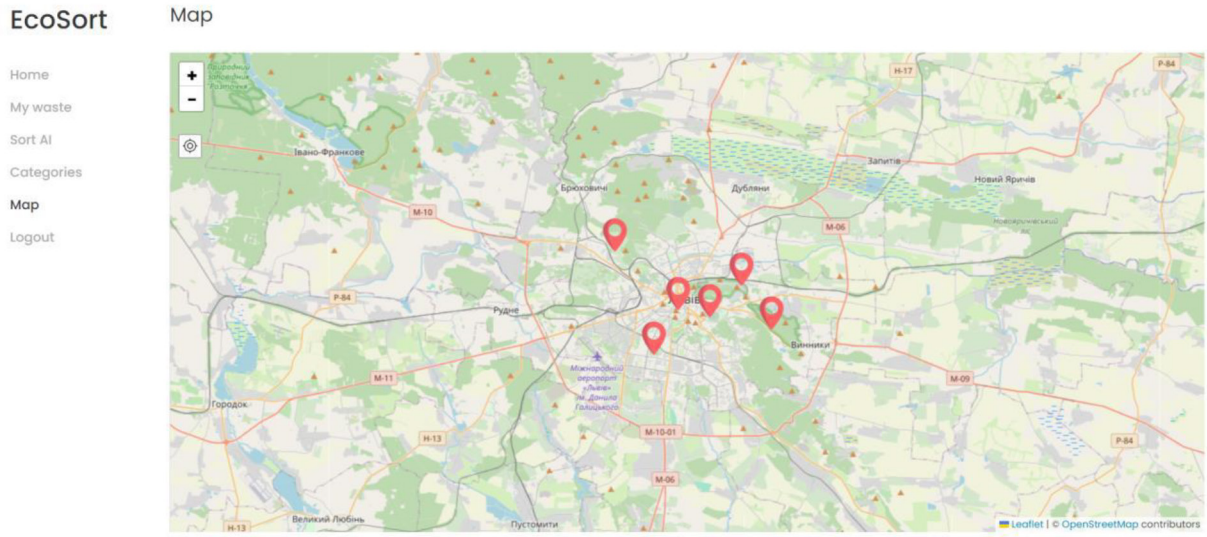


Рис. 4. Use-case діаграма взаємодії користувача із системою

теми, є вбудований модуль штучного інтелекту для розпізнавання відходів.

Модель ШІ була попередньо навчена на власному датасеті, що складався зі знімків об'єктів шести категорій відходів: папір, пластик, скло, метал, органіка та електроніка. Фотографії зроблені в різних умовах освітлення та з різних ракурсів, щоб покращити загальну якість навчання та підвищити стійкість нейромережі до змін середовища. Для створення та навчання моделі обрано платформу Teachable Machine, яка забезпечує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, підтримку експорту у форматі TensorFlow.js та дає змогу швидко адаптувати систему кваліфікації під специфіку власного набору даних без глибоких знань у сфері машинного навчання. Це дозволило сфокусуватися на якості вхідного датасету та інтеграції моделі у клієнтську частину вебзастосунку. Для досягнення збалансованої точності та швидкодії було обрано такі параметри навчання: epochs – 500, batch size – 16, learning rate – 0.001. Велика кількість епох забезпечила глибше засвоєння ознак кожного класу навіть при обмеженому обсязі даних, а оптимальний розмір пакету сприяв стабільному оновленню ваг під час тренування. Значення швидкості навчання дозволило моделі мінімізувати помилки без втрати чутливості до візуальних відмінностей між класами.

Після розгортання модель демонструє стабільну роботу у реальному часі. Результати класифікації (рис. 5 та рис. 6) подаються у вигляді визначеної категорії відходу та ймовірнісного розподілу між класами. Висока швидкодія та автономність підтверджують ефективність обраного підходу для використання у вебсередовищі без додаткових інфраструктурних витрат.

Для проведення тестування розробленої моделі було сформовано окремий набір образів, які не входили до навчального датасету. Кожне зображення містило візуальне представлення одного об'єкта певної категорії відходів. Загалом тестовий набір охоплював усі шість класів: E-Waste, Glass, Metal, Organic, Paper та Plastic. Зображення були отримані в реальних умовах освітлення та з різних ракурсів, що дозволило оцінити стійкість моделі до зовнішніх змін. Процес тестування реалізовано у вигляді окремого модуля на клієнтській частині застосунку, який дає змогу завантажити тестові зображення, провести класифікацію за допомогою моделі та автоматично зафіксувати результати у вигляді:

– точності класифікації по кожному класу;
– часу передбачення для кожного зображення;
– матриці помилок, яка відображає реальні та передбачені класи.

Кожне зображення оброблялося індивідуально в режимі реального часу без попередньої обробки або кешування, що дозволило об'єктивно оцінити швидкодію та точність моделі в умовах, наближених до практичного використання. Крім того, результати кожного експерименту виводились на екран у вигляді інтерактивних діаграм.

На першому етапі аналізу розраховано загальну точність класифікації по кожному з шести класів. Для цього фіксувалася кількість правильних передбачень моделі щодо кожної категорії відходів та загальна кількість зображень, що належали до цього типу. Результати виведено у вигляді

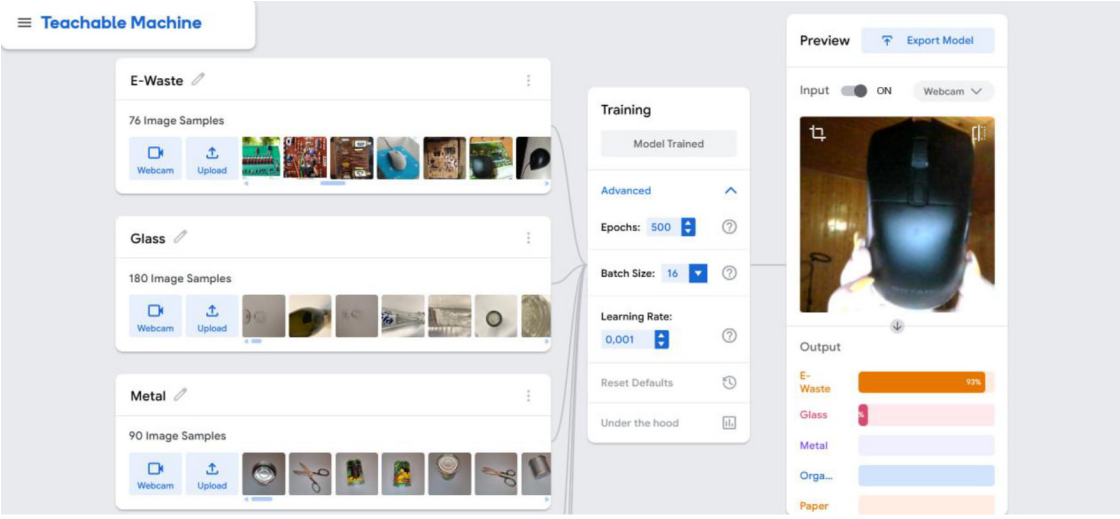


Рис. 5. Приклад розпізнавання: комп'ютерна мишка як категорія «електроніка»

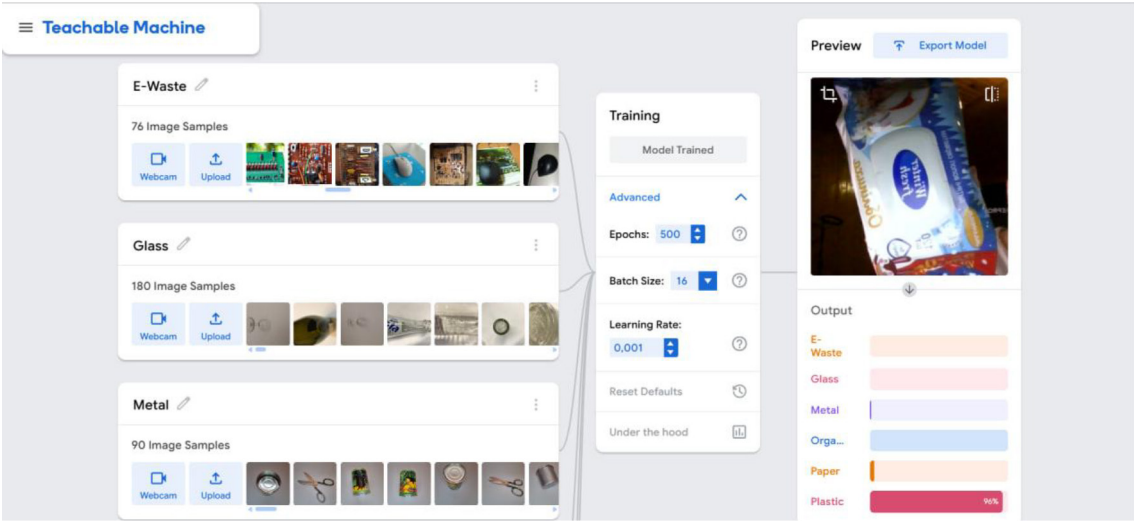


Рис. 6. Приклад розпізнавання: упаковка серветок як категорія «пластик»

стовпчикової діаграми (рис. 7), яка демонструє відсоткове співвідношення правильних класифікацій у межах кожного класу.

Як видно з графіку, найвищу точність досягнуто для категорій Plastic та Paper – понад 90 %, що свідчить про добре сформовані ознаки цих

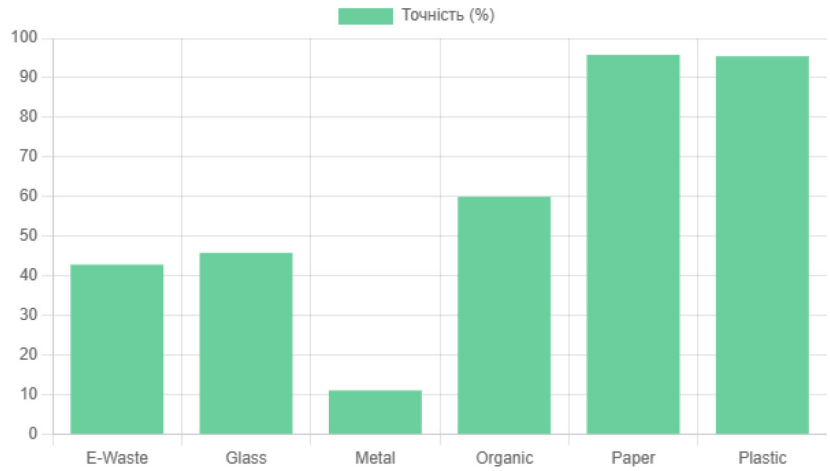


Рис. 7. Загальна точність класифікації по класах відходів

класів та достатній обсяг прикладів у тренувальному наборі. Категорії Organic, Glass та E-Waste показали задовільні результати з точністю понад 70 %. Натомість клас Metal продемонстрував найнижчий рівень точності – менше 30 %, що може бути пов'язано з візуальною схожістю його об'єктів з іншими категоріями або недостатнім представленням у навчальному датасеті.

Наступним критерієм оцінки була швидкодія моделі, тобто час, необхідний для обробки одного зображення та видачі результату класифікації. Цей показник є критично важливим для інтерактивних вебзастосунків, де очікується миттєвий відгук користувачеві. Для кожного зображення з тестового набору автоматично фіксувався час передбачення в мілісекундах, після чого результати було візуалізовано на рис. 8.

Як показано на графіку, більшість зображень оброблялися у межах 50–100 мс, що забезпечує плавну та швидку взаємодію з користувачем. Найвищий час було зафіксовано для першого образу, що пояснюється ініціалізацією моделі безпосередньо у браузері перед першим передбаченням. Подальші зображення обробляються значно швидше завдяки вже завантаженій нейромережі та активованим ресурсам.

Завершальним етапом тестування стала побудова матриці помилок, що дозволяє проаналізувати, які саме класи найчастіше плутає модель між собою. На рис. 9 представлено діаграму, де по осі X відображено реальні класи відходів, а кожен стовпчик представляє набір передбачень зроблених для цієї категорії.

Згідно з діаграмою, модель найчастіше правильно класифікує зображення категорій Plastic та Paper. Водночас помітна кількість помилкових передбачень спостерігається у класі Metal, який іноді класифікується як Glass або E-Waste. Це може свідчити про наявність візуальних співпадінь між ними, або недостатню кількість варі-

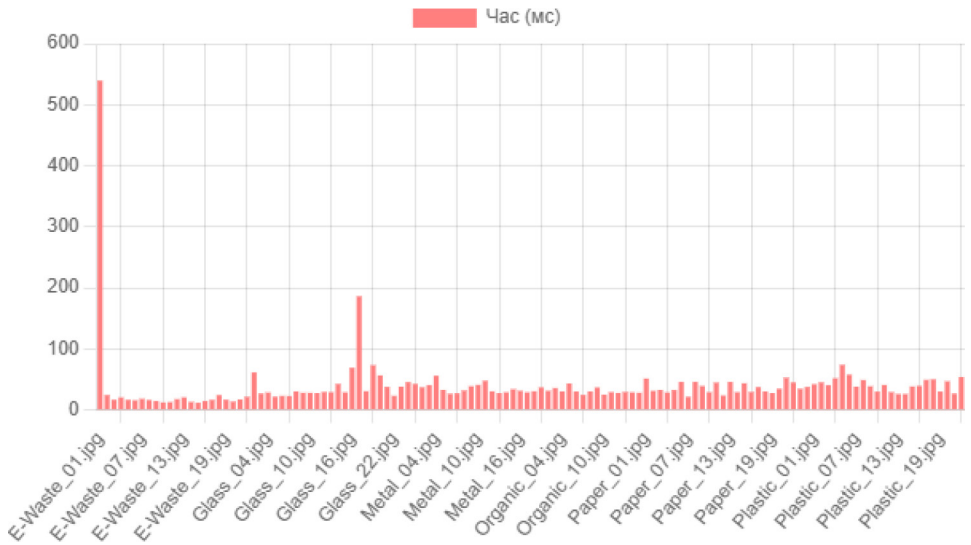


Рис. 8. Час розпізнавання зображень

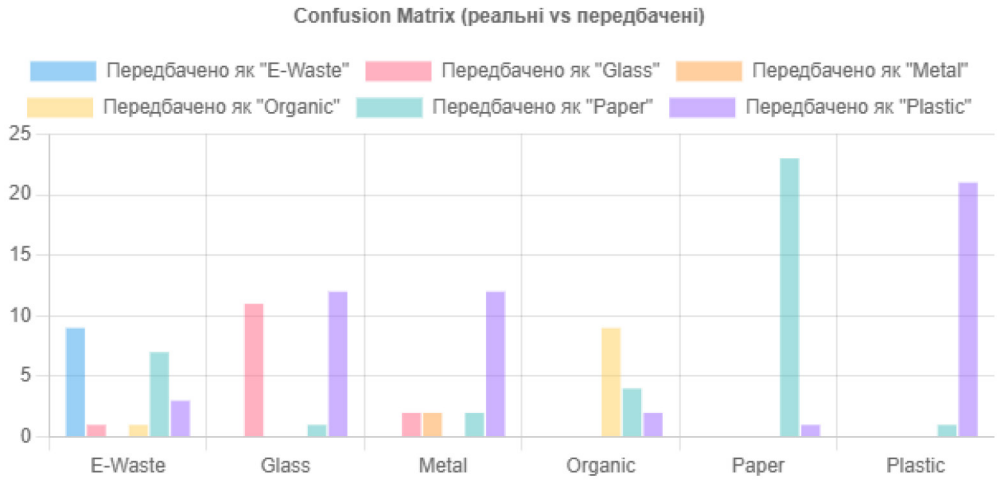


Рис. 9. Матриця помилок класифікації

ативних прикладів у навчальному наборі. Аналіз таких помилок є важливим етапом для подальшого вдосконалення нейромережі, зокрема, через доповнення датасету новими зображеннями або уточнення архітектури моделі.

Під час тестування в різноманітних умовах (освітлення, ракурси, задній фон) було виявлено, що на якість класифікації значною мірою впливає ступінь видимості об'єкта, контрастність зображення та наявність сторонніх предметів у кадрі. Об'єкти, зняті крупним планом з хорошим освітленням, класифікуються з високою точністю. У той же час, наявність тіней, часткове перекриття або низький контраст можуть спричинити зміщення у передбаченні класу. Однак, завдяки нормалізації зображень та попередній адаптації датасету до варіативних умов зйомки, модель демонструє стабільність навіть у неідеальних сценаріях.

Ключовим фактором практичної придатності є можливість роботи в реальному часі, без затримок у виведенні результатів класифікації. Модель забезпечує передбачення менш ніж за 100 мс після активації камери, що дозволяє користувачеві одразу отримувати зворотний зв'язок. Це відкриває можливості інтерактивної взаємодії у навчальних програмах, побутовому сортуванні або додавання у більші екологічні сервіси. Висока швидкодія, автономність і незалежність від сторонніх сервісів формують переваги запропонованого рішення як з технологічної, так і з користувацької точки зору.

Висновки. Реалізовано інтелектуальний веб-застосунку для розпізнавання та сортування побутових відходів, що функціонує повністю у середовищі браузера. Основною перевагою запропонованого рішення є використання клієнтської моделі штучного інтелекту, що працює автономно та не потребує підключення до серверної інфраструктури або зовнішніх API. Такий підхід дозволяє забезпечити високу швидкодію, збереження конфіденційності зображень і незалежність від якості мережевого з'єднання.

Застосунок реалізовано на основі вебтехнологій React.js, Node.js, PostgreSQL та доповнено широким функціоналом: модулями аутентифікації, управління користувачами, аналітики, категоризації відходів та інтерактивної карти пунктів збору. Розроблена модель ШІ попередньо навчена на власному датасеті, що охоплює шість основних категорій відходів, із використанням платформи Teachable Machine. Проведене тестування продемонструвало здатність моделі до точного розпізнавання більшості класів зображень у режимі реального часу, із середнім значенням передбачення менше 100 мс.

Одержані результати підтверджують ефективність застосованих технічних рішень і придатність системи до практичного використання у побутовому та освітньому середовищі. Водночас аналіз помилок класифікації вказує на потенціал для подальшого вдосконалення – зокрема, розширення навчального набору та покращення розпізнавання для класів зі схожими візуальними ознаками. Використання ШІ забезпечує високу точність класифікації, а інтеграція з базами пунктів прийому відходів, системами навчання та еко-інформування сприяє формуванню екологічної свідомості громадян. Отже, вебзастосунок виконує не лише функціональну роль, а й виступає засобом екопросвіти, підвищення громадської відповідальності та цифровізації сфери управління відходами, що є важливим елементом стратегії сталого розвитку.

Список літератури:

1. Не тренд, а необхідність: чому важливо сортувати відходи | Журнал ECOBUSINESS. *Журнал ECOBUSINESS. Екологія підприємства | ecolog-ua.com*. URL: https://ecolog-ua.com/news/ne-trend-neobhidnist-chomu-vazhlyvo-sortuvaty-vidhody (дата звернення: 22.03.2025).

2. Kunwar S. MWaste: An app that uses deep learning to manage household waste. *Clean Technologies and Recycling*. 2023. Vol. 3, no. 3. P. 119–133. URL: https://doi.org/10.3934/ctr.2023008

3. Enhancing waste sorting and recycling efficiency: robust deep learning-based approach for classification and detection / F. R. Sayem et al. *Neural Computing and Applications*. 2024. URL: https://doi.org/10.1007/s00521-024-10855-2

4. Multi Object Detection and Classification in Solid Waste Management using Region Proposal Network and YOLO model. *Global NEST: the international Journal*. 2022. URL: https://doi.org/10.30955/gnj.004501

5. Oscar Pocket. *WasteGPT*. URL: https://www.oscarpocket.com/ (дата звернення: 22.03.2025).

6. Wasteless. *Wasteless*. URL: https://wastelesseu.com/ (дата звернення: 22.03.2025).

7. Say hello to Oscar Sort, UK Recycling's new AI-powered, waste-sorting system. *UKNow*. URL: https://uknow.uky.edu/campus-news/say-hello-oscar-sort-uk-recycling-s-new-ai-powered-waste-sorting-system (дата звернення: 22.03.2025).

Dutka H. B., Beshley M. I., Beshley H. V. DEVELOPMENT OF A CROSS-PLATFORM WEB APPLICATION FOR WASTE RECOGNITION AND SORTING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The article explores the development of a cross-platform web application for waste recognition and sorting using artificial intelligence technologies. The relevance of this topic is driven by the global environmental crisis, the increasing volume of household and industrial waste, and the low public awareness of proper waste sorting practices. The proposed solution aims to improve waste management efficiency through the implementation of intelligent digital tools.

A key feature of the proposed approach is the integration of artificial intelligence directly into the client side of the web application using the TensorFlow.js library. This enables real-time waste type recognition without the need to send data to a server, significantly improving system performance, ensuring user privacy, and reducing computational load. The model was trained using a custom image dataset via the Teachable Machine platform, allowing the system to be adapted to its target usage environment.

The web application includes features such as user authentication, waste record creation and viewing, categorization, an interactive map with waste collection points, and an object recognition module using the device's camera. The system architecture is built on a modern technology stack including React.js, Node.js, PostgreSQL, Prisma, and other contemporary tools, ensuring scalability, usability, and operational stability.

The article also outlines potential application areas of the proposed tool, including educational institutions, municipal services, industry, and household use. Emphasis is placed on the system's speed, ease of use, and accessibility for a wide range of users. The application is cross-platform and can be seamlessly integrated with other digital systems, expanding its applicability across various environments and enhancing deployment flexibility. The proposed web application can serve as a foundation for further development of intelligent solutions in the field of environmental management and digital transformation of waste disposal.

Key words: *artificial intelligence, waste recognition, waste sorting, web application, TensorFlow.js, automation, environmental technologies, customer model, interactive map, waste management.*

УДК 004.82
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/12

Єщенко М. С.
Національний університет «Києво-Могилянська академія»

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН

Ця стаття оглядового характеру покликана детально дослідити організаційно-орієнтований метод моделювання технології блокчейн і зафіксувати його переваги, а також визначити подальші можливі вдосконалення для підвищення точності моделі. Вона забезпечує поглиблений аналіз відображення абстракцій між блокчейном і мультиагентними системами.

Блокчейн-системи все ще є відносно новими соціальними системами, і їх організаційне моделювання, описане в статті, розглядає засоби для їхнього більш точного представлення з метою покращення їх розуміння та поширення у релевантних областях. Мультиагентні системи в умовах використання організаційно-орієнтованого підходу надають гнучкий інструментарій, який дозволяє повноцінно представляти абстракції блокчейну. Організаційно-орієнтоване моделювання абстрагує внутрішні деталі реалізації агентів і дозволяє зосередити увагу на структурних, організаційних і соціальних вимірах блокчейн-систем – на тому, що пов'язує структуру організації з поведінкою агентів, що спостерігаються ззовні їхніми користувачами.

Представлення систем блокчейну за допомогою абстракції організації дозволяє агентам співпрацювати один з одним, визначаючи спільні шаблони співпраці, такі як обов'язки, групи, протокол та глобальні завдання. Крім того, норми можуть використовуватися для обмеження поведінки незалежних агентів щодо глобальної мети організації.

Особлива увага приділяється аналізу підходу під назвою «Агент/Група/Роль» (AGR), який описує організацію мультиагентної системи на високому рівні абстракції, і тому є дуже гнучким і відкритим для різних схем взаємодії та організаційних архітектур.

Розглянутий організаційно-орієнтований підхід до моделювання добре зарекомендував себе в задачі представлення технології блокчейн. Так, вузли представлені агентами, а транзакції представлені повідомленнями. Агенти мультиагентних систем мають достатню гнучкість для представлення двох різних абстракцій блокчейну – вузлів і смарт-контрактів. Взаємодії на основі ролей між групами добре передають проблематику роботи об'єкта моделювання.

Подальші дослідження для ще більшого підвищення точності моделювання ймовірно мають включати розгляд саморегуляції системи за допомогою спеціальних регуляторних мета-агентів, які забезпечать безпеку системи від багатьох векторів атак, одночасно контролюючи інших агентів системи та підтримуючи коректність роботи системи в цілому.

Ключові слова: *блокчейн, мультиагентні системи, моделювання, обмін повідомленнями, смарт-контракти.*

Постановка проблеми. Під час проєктування розподілених програмних застосунків часто постає задача з вибором рішення для збереження даних. Одним із варіантів є блокчейн, коректність застосування якого є не завжди очевидною. Саме тому постає необхідність із його представлення засобами розповсюджених мультиагентних систем задля надання наочного розуміння його особливостей.

Оскільки технологія блокчейн є достатньо новою, її моделювання через більш сталі абстракції дає можливість пояснення принципу її роботи та створення позитивного впливу на її прийняття й поширення у релевантних предметних областях, таких як охорона здоров'я, логістика та банківська справа.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки блокчейн-системи є соціальними системами, саме організаційне моделювання надає більш релевантні абстракції для точнішого представлення перших згідно [1–3]. Мультиагентні системи в основі організаційно-орієнтованого підходу надають гнучкий інструментарій, що уможливлює повноцінне відображення абстракцій блокчейну, особливо з використанням підходу «Агент/Група/Роль», окресленого у [3]. Організаційно-орієнтоване моделювання абстрагує внутрішні деталі реалізації агентів і, відповідно,

дозволяє зосередитися на структурних, організаційних [2, 4–5] і соціальних вимірах блокчейн-систем – на тому, що пов'язує структуру організації [6] із поведінками агентів.

Проведений аналіз останніх тематичних досліджень виявив несистемність відомостей із моделювання технології блокчейн. Зокрема, у [3] накладаються обмеження із використання визначеної ролі, що не є притаманним об'єкту моделювання згідно [6–7].

Постановка завдання. Метою статті є детальне дослідження організаційно-орієнтованого способу моделювання технології блокчейн, фіксування його переваги та узагальнення знань щодо нього, а також визначення подальших шляхів можливого вдосконалення процедури для підвищення точності мультиагентної моделі задля поширення обізнаного використання блокчейну.

Виклад основного матеріалу. Структура даних блокчейну. Представлення систем блокчейну за допомогою абстракції організації [2] дозволяє агентам співпрацювати один з одним, визначаючи загальні схеми співпраці, такі як обов'язки, групи, протокол і глобальні завдання. Наприклад, прийняття рішення про загальний блок у системі блокчейн є інституційною дією, можливою лише тому, що система блокчейну визначає правила, яких необхідно дотримуватися для цього.

Крім того, норми можна використовувати для обмеження поведінки незалежних агентів щодо глобальної мети організації [2, 8–9]. Іншими словами, коли агент бере на себе роль, він приймає набір поведінкових обмежень, які підтримують глобальну мету організації. Після цього агент вирішує підкорятися чи не підкорятися цим обмеженням. Наприклад, у системі блокчейн, коли агент приймає роль користувача, він приймає поведінкові обмеження щодо підготовки належних транзакцій і перевірки всіх даних перед ретрансляцією [8].

Наявність специфікації організації дозволяє агентам міркувати відповідним чином. Тобто агенти можуть вирішувати, чи приєднатися до організації, чи залишити її протягом свого життя, можуть змінити/адаптувати свою поточну організацію та можуть вирішити підкорятися/не підкорятися нормам організації.

Крім того, така організаційна специфікація також може дозволити організації міркувати про себе та про агентів [10], щоб забезпечити досягнення своєї глобальної мети. Тобто організації можуть дозволити агентам приєднуватися/виходити під час виконання, вони можуть дозволити агентам змінювати/адаптувати свою поточну організацію, і вони можуть керувати поведінкою агентів (відслідковувати, примушувати, регламентувати) [5].

Підхід «Агент/група/роль». Серед кількох організаційно-орієнтованих мультиагентно-орієнтованих підходів [1–3, 6], запропонованих у літературі, підхід «Агент/група/роль» (AGR), запропонований у [3], добре підходить для поставленої задачі та мети. Зокрема, AGR описує, що таке організація мультиагентної системи на високому рівні абстракції, і тому є дуже гнучким і відкритим для різних схем взаємодії та організаційних проектів. Модель AGR (рис. 1) базується на трьох абстракціях першого класу: агент, група та роль. Ці абстракції комбінуються та взаємодіють одна з одною.

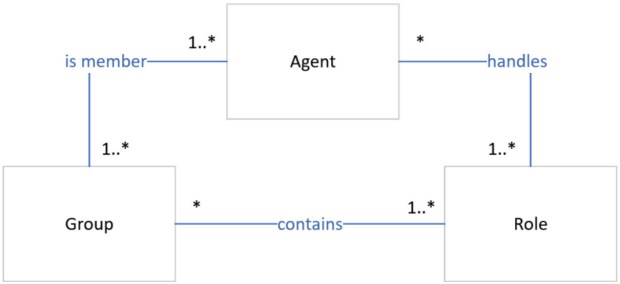


Рис. 1. Організаційна модель

Ролі – це абстрактні представлення функціональних позицій агентів у групі. Роль описує пов'язані з нею обов'язки, обмеження, яким агенти повинні задовольнити, щоб отримати цю роль, і переваги, які агенти отримають, граючи цю роль [7].

Групи визначають контексти для шаблонів діяльності (тобто ролей), які можуть бути спільними для груп агентів (тобто вони об'єднують агентів, які працюють разом). Агенти можуть спілкуватися, якщо і тільки якщо вони належать до однієї групи. Групи – це організаційні структури [5, 7], де взаємодії перетворюють сукупність агентів у функціонально узгоджене ціле. Крім того, групи також можуть встановлювати межі. Агенти, які не належать до групи, можуть не знати її структуру.

Агенти є активними, комунікаційними сутностями, які грають ролі в групах. Агенти виконують принаймні одну роль у групі, але можуть виконувати кілька ролей і бути членами кількох груп [6]. Однак жодних обмежень не накладається на архітектуру, когнітивні здібності та/або розумові проблеми агентів.

На рисунку 2 показано робочий процес, який використовується для визначення організаційної моделі систем блокчейн. Пропонуємий підхід подібний до того, що представлено в [3], із системною точкою зору на функціональні можливості через так звані «Системні історії». Однак, на відміну від [3], відсутні обмеження конкретною роллю чи агентом.

Спочатку визначаються ролі, які є частиною системи, тобто функції високорівневі функції, які повинні бути присутніми в системі. З цих визначень ролей робиться висновок про різні групи та те, як ролі групуються разом для досягнення своїх цілей. Коли ці два кроки зроблені, далі детально розробляються ролі та визначається їхня поведінка – низькорівневі функції, які повинні бути присутніми, щоб виконувати функції високого рівня. Далі визначається, як ролі взаємодіють одна з одною всередині групи – про що потрібно повідомити та як це зробити. Наостанок, визначаються типи агентів, які типи взаємодії вони можуть мати та ролі, які вони можуть відігравати в системі.

Загальна організаційна модель для систем блокчейн. Використовуючи підхід AGR, пропонується загальна організаційна модель для систем блокчейну, яка є основою для визначення кількох конкретних систем блокчейну. Таким чином можна створювати та/або аналізувати конкретні блокчейн-системи, які знаходяться на рівні агента, тобто там, де можуть взаємодіяти агенти з різними когнітивними здібностями. Це дозволяє чітко розділити різні будівельні блоки блокчейн-систем, залишаючи при цьому можливість досліджувати поведінкові відмінності в чітко визначеній структурі.

З цією метою визначаються всі можливі ролі та їхню відповідну номінальну (чесну) поведінку, застосовну до всіх типів систем блокчейну. Агенти, які беруть участь у системах блокчейну, можуть виконувати одну або декілька загальних ролей, перелічених нижче, в тому числі в кількох системах блокчейну одночасно.

Типи ролей. Відносно існуючих систем блокчейну визначається 9 загальних типів ролей [2, 7, 11]. Далі створюється ретельний розподіл обов'язків між цими типами ролей.

Ініціатор угоди (Transaction Proposer) несе відповідальність за пропонування угод. Індосант угоди (Transaction Endorser) відповідає за підтвердження запропонованих угод. Ініціатор блоків (Block Proposer) відповідає за створення та пропонування блоків для мережі блокчейн. Індосант блоку (Block Endorser) відповідає за схвалення запропонованих блоків. Підтримувач блокчейну (Blockchain Maintainer) відповідає за підтримку та реплікацію структури даних блокчейну. Інвестор несе відповідальність за здійснення інвестицій у мережу блокчейн. Об'єкт інвестування несе відповідальність за виконання завдання від імені своїх інвесторів і пропорційний перерозподіл відповідних прибутків між ними. Підрядник (Contractor) відповідає за надання внутрішніх послуг іншим учасникам на договірних засадах. Оракул (Oracle) відповідає за надання зовнішніх послуг та/або даних іншим учасникам.

Типи груп. У контексті систем блокчейну визначено дві категорії загальних типів груп блокчейну [5], застосовних до будь-якої системи блокчейну: структурні групи та групи інтересів. Структурні групи виконують основні функції системи блокчейн, і всі агенти знають про існування цих

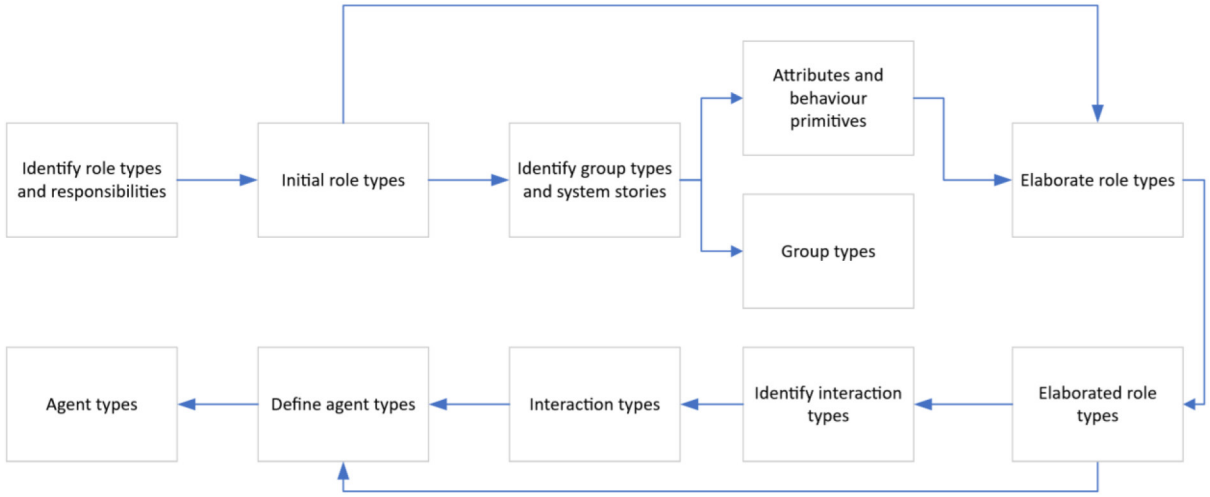


Рис. 2. Запропонована методологія для визначення загальної організаційної моделі

груп. Виділено два типи структурних груп: управління транзакціями та управління блоками. Групи інтересів складаються з агентів, які підвищують якість однієї або кількох властивостей блокчейна, таких як масштабованість, пропускна спроможність, безпека або відмінність винагороди. Таким чином, групи інтересів не є структурними (неосновними) для загального блокчейну, і про їх існування не обов'язково знають усі учасники.

Залежно від обраної системи блокчейну, членством у різних групах можна керувати двома основними способами:

1. Явні групи, де агенти повинні задовольняти деяким чітко визначеним критеріям для входу;
2. Неявні групи, куди агенти можуть входити без жодної перевірки.

Явні групи можуть бути двох форм: або вони мають агента, який виконує роль менеджера групи, який відповідає за перевірку відповідності агентів специфікації структури та ролей групи та авторизує або забороняє входити їм у групу [2], або специфікація структури та ролей групи незмінно визначена в блокчейні (тобто безпечно надається всім), і агенти можуть зробити висновок, чи можуть вони входити до групи. чи ні. Специфікації неявних груп явно не визначені, і, отже, агенти формують такі групи емерджентним способом. Іншими словами, специфікації цих груп неявно реалізуються всередині кожного агента, і, отже, будь-хто з них може приєднатися чи піти за особистим рішенням.

Агенти знають про явні групи. Це означає, що агенти знають про інших членів цих груп і, отже, можуть безпосередньо співпрацювати один з одним. Це також означає, що існують чіткі специфікації щодо того, як поводитися, приєднуватися та/або залишати ці групи. Однак це не стосується неявних груп. У цих групах агенти не обов'язково знають про інших учасників і, отже, за замовчуванням можуть лише опосередковано співпрацювати один з одним.

Взаємодії. Взаємодії – це засоби, за допомогою яких різні ролі обмінюються інформацією або ресурсами [2, 5]. Спосіб взаємодії ролей у системі (тобто спосіб реалізації взаємодії) може мати значні наслідки для їх поведінки. Нижче визначено можливі типи взаємодії, які можна знайти в системах блокчейну з точки зору обміну повідомленнями, коли актор/об'єкт-відправник надсилає повідомлення актору/об'єкту-одержувачу і покладається на цього актора та його допоміжну інфраструктуру для вибору та запуску деякої відповідної поведінки:

– Синхронний обмін повідомленнями відбувається між ролями, які спілкуються через ту саму мережу блокчейн (рис. 3, *a*). Повідомлення доставляються одержувачу, а процес відправника блокується до завершення процесу одержувача;

– Асинхронна передача повідомлень відбувається між ролями, які спілкуються через ту саму мережу блокчейн (рис. 3, *b*). Повідомлення надсилається до черги, де воно зберігається до запиту ролі отримувача, а потім обробляється. При цьому процес відправника не заблокований;

– Захищений від втручання обмін повідомленнями базується на схемі зв'язку на дошці, використовуючи реплікований блокчейн як постійний носій (рис. 3, *c*). Це різновид асинхронного обміну повідомленнями, у якому відправник публікує своє повідомлення в захищеному від втручання реплікованому блокчейні.

Загальні протоколи взаємодії можуть бути реалізовані в конкретній системі блокчейн за допомогою форматів взаємодії, наведених у цьому розділі. Різні конкретні реалізації можуть використовувати різні типи взаємодії залежно від того, який агент яку роль відіграє.

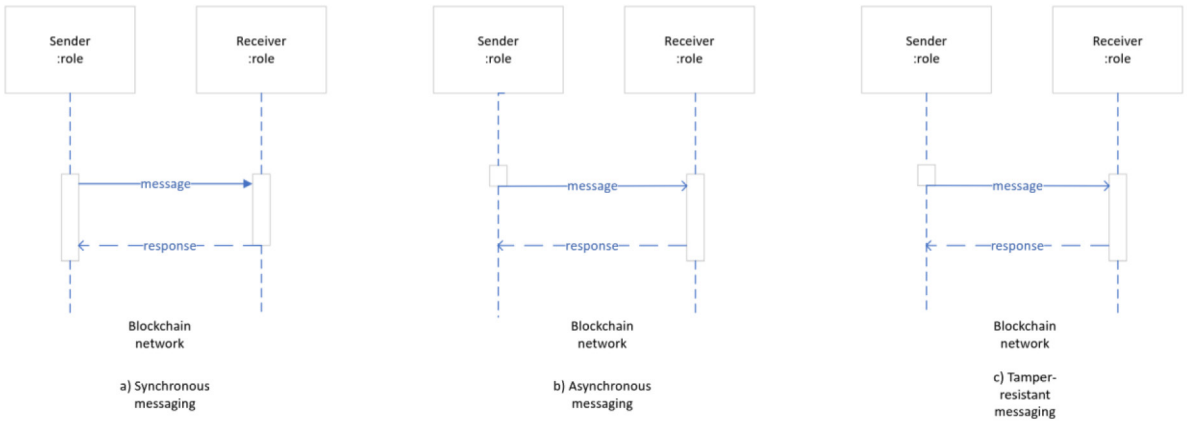


Рис. 3. Типи взаємодії для систем блокчейн: *a* – синхронна передача повідомлень, *b* – асинхронна передача повідомлень, *c* – передача повідомлень із захистом від втручання

Рис. 4. Агенти для систем блокчейн та моделі їх взаємодії

Типи агентів. Поведінковий потенціал агентів дуже великий [12–14], а функціональність може бути налаштована згідно конкретних потреб. Для обраної предметної області було визначено такі типи агентів, які можуть існувати в системах блокчейн: вузол (Node) і смарт-контракт (Smart Contract) (рис. 4).

Агенти типу вузол – це однорангові пристрої в мережі блокчейн, які розгортаються на комп'ютері як окреме програмне забезпечення. Вони можуть спілкуватися з агентами вузлів за допомогою синхронного, асинхронного та/або захищеного від втручання обміну повідомленнями. Однак вони можуть спілкуватися з агентами розумних контрактів лише за допомогою синхронного або захищеного від несанкціонованого обміну повідомленнями (рис. 4). Агенти вузлів беруть на себе відповідальність за технічне обслуговування, безпеку та динаміку системи блокчейну через основні загальні ролі: Ініціатор транзакції, Підтримувач транзакції, Ініціатор блоку, Підтримувач блоку, Підтримувач блокчейну, Одержувач інвестицій, Інвестор та Оракул. Вони забезпечують працездатність системи та активно сприяють виконанню її основних функцій [15–17].

Агенти типу смарт-контракт – це незмінні програми, які розгортаються в структурі даних блокчейну. Агенти розумних контрактів не знають свого оточення та не можуть безпосередньо спостерігати за ним. Їхня схема зв'язку є більш обмеженою, оскільки вони можуть спілкуватися з іншими агентами лише реактивно за допомогою синхронних або захищених від втручання повідомлень. Вони можуть мати лише реактивну поведінку, яка викликана іншими агентами. Агенти типу смарт-контракт виконують лише ролі Підрядника, Керівника групи та Об'єкта інвестицій. Завдяки ролі підрядника вони можуть додавати функціональні можливості до системи блокчейн.

Висновки. Розглянутий організаційно-орієнтовний підхід до моделювання технології блокчейн добре показав себе у завданні представлення технології блокчейн. Агенти мультиагентних систем мають достатню гнучкість для того щоб відображати дві різні абстракції технології – вузли та смарт-контракти. Взаємодія між групами, заснована на ролях, добре відтворює проблематику предметної області, що моделюється, засобами мультиагентної системи. Зокрема, якісно змодельована асинхронна та синхронна комунікація підтвердила важливість використання техніки «Агент/Група/Роль». Ці концепції були узагальнені для вищезгаданого способу моделювання блокчейну, а отже мають стати достатнім необхідним підґрунтям для подальших досліджень із покращення точності моделі. Окреслена систематизація знань також має потенціал позитивно вплинути на коректність рішень із застосування технології блокчейн у релевантних галузях.

Відкритим залишається питання атак на такі моделі. Вдала емуляція таких дій мала б дедалі підтвердити універсальність та остаточно виправдати доцільність вибору організаційно-орієнтованого підходу до моделювання блокчейну. Також, для подальшого наближення моделі до об'єкту моделювання, залишається необхідним передбачити механізми саморегуляції моделі засобами метаагентів.

Список літератури:

1. Alharby M., van Moorsel A. BlockSim: An Extensible Simulation Tool for Blockchain Systems. *Frontiers in Blockchain*. 2020. Vol. 3. DOI: https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.00028

2. Decentralized Autonomous Organizations: Concept, Model, and Applications / S. Wang et al. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. 2019. Vol. 6, no. 5. P. 870–878. DOI: https://doi.org/10.1109/tcss.2019.2938190

3. Rocha H., Ducasse S. Preliminary steps towards modeling blockchain oriented software. *ICSE '18: 40th International Conference on Software Engineering*, Gothenburg Sweden. New York, NY, USA, 2018. DOI: https://doi.org/10.1145/3194113.3194123

4. Santana C., Albareda L. Blockchain and the emergence of Decentralized Autonomous Organizations (DAOs): An integrative model and research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*. 2022. Vol. 182. P. 121806. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121806

5. Rikken O., Janssen M., Kwee Z. Governance impacts of blockchain-based decentralized autonomous organizations: an empirical analysis. *Policy Design and Practice*. 2023. P. 1–23. DOI: https://doi.org/10.1080/25741292.2023.2270220

6. Abbas H.A. Realizing the NOSHAPE MAS Organizational Model. *International Journal of Agent Technologies and Systems*. 2015. Vol. 7, no. 2. P. 75–104. DOI: https://doi.org/10.4018/ijats.2015040103

7. From Agents to Blockchain: Stairway to Integration / G. Ciatto et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 21. P. 7460. DOI: https://doi.org/10.3390/app10217460

8. Liebau D., Oh S. Decentralized Autonomous Organizations. WORLD SCIENTIFIC, 2024. DOI: https://doi.org/10.1142/13918

9. Augustin N., Eckhardt A., de Jong A.W. Understanding decentralized autonomous organizations from the inside. *Electronic Markets*. 2023. Vol. 33, no. 1. DOI: https://doi.org/10.1007/s12525-023-00659-y

10. Hübner J.F., Sichman J.S., Boissier O. MOISE+. *The first international joint conference*, Bologna, Italy, 15–19 July 2002. New York, New York, USA, 2002. DOI: https://doi.org/10.1145/544741.544858

11. Hassan S., De Filippi P. Decentralized Autonomous Organization. Internet. *Policy Review*. 2021. Vol. 10, no. 2. DOI: https://doi.org/10.14763/2021.2.1556

12. Kerckhoven S. v. Decentralized Autonomous Organizations: Innovation and Vulnerability in the Digital Economy. Routledge, 2024.

13. Rodriguez S., Thangarajah J., Winikoff M. User and System Stories: An Agile Approach for Managing Requirements in AOSE. *AAMAS '21: Proceedings of the 20th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*. 2021. P. 1064–1072. DOI: https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/3463952.3464076

14. Ferber J., Gutknecht O., Michel F. From Agents to Organizations: An Organizational View of Multi-agent Systems. *Agent-Oriented Software Engineering IV*. 2004. P. 214–230. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-24620-6_15

15. Niazi M., Hussain A. Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey. *Scientometrics*. 2011. Vol. 89, no. 2. P. 479–499. DOI: https://doi.org/10.1007/s11192-011-0468-9

16. INGENIAS-SCRUM Development Process for Multi-Agent Development / G.-M. I et al. *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence 2008 (DCAI 2008)*. 2009. P. 1–12. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85863-8_14

17. Metamodels for role-driven agent-based modelling / R. Fuentes-Fernández et al. *Computational and Mathematical Organization Theory*. 2012. Vol. 18, no. 1. P. 91–112. DOI: https://doi.org/10.1007/s10588-012-9110-5

Yeshchenko M.S. ORGANIZATION-ORIENTED MODELING FOR BLOCKCHAIN SYSTEMS

Blockchain systems are still relatively new social systems, and their organizational modeling covered in the article provides relevant means to represent them more accurately for the sake of increasing their understanding and adoption in applicable areas. Multi-agent systems based on an organization-oriented approach provide a flexible toolkit that enables a full display of blockchain abstractions. Organization-oriented modeling abstracts the internal details of the implementation of agents and, accordingly, allows to focus on the structural, organizational and social dimensions of blockchain systems – on what connects the structure of the organization with the behaviors of agents that are externally monitored by users.

Representing blockchain systems using an organization abstraction allows agents to collaborate with each other by defining common collaboration patterns such as responsibilities, groups, protocol, and global tasks. In addition, norms can be used to constrain the behavior of independent agents in relation to the organization's global goal.

Particular attention is paid to the analysis of an approach called Agent/Group/Role (AGR), which describes what a multi-agent system organization is at a high level of abstraction and is therefore very flexible and open to different interaction schemes and organizational designs.

This article is designated to investigate in detail the organization-oriented method of modeling blockchain technology and record its advantages, as well as define further possible improvements to increase the accuracy of the model. It provides an in-depth analysis of abstractions mappings between blockchain and multi-agent systems. Mainly, nodes are represented with agents and transactions are represented with messages.

The considered organization-oriented approach to the modeling of blockchain technology proved itself well in the task of presenting blockchain technology. Agents of multi-agent systems have sufficient flexibility to represent the two different blockchain technology abstractions – nodes and smart contracts. Role-based interactions between groups represent well the problems of the subject area being modeled by a multi-agent system.

Further research for enhancing modeling accuracy even more should potentially include consideration of the system self-regulation with the help of special regulatory meta-agents which would ensure the system safety against multiple attack vectors while keeping other agents in check and the whole system healthy.

Key words: *blockchain, multi-agent systems, modeling, messages exchange, smart contracts.*

УДК 621.396.4
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/13

Кисельов В. Б.
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

Морщ Є. В.
Державний науково-дослідний інститут
технологій кібербезпеки та захисту інформації

Чумаченко С. М.
Державний науково-дослідний інститут авіації
Міністерства оборони України

Гуйда О. Г.
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

Ромащенко Р. А.
компанія Рінвік

МОДЕЛЬ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ В СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТУКТУРИ

У статті розглянуто актуальні питання розробки моделей попередження надзвичайних ситуацій (НС) в рамках функціонування системи підтримки прийняття рішень (СППР) на об'єктах критичної інфраструктури (ОКІ) в умовах зростаючих загроз техногенного, природного та воєнного походження. На основі положень чинного законодавства України, обґрунтовано необхідність впровадження ефективних механізмів оцінки ризиків та прийняття управлінських рішень для запобігання НС, особливо в умовах ведення бойових дій.

Автори аналізують вітчизняний та міжнародний досвід щодо організації систем захисту критичної інфраструктури, зокрема в США та ЄС, де впроваджено системні підходи до зменшення вразливості національних інфраструктур до терористичних, техногенних і природних загроз. Розглянуто специфіку ідентифікації ризиків для ОКІ, де враховуються сценарії розвитку подій, імовірності їх виникнення та масштаби потенційних наслідків.

Запропонована СППР базується на застосуванні методів аналізу ієрархій та аналітичних мереж, які дозволяють ураховувати багатоаспектність загроз, а також невизначеність і неповноту вихідної інформації. У статті наведено принципову схему функціонування СППР, а також детально описано алгоритм її роботи. Окрема увага приділена розмежуванню понять «загроза» та «ризик», які розглядаються як основа для формалізованої моделі аналізу.

Також проаналізовано типові причини виникнення НС – технічні, людський фактор та бойові дії – із наголосом на необхідність всебічного підходу до оцінювання. Запропоновано використання концепції «джерело – шлях – наслідки» для побудови якісної та кількісної моделі загроз. Представлена модель дозволяє здійснювати ранжування загроз за ступенем їх критичності, сприяє підвищенню обґрунтованості управлінських рішень та є дієвим інструментом забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури України.

Ключові слова: *критична інфраструктура, надзвичайна ситуація, загроза, ризик, система підтримки прийняття рішень, аналіз ієрархій, воєнно-техногенні загрози, оцінка ризику.*

Постановка завдання. Відповідно до Указу Президента України від 16 січня № 8/2017 Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 29 грудня 2016 року «Про удосконалення заходів забезпечення захисту об'єктів критичної інфраструктури» [1] та Указу Президента України від 16 лютого 2017 року № 37/2017 Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від від 16 лютого 2017 року «Про невідкладні заходи з нейтралізації загроз енергетичній безпеці України та посилення захисту критичної інфраструктури» [2] питання що стосуються

захисту об'єктів енергетичної інфраструктури в Україні є пріоритетними в державі.

Визначення основних питань щодо безпеки і організації захисту критичної інфраструктури наведені в Законі України «Про критичну інфраструктуру» [3]. Ефективна реалізація державної політики у сфері захисту населення і територій від техногенних та природних надзвичайних ситуацій, їх попередження, зниження можливих людських жертв та майнових втрат в зоні проведення ООС вимагає визначення раціональних пропорцій при виділенні матеріальних і фінансових ресурсів на попередження надзвичайних ситуацій та зниження ризиків їх виникнення. Очевидно, що розмір ресурсів, які виділяються для цієї мети, повинен відповідати рівням техногенної та природної небезпеки для ЗС України і життєдіяльності населення на відповідних територіях.

Рівні небезпеки для окремих територій України можна характеризувати інтегральними показниками як узагальненими критеріями комплексів воєнно-техногенних загроз, що можуть реалізуватися при певних умовах і спричинити надзвичайні ситуації воєнно-техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури (ОКІ).

На сьогоднішній день, порушення в роботі критичних об'єктів енергопостачання призвели до надзвичайних ситуацій (НС), що за своїми наслідками впливають на рівень безпеки життєдіяльності населення, економіки та обороноздатності держави [4, 5]. Тому, розробка системи підтримки прийняття рішень в умовах постійних ракетно-дронових ударів по об'єктах енергетичної інфраструктури держави є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досвід досліджень з питань оцінки й управління воєнно-техногенними загрозами та ризиками в ЗС провідних країнах світу [6–9] свідчить про те, що їх організація стикається з рядом нових проблем. Для ЗС України ці проблеми пов'язані з постійно діючими техногенними чинниками військової та промислової діяльності, що можуть призвести на ОКІ, що знаходяться на територіях ведення БД, до НС воєнно-техногенного походження.

Згідно із Законом США «Про патріотизм» (USA Patriot Act), ухваленим Конгресом 26 жовтня 2001 року, критична інфраструктура визначається як сукупність фізичних або віртуальних систем і ресурсів, які мають таке значення для функціонування Сполучених Штатів, що їх виведення з ладу або знищення може мати серйозні наслідки для національної оборони, економіки, систем охорони здоров'я та загальної безпеки держави. [4].

Кульмінацією законотворчої діяльності Конгресу США в сфері внутрішньої безпеки стало ухвалення 25 листопада 2002 року важливого нормативного акта – «Закону про внутрішню безпеку» (Homeland Security Act). В межах реалізації положень цього закону було створено спеціальний комітет Палати представників (House Homeland Security Committee), який здійснює постійний контроль за його виконанням. Відповідно до закону, для протидії загрозам міжнародного тероризму та з метою гарантування безпеки громадян було засновано Міністерство внутрішньої безпеки США (Department of Homeland Security, DHS). До основних завдань новоствореного відомства віднесено: запобігання терористичним актам, зменшення вразливості критичної інфраструктури, реагування на наслідки терористичних атак, а також координацію дій інших органів влади щодо ліквідації наслідків техногенних, антропогенних і природних катастроф на території країни [10].

В ЄС загальноєвропейський підхід до захисту критичної інфраструктури задекларовано в Директиві Європейської Комісії № 786 2006 р. До загальноєвропейської критичної інфраструктури відносять ті елементи національних критичних інфраструктур країн-членів ЄС, відмова, інцидент або атака на які може мати значний вплив як на країну, в який ця подія відбудеться, так і хоча б на одну іншу країну-члена ЄС. Згадана директива започаткувала Європейську програму з захисту критичної інфраструктури, яка розроблена з метою підвищення рівня захищеності критичної інфраструктури шляхом створення спільного підходу до її захисту в країнах-членах ЄС і гармонізації національних законодавств в даній сфері. Слід відзначити, що провідні країни світу здійснюють захист своїх національних інтересів, не обмежуючись національними кордонами. Окрім національних критичних інфраструктур, розглядаються зарубіжні об'єкти, безпека яких має важливе значення для тієї чи іншої держави [4].

Об'єднання економік держав ЄС, їх взаємозалежність, але і необхідність протистояти сумісним або подібним загрозам, відбилися в ухваленні документа Critical Inrastructure protection in the fight against terrorism. У цьому документі критична інфраструктура визначена як фізичні засоби виробництва, інформаційні технології, мережі (транспортні, енергетичні і т. п.), служби і інші активи, розлад або руйнування яких мав би серйозні наслідки на здоров'я, охорону, надійність або життєвий рівень громадян або на штатне функціонування урядів в цих державах [11].

Постановка завдання. Метою публікації є розробка інформаційно-аналітичної системи для підтримки прийняття рішень щодо попередження надзвичайних ситуацій із застосуванням методів аналізу ієрархій і аналітичних мереж.

Виклад основного матеріалу. Під час кількісного оцінювання ризику виникнення техногенних аварій або надзвичайних ситуацій, що можуть спричинити людські жертви й завдати шкоди довкіллю, прогнозні експертні висновки відображають суб'єктивне бачення фахівців щодо можливого розвитку подій. Методи експертного аналізу базуються на використанні професійного досвіду та інтуїції експертів. Вони спираються на формальні підходи до прийняття рішень в умовах невизначеності.

У ситуаціях природного, техногенного або соціального характеру ключову роль у процесі прийняття рішень відіграє особа, відповідальна за вибір – так звана особа, яка приймає рішення (ОПР). Це може бути як окрема людина (індивідуальна ОПР), так і колектив осіб, що спільно ухвалюють рішення (групова ОПР). Варто зазначити, що індивідуальною ОПР не обов'язково є одна фізична особа – нею може виступати й група, яка представляє спільні інтереси, або юридична особа. У випадку групової ОПР, рішення можуть ухвалювати кілька груп, кожна з яких має власні погляди та пріоритети.

ОПР зазвичай є керівником або уповноваженим органом, який визначає проблему, обирає спосіб її розв'язання та несе відповідальність за прийняте рішення. Для пошуку оптимального варіанту ОПР залучає експертів і консультантів, які мають глибокі знання в конкретних галузях, зокрема в питаннях технологій та організації процесу прийняття й реалізації рішень.

Експерти й консультанти відповідають за обґрунтованість рекомендацій, які вони готують для ОПР, проте вони не підміняють ОПР у виборі рішення. Остаточне рішення завжди обирає ОПР відповідно до власної системи переваг (пріоритетів).

Алгоритмізація моделей оцінки воєнно-техногенних загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури повинна ґрунтуватися на універсальних та специфічних методах, що дозволяють проводити оцінювання, виходячи із умов виникнення надзвичайних ситуацій.

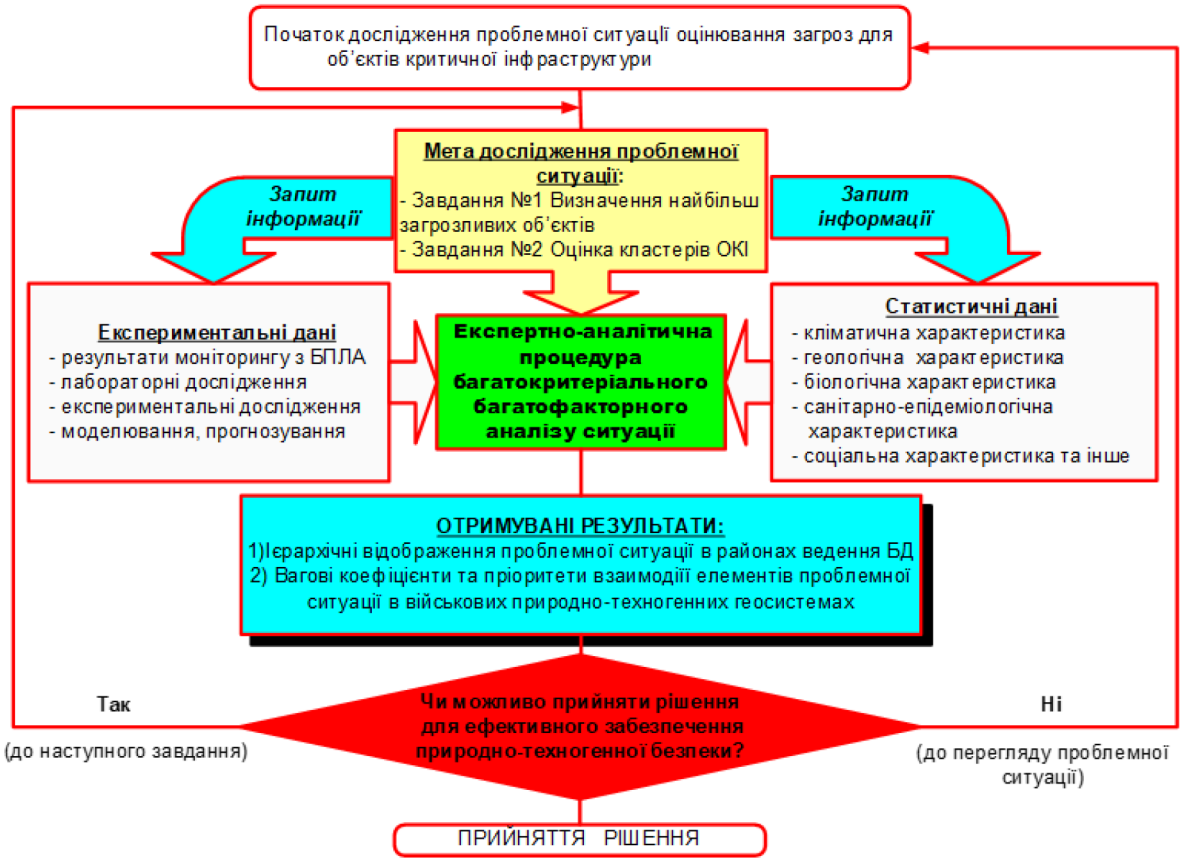


Рис. 1. Принципова схема роботи системи підтримки прийняття рішень (СППР)

Для оцінки загрози виникнення НС можуть бути застосовані універсальні підходи (здебільшого експертно орієнтовані), то для оцінки ризику доцільно використовувати більш специфічні підходи, оскільки поняття ризику містить в собі ймовірнісну складову.

Причини виникнення надзвичайних ситуацій на ОКІ можна умовно поділити на три основні групи:

технічні причини, зумовлені недоліками у технологічних схемах, або дефекти обладнання, конструкторськими недоробками;

причини пов'язані з «людським фактором»;

причини пов'язані з веденням БД.

Аналіз багатьох аварій показує, що значна їх частина зумовлена неправильною поведінкою операторів та іншого обслуговуючого персоналу. У зв'язку з цим сьогодні поряд із розв'язанням задач щодо підвищення надійності обладнання, його якості та своєчасного технічного обслуговування все більша увага приділяється особливостям поведінки служб безпеки, навчання персоналу та працюючих на складних технічних системах та дій у надзвичайних ситуаціях, що виникають на виробництві.

Розглянемо визначення загрози, що висвітлює кількісні аспекти і може бути застосовано до будь-якого виду оцінюваної загрози. Для цього спочатку обговоримо якісні оцінки ідеї загрози, а потім перейдемо до кількісних показників.

Загроза – це фізична ситуація з потенційними пошкодженнями для об'єкту критичної інфраструктури (ОКІ), людини, пошкодження майна, власності, навколишнього середовища та їх комбінаціями. Тоді ризик – це сукупність специфічних небажаних подій, що мають місце в певний період часу, або за певних обставин, і виникають через реалізацію певних загроз.

Перший якісний аспект, який ми розглянемо, це відмінність між ідеями ризику та загрози. Якщо пошукати ці слова в різних словниках, то можна знайти значне співпадіння в значенні, та різницю в акцентах. Загроза зазвичай визначається як джерело шкоди або збитку, в той час як визначення ризику звичайно включає ідею ймовірності того, що шкода або збиток дійсно будуть нанесені:

$$\text{Ризик} = \text{Загроза/Заходи запобігання},$$
$$\text{або } R = Z/S. \qquad (1)$$

Формула (1) – символічна, а не чисельна рівність, у тому розумінні, що ні R, ні Z, ні S не є числами. Не можна поділити два з них, щоб отримати третє. Зміст цього співвідношення в тому, що для вказаного Z, чим більше S, тим менший ризик R.

Кількісна оцінка загрози є важливою складовою частиною в проблемі запобігання виникненню надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури в районах ведення БД.

Кількісний аналіз загрози, тобто числове визначення ступеню окремих загроз, або загрози окремого виду ОКІ, є складною проблемою.

Математично загрозу можна подати як множину дуплетів [13]

$$Z = \{\langle s_j, p_j \rangle\} s, \qquad (2)$$

де s_j – j-й сценарій поведінки джерела загрози; p_j – j-а ймовірність виникнення сценарію для джерела загрози.

Тобто у відповідності з формулою (2) загроза – це ризик, але без врахування ймовірності сценарію. Це дещо спрощене розуміння загрози але воно відповідає словесному його визначенню, а також практиці.

Отже, поняття загрози у випадку виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури пов'язане із сценарієм. Така парадигма загрози полягає у переході від джерела загрози до наслідків її реалізації.

Загроза у випадку виникнення надзвичайної ситуації на ОКІ може бути кількох типів:

загроза для людського здоров'я на довгому чи короткому проміжку часу;

загроза для флори і фауни, включаючи поняття харчових ланцюгів;

загроза в екосистемі в цілому, враховуючи розмаїття;

загроза для майна (активів), навіть за умови, що реалізація не обов'язково запланована;

загроза для використання земель;

загроза від недотримання певних норм та можливості несплати законодавчих штрафів;

загроза іміджу підприємства та/або державі загалом;

загроза ґрунтовим водам та іншим ресурсам, таким як рекреаційні.

Часто ці загрози можуть бути одночасними і поєднаними, та багато з них можуть перекриватися. З даного переліку типів загроз видно, що діапазон будь-якого набору методів аналізу загроз повинен бути набагато ширшим, аби цей аналіз був ефективним.

Систематичне та кількісне застосування методології «джерело – шлях – наслідки» дає змогу перенести проблему оточуючого середовища на джерелі до характеристики об'єкта критичної інфраструктури.

Задача оцінки та ранжування загроз в умовах невизначеності розв'язується методами систем-

ного аналізу з використанням багатокритеріальної оцінки загроз [13, 14, 15].

Для оцінки загрози необхідно здійснити наступні кроки:

навести всі можливі комбінації «джерело – шлях – наслідки», включаючи протиріччя;

створити набір даних для об'єкта критичної інфраструктури, що базуються на доступній інформації, здоровому глузді;

використати набір даних та відповідну модель аналізу загрози, щоб оцінити вплив джерела на наслідок. На цьому етапі багато чи більшість потенційних сценаріїв «джерело – шлях – наслідки» буде відкинуто, залишаючи лише реалістичні комбінації;

провести аналіз чутливості на залишених зв'язках, щоб визначити ті, де оцінка чутлива до параметрів, які мало відомі;

провести аналіз вигідності (зменшення вартості) між наслідками від не знання певних параметрів, для більш високого рівня впевненості та між вартістю переоцінки параметрів;

визначити «потребу знати» параметри та повторювати кроки до цього пункту, доки до бази даних не має високої довіри;

оцінити вихідні характеристики розповсюдження, які тільки зменшать вплив джерела нижче максимально допустимого;

розробити та побудувати схему оновлення, що досягне такої характеристики розповсюдження;

оцінити чуттєвість впливу джерела до помилок та відмов у проекті і/або реалізації схеми управління;

якщо існує значна можливість недопустимої відмови, продовжувати виконувати аналіз при зменшенні цієї можливості.

Для ефективної оцінки та ранжування загроз доцільно формувати критерії не лише як «критеріальні функції» у вузькому сенсі, а в ширшому – як засоби оцінювання та порівняння загроз. У більшості випадків використання лише одного критерію для досягнення мети оцінювання є радше винятком, ніж правилом. Окремий критерій, як і будь-яка модель, може лише приблизно відображати ціль оцінки, і його адекватність часто виявляється недостатньою. Підвищення достовірності оцінювання загроз полягає не стільки в пошуку одного «ідеального» критерію (який може взагалі не існувати), скільки у використанні сукупності критеріїв, які з різних боків відображають ціль оцінки та взаємно доповнюють одне одного.

Об'єктивність процесу оцінювання та ранжування загроз значною мірою визначається здатністю обраної системи критеріїв охопити всі ключові ознаки загроз. Це означає, що критерії повинні відображати всі суттєві аспекти цілі оцінювання. Водночас важливо прагнути до мінімізації кількості таких критеріїв. Ця вимога може бути реалізована за умови, що критерії є незалежними, тобто не дублюють однакові показники або взаємопов'язані величини (наприклад, не слід включати до різних критеріїв одні й ті самі або похідні від них вимірювані характеристики).

Огляд сучасних підходів до системного аналізу складних природно-техногенних систем та аналіз математичного апарату, що застосовується при цьому, дозволяють зробити висновок: аналіз і оцінка загроз повинні бути багатофакторними, а порівняльний аналіз сукупності їх джерел доцільно проводити з урахуванням ряду показників, що є визначальними при формуванні цільових функцій для відповідних критеріїв.

На рис. 2 показано алгоритм оцінки ризику виникнення надзвичайної ситуації на окремо взятому ОКІ в районі ведення БД з використанням ГІС технологій.

Коли ризик переростає в загрозу виникнення надзвичайної ситуації, для оцінювання рівня загрози може бути використаний більш універсальний підхід із яких насьогодні найбільш поширеними і системно довершеними є методи аналізу ієрархій і аналітичних мереж (ANP-process).

На рис. 2 представлено блок-схему алгоритму оцінювання загроз на об'єкті критичної інфраструктури з використанням ГІС-технологій. У рамках розробки було враховано європейські підходи до аналізу загроз та ризиків виникнення надзвичайних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах критичної інфраструктури. Запропоновано використання адитивної згортки зважених критеріїв, яка базується на методах підтримки прийняття рішень, зокрема методі аналізу ієрархій (AHP) та методі аналітичних мереж (ANP) [16, 17]. В якості критеріїв використано наступні:

1. Критерій оцінки джерела виникнення загроз.
2. Критерій оцінки рівня впливу загрози.
3. Критерій оцінки середовища поширення загрози.
4. Критерій оцінки можливого збитку.

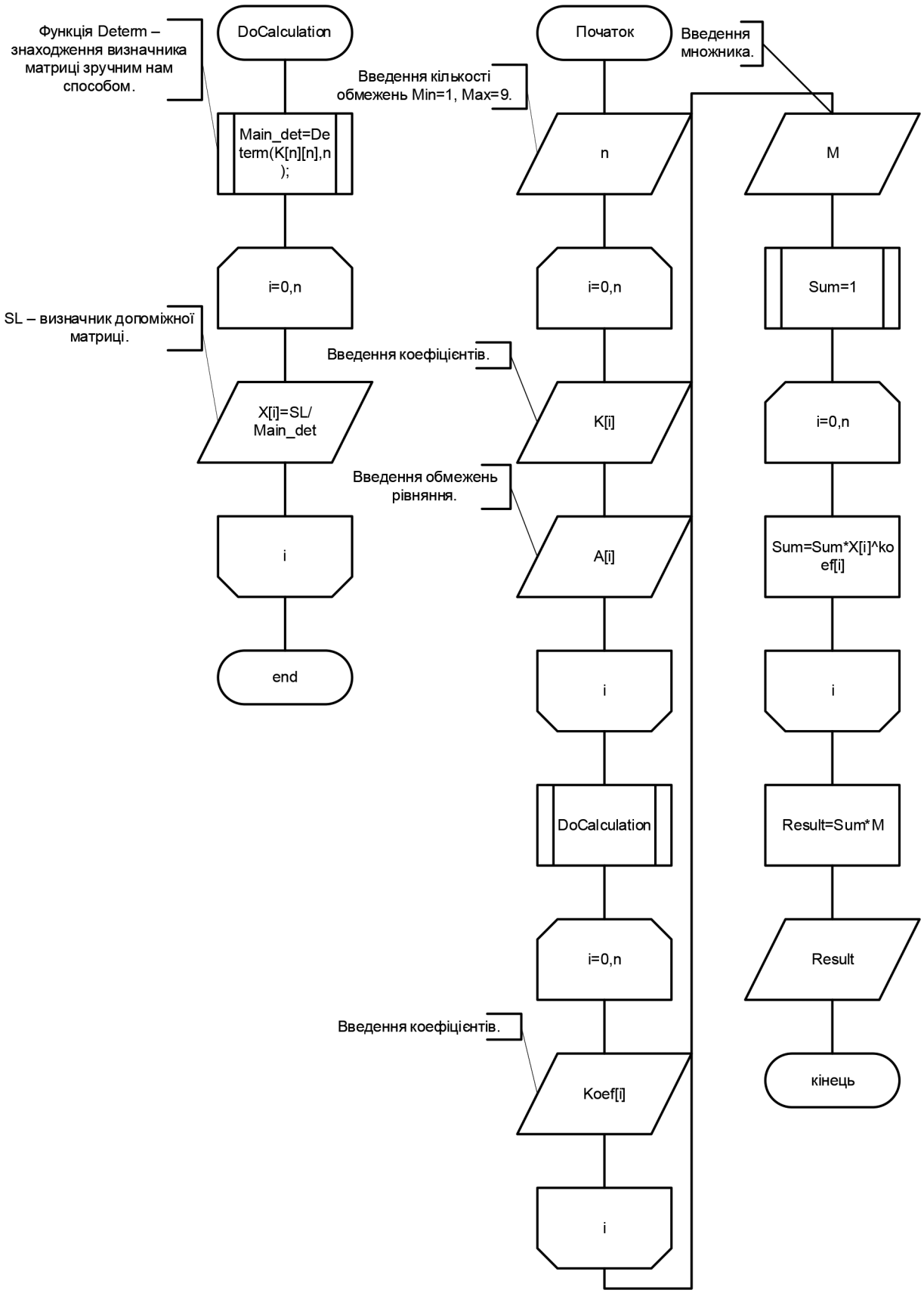


Рис. 2. Алгоритм оцінки ризику виникнення надзвичайної ситуації на окремо взятому ОКІ з використанням ГІС технологій

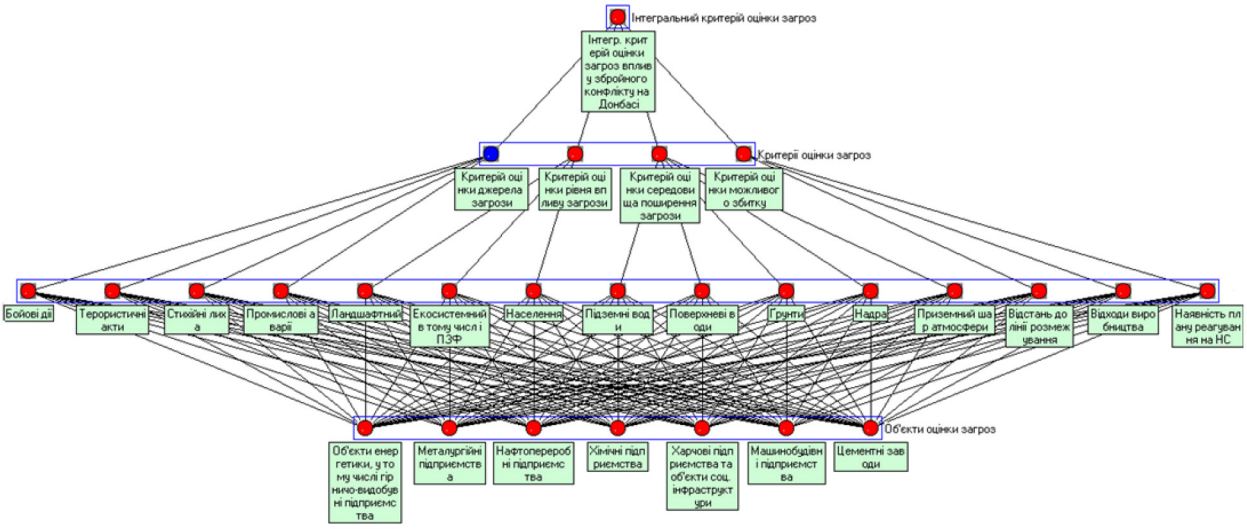


Рис. 3. Інформаційно-аналітична система оцінювання загроз для об'єктів критичної інфраструктури

Для проведення оцінювання загроз виникнення НС було розроблено інформаційно-аналітичну систему та спільно з представниками ГУ ДСНС у Донецькій області проведено експертне оцінювання за наступним ієрархічним деревом критеріїв та факторів оцінювання, що наведене на рис. 3. Для проведення оцінювання загроз методом парних порівнянь використовувалась інтервальна шкала Сааті.

Розроблювальна система націлена в першу чергу на полегшення роботи ОПР (Особи, що приймає рішення). Це може бути одна особа – індивідуальна ОПР або кілька осіб, які виробляють колективне рішення – групова ОПР. А також зменшує кількість роботи, необхідної для виконання аналітиками. А саме, дасть змогу швидко побудувати модель, необхідну для вирішення задачі прийняття рішення, наочно порівняти всі елементи моделі та отримати результати розрахунків.

Розроблювальна система повинна мати наступні функції:

1. Побудова моделі задачі;
2. Порівняння критеріїв та альтернатив;
3. Графічне зображення порівнянь;
4. Проведення розрахунків;
5. Графічне зображення розрахунків;
6. Можливість збереження і відкриття створюваних моделей.

Головною вимогою до інтерфейсу користувача є простота користування та мінімізація зусиль користувача при виконанні роботи.

Вхідні дані: об'єкти дослідження, критерії та альтернативи; файл збереженої моделі.

Вихідні дані: результати розрахунків; файл збереженої моделі.

Для оцінки ступеня екологічної загрози умовно шкалу оцінки від 0 до 3 було поділено на 4 інтервали:

коли рівень інтегрального критерію оцінки екологічних загроз змінюється від 0 до 1 – вважаємо, що рівень загрози малий;

коли рівень інтегрального критерію оцінки екологічних загроз змінюється від 1 до 1,5 – вважаємо, що рівень загрози середній;

коли рівень інтегрального критерію оцінки екологічних загроз змінюється від 1,5 до 2 – вважаємо, що рівень загрози високий;

коли рівень інтегрального критерію оцінки екологічних загроз змінюється від 2 до 3 – вважаємо, що рівень загрози катастрофічний.

Результати отриманих експертних оцінок загроз критичній інфраструктурі в районі ведення БД для Донецької області наведено у вигляді стовпчастих діаграм на рис. 4–6.

Висновки.

1. Сучасні системи підтримки прийняття рішення є системами, які максимально пристосовані до вирішення завдань повсякденної управлінської діяльності, є інструментом, покликаним надати допомогу ОПР. За допомогою СППР може проводитися вибір рішень деяких неструктурованих і слабо структурованих задач, в тому числі і багатокритеріальних.

2. За результатами проведеного експертного оцінювання можна зробити наступні висновки:

до найбільш загрозливих об'єктів відносяться хімічні підприємства індекс екологічної загрози яких складає більше 2,5 умовних одиниць, вторинні наслідки ураження яких призведуть до найбільш небезпечних екологічних

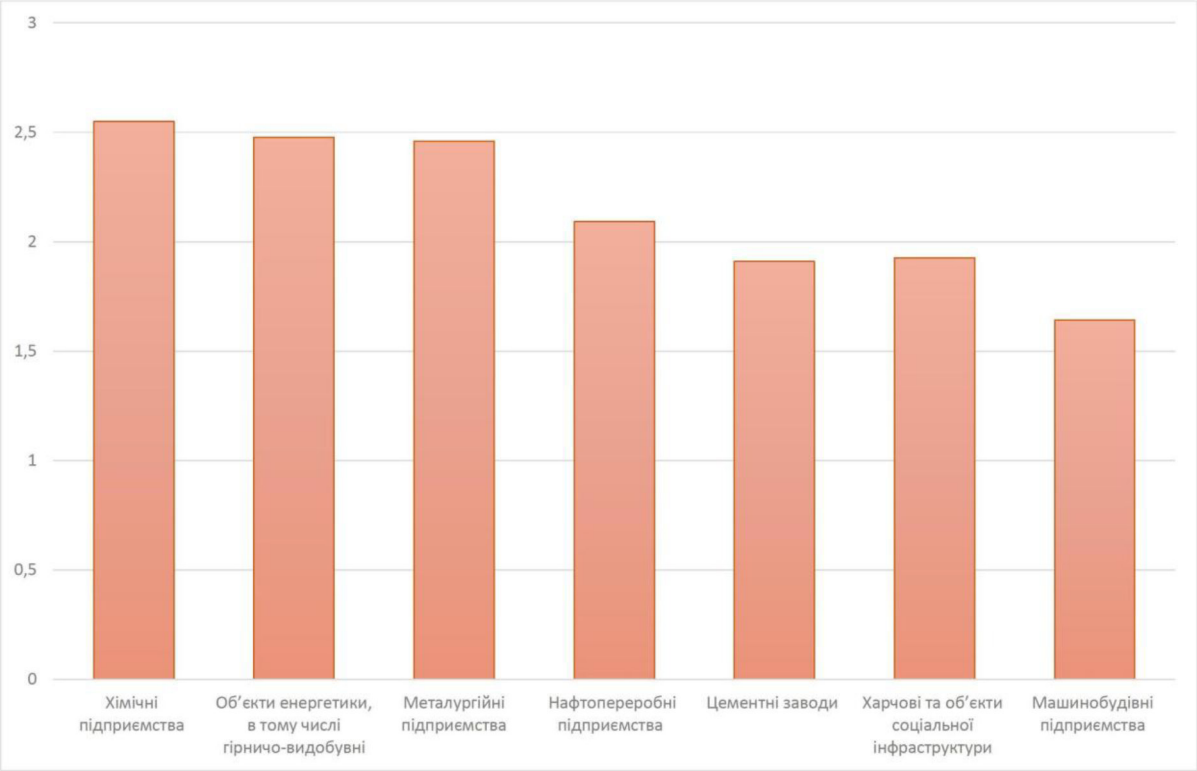


Рис. 4. Результати експертного оцінювання загроз для об'єктів критичної інфраструктури районів ведення бойових дій за інтегральним критерієм оцінки воєнно-техногенних загроз в зоні збройного конфлікту на Донбасі

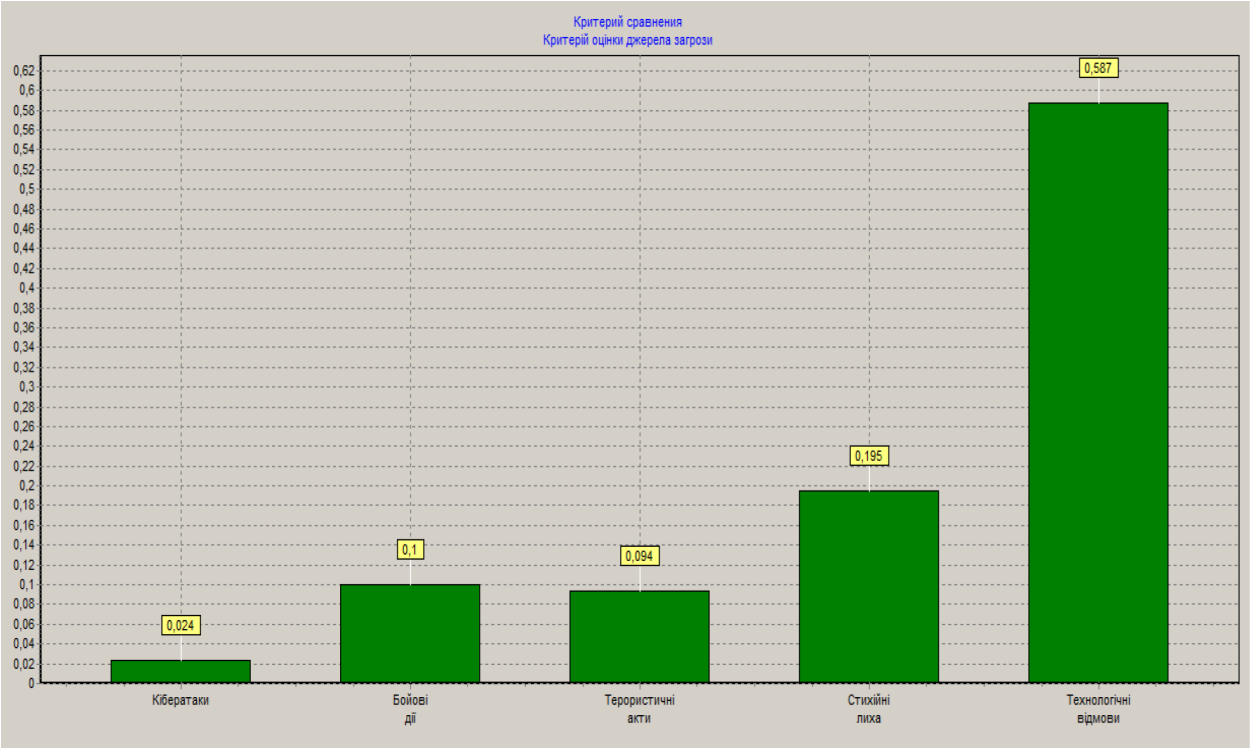


Рис. 5. Критерій оцінювання джерела загроз для об'єктів критичної інфраструктури

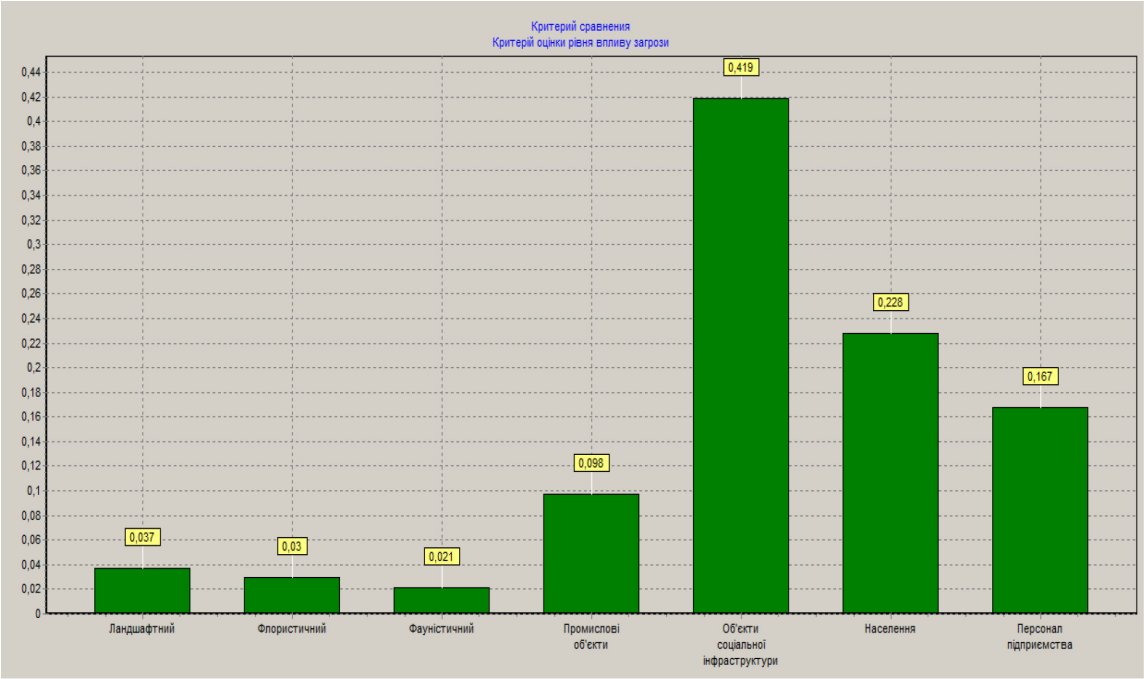


Рис. 6. Критерій оцінювання рівня впливу загрози для об'єктів критичної інфраструктури

наслідків для довкілля в зоні збройного конфлікту;

на другому місці стоять об'єкти енергетики та гірничо-видобувної промисловості індекс екологічної загрози яких складає трохи менше 2,5 умовних одиниць;

на третьому місці стоять металургійні підприємства індекс екологічної загрози яких складає трохи менше 2,5 умовних одиниць;

на четвертому місці стоять нафтопереробні підприємства індекс екологічної загрози яких складає трохи більше 2 умовних одиниць.

3. Ці чотири кластери підприємств відносяться до рівня катастрофічної екологічної загрози, що призведе до виникнення надзвичайної ситуації державного та регіонального значення.

4. На наступному місці стоять 3 кластери підприємств, що відносяться до високого рівня екологічної загрози:

на першому місці ідуть цементні заводи індекс екологічної загрози яких складає трохи менше 2-х умовних одиниць;

на другому місці ідуть харчові підприємства та об'єкти соціальної інфраструктури індекс екологічної загрози яких складає трохи менше 2-х умовних одиниць;

на третьому місці ідуть машинобудівні підприємства індекс екологічної загрози яких складає трохи менше 1,5 умовних одиниць.

5. Ураження цих об'єктів та можливі аварії можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій місцевого та локального рівня.

Список літератури:

1. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 29 грудня 2016 року «Про удосконалення заходів забезпечення захисту об'єктів критичної інфраструктури» : Указ Президента України від 16.01.2017 № 8/2017. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/8/2017#Text (дата звернення: 15.03.2025).

2. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16 лютого 2017 року «Про невідкладні заходи з нейтралізації загроз енергетичній безпеці України та посилення захисту критичної інфраструктури» : Указ Президента України від 16.02.2017 № 37/2017. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/37/2017#Text (дата звернення: 15.03.2025).

3. Про критичну інфраструктуру : Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX : станом на 21 верес. 2024 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text (дата звернення: 15.03.2025).

4. Зелена книга з питань захисту критичної інфраструктури в Україні : зб. матеріалів міжнар. експерт. нарад / упоряд.: Д. С. Бірюков, С. І. Кондратов; за заг. ред. О. М. Суходолі. Київ : НІСД, 2015. 176 с.

5. Попель В. А. Інформаційна технологія підвищення живучості об'сктів критичної енергетичної інфраструктури за фактором управління системою інформаційної безпеки. Дисертація на здобуття ступеню доктора філософії. НУХТ, 2023, 182 с.

6. Суходоля О. М. Державно-приватне партнерство в системі забезпечення безпеки та стійкості критичної інфраструктури. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2019-04/SukhodolyaPresentation.pdf (дата звернення: 15.03.2025).

7. Євсєєв В. О. Можливі шляхи удосконалення захисту критичної інфраструктури України з урахуванням світового досвіду. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2016. № 4(49). С. 168–172.

8. О. І. Лисенко, І. В. Чеканова, О. П. Кутовий, В. А. Нікітін. Стратегії управління ризиками на об'єктах критичної інфраструктури в умовах невизначеності. Науковий вісник УкрНДІПБ. 2015. № 1. С. 134–139. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb_2015_1_18

9. Денісов Н., Аверін Д.; Ющук А., Чумаченко С., Єрмаков В., Улицький О., Бистров П., Зібцев С., Набиванець Ю. Оцінка екологічної шкоди та пріоритети відновлення довкілля на сході України. К. : ВАІТЕ, 2017. 88 с.

10. Чернега В. М. Аналіз критичної інфраструктури та напрямки досліджень систем життєзабезпечення об'єктів України : Аналітична записка. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: file:///C:/Users/Student/Desktop/96-4193-1-10-20161205.pdf

11. Critical infrastructure and key assets: definition and identification // Congressional research service, RL32631. – 2004. – October. – 19 p. 3. Green paper on a European programme for critical infrastructure protection (COM/2005/576 final) URL: http://eur-lex.europa.eu (дата звернення: 15.03.2025).

12. Дурдинець В. В., Саєнко Ю. І., Привалов Ю. О. Соціальні ризики та соціальна безпека в умовах природних і техногенних надзвичайних ситуацій та катастроф. К. : Стилос, 2001. 497 с.

13. Дудкін О. В. Оцінка і напрямки зменшення загроз біорізноманіттю України / О. В. Дудкін, А. В. Єна, С. М. Чумаченко та ін. К. : Хімджест, 2003. 400 с.

14. Чумаченко С. М. Метод оцінки екологічних загроз від заходів бойової підготовки на військовому полігоні. Зб. наук. пр. Вип. 4 (29). К. : ННДЦ ОТ і ВБ України, 2005. – С. 93–103.

15. Морщ Є. В. Процедура попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури в районах ведення бойових дій з використанням кластерних інформаційних портретів. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. – Київ : ДУ «ІГНС НАНУ», 2019. Вип. 3 (17). С. 50–56.

16. Чумаченко С. М., Валуйський С. В., Тесленко О. М., Лисенко О. І. Концепція автоматизованої краудсорсингової системи моніторингу надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури міста. Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія : Техніка. 2014. Вип. 2. С. 157–163. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvamu_teh_2014_2_20. (дата звернення: 15.03.2025).

Kyselov V. B., Morshch Ye. V., Chumachenko S. M., Guida O. H., Romashchenko R. A.

A MODEL FOR EMERGENCY PREVENTION IN THE DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

The article addresses current issues in the development of models for preventing emergencies (EEs) within the framework of Decision Support Systems (DSS) operating at critical infrastructure facilities (CIFs) amid growing threats of technological, natural, and military origin. Based on the provisions of current Ukrainian legislation, the necessity of implementing effective mechanisms for risk assessment and decision-making to prevent emergencies – especially under conditions of armed conflict – is substantiated.

The authors analyze both domestic and international experience regarding the organization of critical infrastructure protection systems, particularly in the USA and the EU, where systemic approaches have been adopted to reduce the vulnerability of national infrastructures to terrorist, technological, and natural threats. The specifics of risk identification for CIFs are considered, taking into account event development scenarios, their likelihood, and the scale of potential consequences.

The proposed DSS is based on the use of analytic hierarchy and network analysis methods, which allow for consideration of the multifaceted nature of threats, as well as the uncertainty and incompleteness of input data. The article presents a conceptual diagram of DSS operation and provides a detailed description of its algorithm. Special attention is given to distinguishing between the concepts of "threat" and "risk," which are viewed as the foundation for a formalized analytical model.

Typical causes of emergencies – technical failures, human factors, and military actions – are analyzed with an emphasis on the need for a comprehensive approach to evaluation. The article proposes the use of the «source–path–consequences» concept to construct both qualitative and quantitative threat models. The presented model enables the ranking of threats by their criticality level, supports more substantiated managerial decisions, and serves as an effective tool for ensuring the security of Ukraine's critical infrastructure facilities.

Key words: *critical infrastructure, emergency situation, threat, risk, decision support system, hierarchy analysis, military-technological threats, risk assessment.*

УДК 630.863
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/14

Ладієва Л. Р.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Корнієнко Б. Я.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сазонов А. Ю.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пелипенко Н. С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ЕТАНОЛУ ГІДРОЛІЗОМ ДЕРЕВИНИ

В статті розглянуто актуальну проблему збільшення попиту на біопаливо, що зумовлене потребою зменшення викидів парникових газів та залежності від викопного палива, використання якого призводить до негативних екологічних наслідків. Застосування процесу гідролізу, зокрема відходів лісової та харчової індустрії, дає змогу ефективно використовувати поновлювані ресурси, котрі раніше вважались малоцінними, та одержувати з них біоетанол, що є повноцінним екологічно чистим замінником традиційних видів палива. Розвиток технологій у цій сфері також сприяє створенню замкнених виробничих циклів і стимулює екологічну модернізацію промислових процесів, що робить дослідження в цій області надзвичайно важливими для сталого розвитку. Процес гідролізу вважається найбільш перспективним способом отримання біоетанолу, оскільки сировиною в цьому процесі можуть слугувати тирса або відходи харчової промисловості, які наразі вважаються відходами. Використання цих ресурсів створює можливість не лише отримувати екологічно чисте паливо, але й реалізує безвідходне виробництво у харчовій промисловості.

Стаття присвячена одному зі способів отримання біоетанолу – методу гідролізу деревини. Цей метод має перевагу над іншими, оскільки він може використовувати поновлювані ресурси та харчові відходи для виробництва якісного пального. Сучасні технології виробництва етанолу гідролізом деревини неможливо уявити без використання автоматизації, що дає змогу отримувати максимально можливу якість та кількість продукту. В статті розроблено систему керування, що підтримує оптимальні параметри процесу. Тема пошуку оптимального керування процесом виробництва етанолу гідролізом деревини є надзвичайно актуальною, оскільки не існує єдиного підходу до моделювання багатокомпонентного процесу гідролізу деревини та не були розв'язані задачі на основі лінійного регулятора. Аналіз попередніх робіт показав, що хоча процес досліджено та є розроблені моделі, однак їх важко застосувати в системах керування. На основі математичної моделі розроблено оптимальну систему керування. Введено інтегральний квадратичний критерій якості та розроблено оптимальний лінійний закон на основі розв'язання рівняння Ріккаті. Розроблено алгоритм оптимального керування процесом гідролізу, який в цілому задовольняє поставлені задачі.

Ключові слова: *оптимальне керування, виробництво етанолу, гідроліз деревини, критерій якості, система керування.*

Постановка проблеми. Оскільки викиди парникових газів постійно зростають, тепер віддають перевагу екологічнішій та стійкішій людській діяльності. Привабливою стратегією у прагненні до сталого розвитку є використання лігноцелюлозної біомаси для виробництва біоетанолу. Цей підхід базується на біоконверсії деревини та сільськогосподарських відходів, яких у всьому світі дуже багато. Вони являють собою значні джерела зброджуваних цукрів, які можна відновити шля-

хом ферментативного гідролізу. Однак наявність лігніну у деревних відходах робить їх більш стійкими до ферментативного гідролізу та знижує ефективність процесу біоконверсії. Тому попередня обробка перед гідролізом є вкрай необхідною, щоб порушити стійку структуру деревної біомаси. Враховуючи це, виробництво біоенергії з цієї біомаси є багатообіцяючим альтернативним методом сталого реагування на потреби в енергії, одночасно зменшуючи кількість відходів, що залишаються в природі.

Метою цього дослідження є порівняння підходів до оптимізації процесів біоконверсії, проведених на деревних субстратах, і розробка підходу до оптимального керування процесу. Тема пошуку оптимального керування процесом виробництва етанолу гідролізом деревини є надзвичайно актуальною, оскільки не існує єдиного підходу до моделювання багатокомпонентного процесу гідролізу деревини та не були розв'язані задачі на основі лінійного регулятора. Більшість досліджень присвячені процесу гідролізу, які проводилися в наш час присвячені аналізу кінетики кислотного гідролізу деревини та моделюванню кінетики реакції гідролізу деревини. Розроблені моделі описують кінетичні закономірності перетворень полісахаридів в моносахариди для певних видів і складу сировини і не враховують можливість відхилення значень в складі сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Лігноцелюлозна біомаса є важливим хімічним ресурсом. У пошуках підвищеного інтересу до керування відходами та успішної утилізації твердих відходів у корисні продукти, є потенційним джерелом лігноцелюлозних матеріалів для виробництва хімікатів та біопалива. Однак його використання використовується недостатньо. У цій роботі виконується множинна лінійна регресія для моделювання впливу експериментальних умов на процес перетворення та визначення умов, які максимізують відсоткове розчинення та загальний вихід глюкози та ксилози. Створені кінетичні моделі процесу [1]. Ферментативний гідроліз є вирішальним кроком у переробці лігноцелюлозної біомаси в біопаливо та інші цінні продуктів на біопереробних заводах.. Розроблені досі моделі, як правило, присвячені опису кінетики реакції без урахування транспортних явищ і прогнозування зменшення потоку. У даній роботі розроблено нову математичну модель, що моделює перебіг процесу гідролізу в мембранному біореакторі [2]. Емпірична кінетична модель реакції реалізована для моделювання впливу робочих параметрів щодо потоку пермеату та концентрації моносахаридів у пермеаті. Сформульована задача оптимального керування процесом ферментативного гідролізу лігноцелюлозної біомаси [3]. Розглянута для критеріїв оптимальності: максимізації концентрації глюкози і скорочення часу процесу. Але не розглянута задача керування процесом. В іншій роботі наведено огляд ключових факторів і засобів керування процесом для максимізації виходу ферментованого цукру з целюлозної біомаси, розкриваючи її потенціал для синтезу біопалива та біопродуктів [4].

Деякі дослідження описують сучасні методи виробництва етанолу за допомогою процесу гідролізу деревини, висвітлюються різні підходи до кислотного та ферментативного гідролізу [5]. Інші дослідження проводять аналіз процесу кінетики кислотного гідролізу деревини [6–8]. Проте слід зауважити, що більшість досліджень зосереджені на моделюванні кінетики реакції гідролізу деревини [9–12], щоправда дані моделювання проводяться для вже визначеного складу сировини та не враховують зміну складу сировини.

Для створення автоматизованих систем керування потрібно виконати розробку та дослідження математичної моделі, яка дозволить досягти цілей керування, розробки алгоритмів керування процесом гідролізу та розв'язку задач оптимізації [13–21].

Аналіз різних публікацій показав, що дослідження процесу гідролізу в основному направлені на техніку експериментальних досліджень процесу гідролізу та його кінетики з використанням відходів харчової промисловості в якості сировини. Для успішного розроблення оптимального керування потрібно розробити власну математичну модель. З створеної моделі і буде виконане оптимальне керування за допомогою лінійного-квадратичного регулятора.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності процесу гідролізу в гідроліз-апараті, а саме отримання оптимального рівня моносахаридів в кінцевому продукті гідролізу – гідролізаті за допомогою оптимального керування з використанням лінійного-квадратичного регулятора. Також розробка і дослідження системи оптимального керування технологічного процесу за допомогою лінійного-квадратичного регулятора.

Виклад основного матеріалу. Основною перевагою саме методу гідролізу у виробництві етанолу – полягає в тому, що за його допомогою відбувається контроль кількісті моносахаридів та полісахаридів в гідролізаті. Правильне співвідно-

шення концентрації моносахаридів та полісахаридів в гідролізаті допомагає отримати чистіший біоетанол в результаті. Реакція гідролізу відбувається при додаванні сульфатної кислоти та є ендотермічною, однак за звичайних умов процес відбувається надзвичайно повільно. Каталізатором даного процесу є температура, яка пришвидшує процес, а для регулювання температури використовується нагріта пара. В якості керуючого впливу використовується нагріта пара. При розробці математичної моделі процесу необхідно врахувати ряд факторів, як: температура та концентрація сульфатної кислоти, температура сировини, об'єм гідроліз апарату.

На рис. 1 наведемо структурно-параметричну схему гідроліз-апарату:

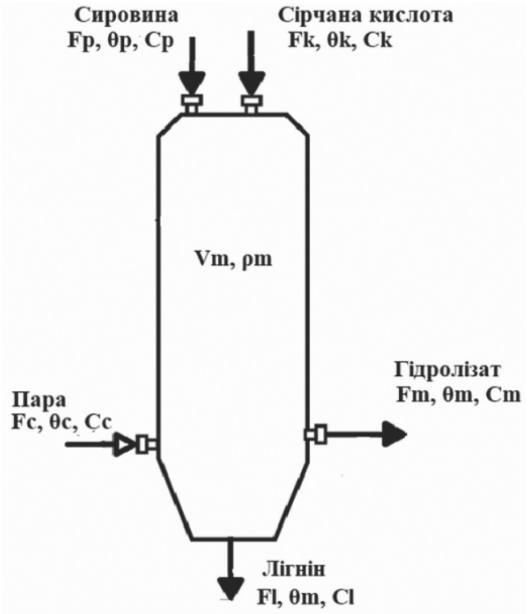


Рис. 1. Структурно-параметрична схема гідроліз-апарату

де F_p – витрата сировини, кг/с; θ_p – температура сировини, К; C_p – теплоємність сировини, Дж/К; F_k – витрата розбавленої сульфатної кислоти, кг/с; θ_k – температура розбавленої сульфатної кислоти, К; C_k – теплоємність розбавленої сульфатної кислоти, Дж/К; F_c – витрата підігрітої пари, кг/с; θ_c – температура підігрітої пари, К; C_c – теплоємність підігрітої пари, Дж/К; F_1 – витрата лігніну, кг/с; C_1 – теплоємність лігніну, Дж/К; F_m – витрата гідролізату, кг/с; θ_m – температура гідролізату, К; C_m – теплоємність гідролізату, Дж/К; V_m – об'єм гідроліз-апарату, м^3; ρ_m – густина гідролізату, кг/м^3.

Головною метою оптимального керування є підтримання заданої концентрації моносахаридів в гідролізаті і температури в гідроліз-апараті при мінімізації витрати нагрітої пари. Відповідно до цього введемо інтегральний-квадратичний критерій якості:

$$I = \frac{1}{2}\int_0^{t_f}\left[Q\cdot(X_m - X_m^{зд})^2 + \frac{1}{2}\cdot r\cdot F\cdot c^2\right]dt \to \min, \quad (1)$$

де Q, r – вагові коефіцієнти.

Для виконання розрахунку оптимальної системи керування була створена математична модель для гідроліз-апарату. В даній моделі були враховані ряд упущень:

1. Тиск не впливає на температуру в гідроліз-апараті.
2. Не враховано вплив поляризації температури та концентрації.
3. В гідроліз-апараті ідеальні умови.

1) Запишемо тепловий баланс реакційної маси:

$$\begin{gathered} F_p\cdot c_p\cdot\theta_m + F_k\cdot c_k\cdot\theta_k + F_c\cdot r - \\ -\left(\frac{F_p\cdot(1-X_p)+F_k+F_c}{1-\frac{M_p}{M_m}}\cdot c_m\cdot\theta_m - \right. \\ \left. -\left(-\frac{M_p}{M_m}\cdot F_m\cdot X_m + F_p\cdot X_p\right)\cdot c_l\cdot\theta_m\right) = \\ = V_m\cdot\rho_m\cdot c_m\frac{d\theta_m}{dt} \end{gathered} \quad (2)$$

Проведемо лінеаризацію рівняння:

$$\begin{gathered} r\cdot\Delta F_c - \\ -\left(\frac{F_p\cdot(1-X_p)+F_k+F_c}{1-\frac{M_p}{M_m}\cdot Xm}\cdot c_m\cdot\Delta\theta_m - \right. \\ \left. -\left(-\frac{M_p}{M_m}\cdot F_m\cdot X_m + F_p\cdot X_p\right)\cdot c_l\cdot\Delta\theta_m\right) - \\ -\left(-\frac{M_p}{M_m}\cdot F_m\cdot c_l\cdot\theta_m\right)\cdot\Delta X_m = V_m\cdot\rho_m\cdot c_m\frac{d\Delta\theta_m}{dt}. \end{gathered} \quad (3)$$

Виконаємо спрощення:

$$\begin{gathered} \frac{r}{V_m\cdot\rho_m\cdot c_m}\cdot\Delta F_c - \\ -\frac{\left(\frac{F_p\cdot(1-X_p)+F_k+F_c}{1-\frac{M_p}{M_m}\cdot Xm}\cdot c_m - \left(-\frac{M_p}{M_m}\cdot F_m\cdot Xm + F_p\cdot Xp\right)\cdot c_l\right)}{V_m\cdot\rho_m\cdot c_m}\cdot\Delta\theta_m + \\ +\frac{\frac{M_p}{M_m}\cdot F_m\cdot c_l\cdot\Delta\theta_m}{V_m\cdot\rho_m\cdot c_m}\cdot\Delta X_m = \frac{d\Delta\theta_m}{dt}. \end{gathered} \quad (4)$$

Запишемо рівняння в просторі стану для теплового балансу:

$$X_{p1} = \left(\frac{F_c}{F_m} \cdot X_p - \frac{M_m}{M_p} \cdot X_m \right), \qquad (5)$$

де $a_{11} = \dfrac{-\left(\dfrac{F_p \cdot (1 - X_p) + F_k + F_c}{1 - \dfrac{M_p}{M_m} \cdot X_m} \cdot c_m - \left(-\dfrac{M_p}{M_m} \cdot F_m \cdot X_m + F_p \cdot X_p \right) \cdot c_l \right)}{V_m \cdot \rho_m \cdot c_m}$;

$$a_{12} = \frac{\dfrac{M_p}{M_m} \cdot F_m \cdot c_l \cdot \theta_m}{V_m \cdot \rho_m \cdot c_m}; \quad b = \frac{r}{V_m \cdot \rho_m \cdot c_m};$$

2) Матеріальний баланс для акумулюючої ємності реакційної маси в гідроліз-апараті при мольних значеннях концентрації:

$$-F_m \cdot X_m + V_m \cdot \rho_m \cdot w = 0 \qquad (6)$$

Оскільки дана реакція першого порядку, то її швидкість буде визначатися концентрацією полісахаридів x_{p1} в гідроліз-апараті, тобто полісахаридами, які ще не прореагували. Якщо врахувати закон Ареніуса та закон діючих мас, то швидкість реакції буде дорівнювати:

$$w = \left(\frac{M_m}{M_p} \right) \cdot A_k \cdot e^{\left(\frac{-E}{R \cdot \theta_m} \right)} \cdot X_{p1}, \qquad (7)$$

де M_m – молярна маса моносахаридів, моль; M_p – молярна маса полісахаридів, моль; E – енергія активації реакції, Дж/моль; R – універсальна газова стала Дж/моль · К; A_k – предекспоненціальний множник реакції, кг/моль; $X_{p1} = \left(\dfrac{F_c}{F_m} \cdot X_p - \dfrac{M_m}{M_p} \cdot X_m \right)$ – концентрація полісахаридів, %.

Виконаємо лінеаризацію даного рівняння:

$$\begin{gathered} \frac{-(F_p \cdot (1 - X_p) + F_k + F_c)}{\left(1 - \dfrac{M_p}{M_m} \cdot X_m \right)} \cdot \Delta X_m - \\ - V_m \cdot \rho_m \cdot A_k \cdot e^{\left(\frac{-E}{R \cdot \Theta_m} \right)} \cdot \Delta X_m - \\ - \left(V_m \cdot \rho_m \cdot \frac{M_m}{M_p} \cdot A_k \cdot e^{\left(\frac{-E}{R \cdot \Theta_m} \right)} \cdot \left(\frac{E}{R \cdot \Theta_m} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{F_p}{F_m} \cdot X_p - \frac{M_p}{M_m} \cdot X_m \right) \right) \cdot \Delta \Theta_m = V_m \cdot \rho_m \frac{d \Delta X_m}{dt}. \end{gathered} \qquad (8)$$

Якщо виконати спрощення, то рівняння набуде вигляду:

$$\begin{gathered} \frac{\left(\dfrac{-\left(F_p \cdot (1 - X_p) + F_k + F_c \right)}{\left(1 - \dfrac{M_p}{M_m} \cdot X_m \right)} - V_m \cdot \rho_m \cdot A_k \cdot e^{\left(\frac{-E}{R \cdot \Theta_m} \right)} \right)}{V_m \cdot \rho_m} \cdot \Delta X_m - \\ - \frac{\left(V_m \cdot \rho_m \cdot \dfrac{M_m}{M_p} \cdot A_k \cdot e^{\left(\frac{-E}{R \cdot \Theta_m} \right)} \cdot \left(\dfrac{E}{R \cdot \Theta_m} \right) \cdot \left(\dfrac{F_p}{F_m} \cdot X_p - \dfrac{M_p}{M_m} \cdot X_m \right) \right)}{V_m \cdot \rho_m} \times \\ \times \Delta \Theta_m = \frac{d \Delta X_m}{dt}. \end{gathered} \qquad (9)$$

Запишемо рівняння в просторі стану для матеріального балансу для акумулюючої ємності реакційної маси в гідроліз-апараті:

$$a_{21} \cdot \Delta \Theta_m + a_{22} \cdot \Delta X_m = \frac{\Delta X_m}{dt}, \qquad (10)$$

де $a_{21} = -\dfrac{\left(V_m \cdot \rho_m \cdot \dfrac{M_m}{M_p} \cdot A_k \cdot e^{\left(\frac{-E}{R \cdot \Theta_m} \right)} \cdot \left(\dfrac{E}{R \cdot \Theta_m} \right) \cdot \left(\dfrac{F_p}{F_m} \cdot X_p - \dfrac{M_p}{M_m} \cdot X_m \right) \right)}{V_m \cdot \rho_m}$;

$$a_{22} = \frac{\dfrac{-(F_p \cdot (1 - X_p) + F_k + F_c)}{\left(1 - \dfrac{M_p}{M_m} \cdot X_m \right)} - V_m \cdot \rho_m \cdot A_k \cdot e^{\left(\frac{-E}{R \cdot \Theta_m} \right)}}{V_m \cdot \rho_m}.$$

Розрахунки по визначенню концентрації моносахаридів та температури в апараті проведено з наступними даними, які записано в таблицю 1.

В даній моделі регульованими величинами є концентрація моносахаридів та температура в гідроліз-апараті. Збуренням є концентрація полісахаридів. Доцільний канал керування для даного випадку – «Витрата пари – концентрація моносахаридів».

Отже в загальному виді математичну модель процесу гідролізу можна подати, як:

$$\begin{gathered} a_{11} \cdot \Delta \Theta_m + a_{12} \cdot \Delta X_m + b \cdot \Delta F_c = \frac{\Delta \Theta_m}{dt} \\ a_{21} \cdot \Delta \Theta_m + a_{22} \cdot \Delta X_m = \frac{\Delta X_m}{dt}. \end{gathered} \qquad (11)$$

Задача синтезу оптимального лінійного-квадратичного регулятора розв'язується на основі матричного диференціального нелінійного рівняння Ріккаті та знаходження оптимального керування зі зворотним зв'язком.

Матричне диференціальне рівняння Ріккаті описується за наступною формулою:

$$P' = -P \cdot A - A^T \cdot P + P \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot P - Q, \qquad (12)$$

де A – матриця змінних стану; B – матриця керування; Q, R – матриця вагових коефіцієнтів. Матриця Q, A, B і X дорівнює:

Таблиця 1

№ п/п	Назва параметру	Позначення	Значення	Одиниці виміру
1	Витрата сировини	F_p	0,25	кг/с
2	Витрата сірчаної кислоти	F_k	0,25	кг/с
3	Витрата пари	F_c	0.5	кг/с
4	Витрата лігніну	F_1	0,125	кг/с
5	Витрата гідролізату	F_m	0,375	кг/с
6	Об'єм гідроліз-апарата	V_m	0.045	метрів^3
7	Температура сировини	θ_p	293	К
8	Температура кислоти	θ_k	413	К
9	Температура пари	θ_c	460	К
10	Температура гідролізату	θ_m	453	К
11	Питома теплоємність сировини	c_p	2500	Дж/(кг · К)
12	Питома теплоємність сірчаної кислоти	c_k	4180	Дж/(кг · К)
13	Питома теплоємність пари	c_c	1780	Дж/(кг · К)
14	Питома теплоємність гідролізату	c_m	3800	Дж/(кг · К)
15	Питома теплоємність	c_1	1300	Дж/(кг · К)
16	Густина гідролізату	ρ_m	1554	г/кг^3

$$Q=\begin{bmatrix}0.5 & 0\\ 0 & 0.5\end{bmatrix};\quad R=2;\quad A=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12}\\ a_{21} & a_{22}\end{bmatrix};$$
$$B=\begin{bmatrix}b\\ 0\end{bmatrix};\quad X=\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix}.$$

З матричного диференціального рівняння Ріккаті знайдемо:

$$P'_{11}=0.138P_{12}+2P_{12}^2-0.5,$$
$$P'_{12}=P'_{21}=-P_{11}+7.286P_{12}+0.069P_{22}+2P_{12}P_{22},$$
$$P'_{22}=-2P_{12}+14,572P_{22}+2P_{22}^2-0.5.$$

Запишемо умови трансверсальності для даного випадку:

$$P_{11}(t_f)=0;\quad P_{12}(t_f)=0;$$
$$P_{21}(t_f)=0;\quad P_{22}(t_f)=0. \tag{13}$$

Оптимальне керування дорівнює:

$$\Delta U^*(t)=-R^{-1}\cdot b_2\cdot(P_{11}\cdot\Delta x_1+P_{12}\cdot\Delta x_2). \tag{14}$$

При постійних значення матриць A, B, R, Q та $t\to\infty$, P прямує до усталеного значення, яке знаходять з матричного рівняння Ріккаті, яке наведено вище. Це в свою чергу забезпечує сталість матричного коефіцієнту підсилення регулятору К.

Введемо більш загальний критерій якості:

$$I=\frac{1}{2}X^T(t_f)\cdot S_f\cdot X(t_f)+$$
$$+\frac{1}{2}\int_0^{t_f}\left[X^T\cdot Q\cdot X+U^T\cdot R\cdot U+2\cdot X^T\cdot N\cdot U\right]dt. \tag{15}$$

В критерію якості врахуємо, що взаємозв'язки між керуваннями та станом, можна показати виразом з коефіцієнтом підсилення:

$$K=R^{-1}\cdot(B^T\cdot P-N^T). \tag{16}$$

Однак існують вимоги стосовно існування оптимального лінійно-квадратичного регулятора. Дані вимоги наступні:

1. Пара матриць $[A, B]$ має бути повністю керована.

2. Мають виконуватися нерівності $R>0$, $Q-N\cdot R^{-1}\cdot N^T\geq 0$.

3. Пара матриць $[Q-N\cdot R^{-1}\cdot N^T, A-B\cdot R^{-1}\cdot N^T]$ не може мати спостережувані моди з власними значеннями на дійсній осі.

Оптимальний закон керування дорівнює:

$$\Delta U^*(t)=-R^{-1}\cdot(b\cdot(P_{11}\cdot\Delta x_1+P_{12}\cdot\Delta x_2)+$$
$$+2\cdot(N_{11}\cdot x_1+N_{22}\cdot x_2)). \tag{17}$$

Слід відмітити, що при практичній реалізації алгоритмів оптимального керування часто не представляється можливим отримати оптимальні точні характеристики оптимізації. Це, найчастіше, обумовлене тим, що при побудові вихідної математичної моделі процесу керування звичайно використовують наближені чи апроксимуючі моделі, що враховують основні домінуючі зв'язки і в той же час відрізняються від реальних. В реальних умовах похибка алгоритмів оптимізації може зростати (особливо на великих інтервалах часу), що приведе до нестійкості алгоритмів оптимізації. Явище нестійкості алгоритмів оптимізації пов'язане з умовами реалізації рівняння Ріккаті, розв'язок якого губить властивість симетричності.

Виконаний розрахунок оптимального лінійного регулятора, який був реалізований у програмному середовищі MATLAB. В результаті про-

ведемо порівняння системи з одним входом і виходом, другого порядку для звичайних систем і для систем з врахуванням зв'язку між станом та керуванням.

З рис. 2 можна помітити, що система має аперіодичний характер перехідного процесу. Час перехідного процесу складає 400 с. Концентрація моносахаридів в кінці процесу становить 32.5 %, що входить в потрібний проміжок. Однак графіки є доволі схожими як для випадку звичайної системи, так і для врахування зв'язку.

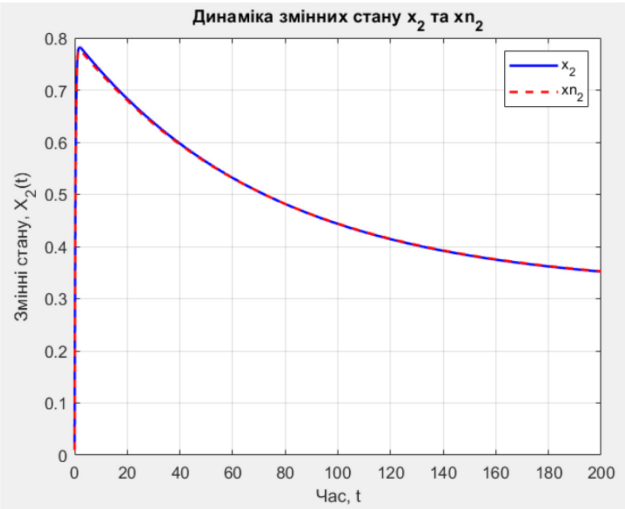


Рис. 2. Динаміка змінної стану x^2 з лінійним-квадратичним регулятором

На рис. 3 зобразимо зміну температури в гідроліз-апараті.

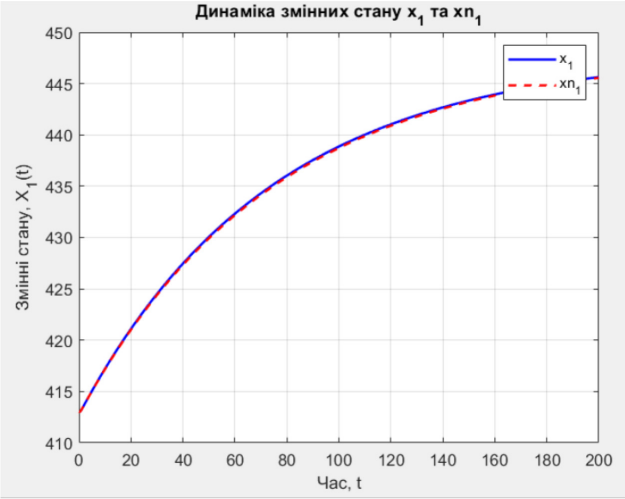


Рис. 3. Динаміка змінної стану температури в гідроліз-апараті з лінійно-квадратичним регулятором

На рис. 3 можна помітити, що система має аперіодичний характер процесу, а час перехідного процесу складає 400 с. Температура за регламентом повинна бути в проміжку 443..453 К, що і можна побачити на рис. 3. Графік зміни стану з врахуванням взаємозв'язку виходить на задане значення трішки повільніше, ніж без врахування.

На рис. 4 зобразимо динаміку руху змінної керування, яка є витратою пари.

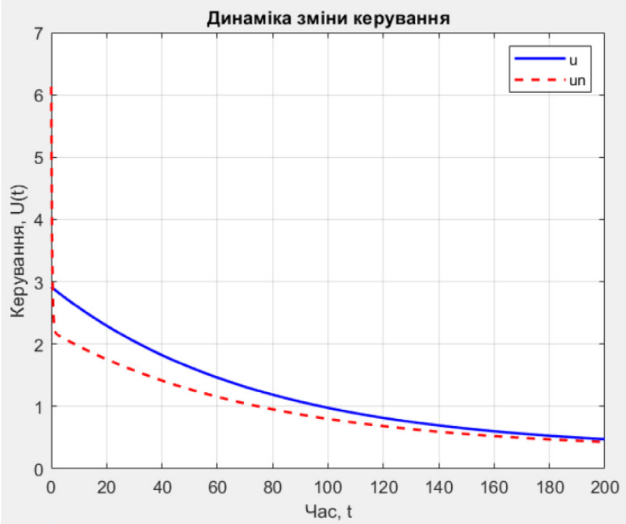


Рис. 4. Динаміка руху змінних керування з регулятором

З рисунку зміни динаміки керування можна прослідкувати різницю між звичайною системою і з врахуванням зв'язку між станом та керуванням. В випадку врахування зв'язку між станом та керуванням – витрата пари змінюється більш плавно та є набагато меншою, ніж для випадку без зв'язку.

Висновки. Сучасні технології виробництва етанолу гідролізом деревини неможливо уявити без використання автоматизації, яка дозволяє отримувати максимально можливу якість та кількість продукту. Для того, щоб це досягти – потрібно розробити систему керування, яка буде підтримувати оптимальні параметри процесу. Аналіз попередніх робіт показав, що хоча процес досліджено та є розроблені моделі, однак їх важко застосувати в системах керування.

Тому на основі розробленої моделі досліджувалася оптимальна система керування. Введений інтегральний квадратичний критерій якості та розроблений оптимальний лінійний закон на основі розв'язання рівняння Рікатті. Розроблено алгоритм оптимального керування процесом гідролізу, який в цілому задовольняє поставлені задачі.

Список літератури:

1. Mensah, M., Asiedu, N.Y., Neba, F.A. et al. Modeling, optimization and kinetic analysis of the hydrolysis process of waste cocoa pod husk to reducing sugars. SN Appl. Sci. 2, 1160, 2020. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2966-y

2. Dąbkowska-Susfał, K., Półgrabska, A., Sobieszuk, P., Kołtuniewicz, A.B. Mathematical modeling of the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic waste in membrane bioreactor considering transport phenomena. Chemical Engineering Research and Design, Volume 208, 2024. P. 656–665. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.07.034

3. Fenila F., Yogendra Shastri. Optimal control of enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass, Resource-Efficient Technologies, Volume 2, Supplement 1, 2016. P. S96–S104. https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.11.006.

4. Mukherjee, P., Pal, S., Sivaprakasam, S. Process Parameter Controls for Efficient Enzymatic Hydrolysis of Cellulosic Biomass. In: Bisaria, V. (eds) Handbook of Biorefinery Research and Technology: Biomass Logistics to Saccharification. Springer, Dordrecht, 2024. P.1023-1051. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6308-1_77

5. Baker, A.J., & Jeffries, T.W. State-of-the-art report on status of wood hydrolysis for ethanol production. OSTI, 1981. 56 p.

6. Kwarteng, I.K. Kinetics of acid hydrolysis of hardwood in a continuous plug flow reactor. OSTI, 1983. 78 p.

7. Conner, A.L., & Lorenz, L.F. Kinetic modeling of hardwood prehydrolysis. Part III. Water and dilute acetic acid prehydrolysis of southern red oak. OSTI, 1986. 34 p.

8. Huang, Y., & Chen, W.H. A kinetic model for hydrolysis of cellulose in a semi-batch reactor: Analysis of temperature effects. Biochemical Engineering Journal, 2021. 72 p.

9. Мельничук, М.І. Оптимізаційні підходи до математичного моделювання ферментативних процесів гідролізу білків у харчовій промисловості. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, Харків, 2019. 124 с.

10. Ashfaq, M.M., Zholobko, O., Wu, X.-F. Kinetic Modeling of Cornstalk Cellulose Hydrolysis in Supercritical Water: A Comparative Study of the Effects of Temperature and Residence Time on Derivative Production. Processes, 11(10), 2023. MDPI. 3030 c.

11. Van Maris, A.J.A., Winkler, R., Verheijen, P.J.T. Modeling enzymatic hydrolysis of cellulose in lignocellulosic biomass conversion processes. Biotechnology Advances, 29(4), 2011. Elsevier. 675–681 c.

12. Godoy, J., Valbuena, M., Pérez-Correa, J.R., et al. A semi-mechanistic model to simulate enzymatic hydrolysis of pretreated lignocellulosic biomass: application to sugarcane bagasse. Bioresource Technology, 256, 2018. Elsevier. 34–42 c.

13. Kornienko Y.M., Haidai S.S., Sachok R.V., Liubeka A.M., Korniyenko B.Y. Increasing of the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. No 15(7). P. 890–900.

14. Korniyenko B., Ladieva L. Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. Advances in Intelligent Systems and Computing. 1247 AISC. 2021. P. 18–30.

15. Корнієнко Б.Я., Галата Л.П. Дослідження імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів методом IRISK. Моделювання та інформаційні технології. 2018. Вип. 83. С. 34–42.

16. Галата Л.П., Корнієнко Б.Я., Заболотний В.В. Математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних інформаційних ресурсів. Наукоємні технології. 2019. Том 43. № 3. С. 300–306.

17. Корнієнко Б.Я., Галата Л.П. Оптимізація системи захисту інформації корпоративної мережі. Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. 2019. Випуск 19. С. 56–62.

18. Корнієнко Б.Я., Галата Л.П. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. Наукоємні технології. 2017. № 4(36). С. 316–322. doi.org/10.18372/2310-5461.36.12229.

19. Корнієнко Б.Я., Юдін О.К., Снігур О.С. Безпека аутентифікації у web-ресурсах. Захист інформації. 2012. № 1(54). С. 20–25. DOI: 10.18372/2410- 7840.14.2056 (ukr).

20. Корнієнко Б.Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. Наукоємні технології. 2012. № 3(15). С. 83–89, doi.org/10.18372/2310- 5461.15.5120 (ukr).

21. Корнієнко Б.Я. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. Наукоємні технології. 2017. № 4(36). С. 316–322.

Ladieva L.R., Korniyenko B.Ya., Sazonov A.Yu., Pelypenko N.S. OPTIMAL CONTROL OF THE ETHANOL PRODUCTION PROCESS BY WOOD HYDROLYSIS

The article considers the current problem of increasing demand for biofuels, which is due to the need to reduce greenhouse gas emissions and dependence on fossil fuels, the use of which leads to negative environmental consequences. The use of the hydrolysis process, in particular waste from the forest and food industries, makes it possible to effectively use renewable resources that were previously considered of little value and to obtain bioethanol from them, which is a full-fledged environmentally friendly substitute for traditional

fuels. The development of technologies in this area also contributes to the creation of closed production cycles and stimulates the environmental modernization of industrial processes, which makes research in this area extremely important for sustainable development. The hydrolysis process is considered the most promising method of obtaining bioethanol, since the raw material in this process can be sawdust or food industry waste, which are currently considered waste. The use of these resources creates the opportunity not only to obtain environmentally friendly fuel, but also implements waste-free production in the food industry.

The article is devoted to one of the methods of obtaining bioethanol – the method of wood hydrolysis. This method has an advantage over others, as it can use renewable resources and food waste to produce high-quality fuel. Modern technologies for ethanol production by wood hydrolysis are unimaginable without the use of automation, which allows obtaining the highest possible quality and quantity of the product. The article develops a control system that supports optimal process parameters. The topic of finding optimal control of the ethanol production process by wood hydrolysis is extremely relevant, since there is no single approach to modeling the multicomponent process of wood hydrolysis and no problems have been solved based on a linear regulator. Analysis of previous works showed that although the process has been studied and models have been developed, they are difficult to apply in control systems. An optimal control system has been developed based on a mathematical model. An integral quadratic quality criterion has been introduced and an optimal linear law has been developed based on the solution of the Riccati equation. An algorithm for optimal control of the hydrolysis process has been developed, which generally satisfies the tasks set.

Key words: *optimal control, ethanol production, wood hydrolysis, quality criterion, control system.*

УДК 004.8:004.05
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/15

Лебедєв А. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Федорова Н. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МУТАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРОБЛЕМИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У статті розглянуто особливості застосування мутаційного аналізу до систем машинного навчання (МН). Проведений аналіз засвідчив, що класичне тестування мутаціями не може бути безпосередньо використане до систем з МН без відповідної адаптації. У статті детально описуються основні проблеми, які виникають під час мутаційного аналізу у системах МН, зокрема, визначення поняття «вихідного коду», розробка ефективних та реалістичних операторів мутації, оптимізація швидкодії процесу тестування і необхідність вдосконалення методів оцінки мутаційного покриття. Крім того, стаття розглядає останні дослідження мутаційного аналізу в контексті систем з МН та проводить їх критичний аналіз.

У ході дослідження запропоновано низку рекомендацій для дослідників та розробників програмного забезпечення, які дозволять не лише інтегрувати тестування мутаціями до моделей МН, а й зберегти основоположні концепції мутаційного аналізу. Наприклад, обґрунтовано необхідність чіткого розмежування між вихідним кодом і тестовими наборами, створення спеціалізованих операторів мутації та розробка комбінованих метрик для оцінки тестового покриття. Щобільше, розглянуто способи оптимізації обчислювальної складності мутаційного аналізу, які використовуються в наявних інструментах. Запропоновані рішення сприятимуть підвищенню якості тестування моделей МН та забезпеченню більш точної оцінки їхньої надійності.

Результати дослідження підкреслюють важливість адаптації класичних методів тестування до особливостей систем МН для підвищення їхньої ефективності та надійності. Висновки визначають напрямки подальших досліджень у цій сфері, зокрема, розробку нових реалістичних операторів мутації, оптимізацію швидкодії тестування та узгодження основних концептуальних аспектів мутаційного аналізу із принципами роботи моделей МН. Подальший розвиток методів мутаційного аналізу дозволить зробити тестування моделей МН більш надійним, ефективним і адаптивним до змінних умов реальних застосувань.

Ключові слова: *мутаційне тестування, оператори мутації, якість тестових наборів, машинне навчання, моделі машинного навчання, обробка великих масивів даних.*

Постановка проблеми. Моделі машинного навчання (МН), в особливості моделі глибокого навчання, зазнають активного розвитку та впровадження у низку критично-важливих галузей, які пов'язані з медициною, фінансами, енергетикою та військово-промисловим апаратом. Вони дозволяють автоматизувати складні процеси для прийняття рішень на основі аналізу великої кількості показників, які раніше вимагали втручання людини. Тому якість та надійність моделей МН є дуже важливими аспектами, оскільки навіть невелика помилка в результатах обчислень може впливати на життя людей.

Через комплексну природу моделей МН їх тестування характеризується високим рівнем складності. Охопити увесь спектр можливих проблем, які виникають в процесі розробки та навчання моделей, можна шляхом впровадження інтегрованого підходу на основі різних технік.

Тестування мутаціями або мутаційний аналіз – метод тестування програмного забезпечення, який гарно зарекомендував себе у традиційних системах. Однак він, як і інші традиційні методи тестування, потребують адаптації та переосмислення концепцій, адже процеси розробки та підтримки моделей МН суттєво відрізняються від аналогічних процесів у класичних системах.

Одними з ключових проблем мутаційного аналізу в контексті системи МН є визначення об'єкта тестування та розробка мутаційних операторів,

які дійсно імітують можливі людські помилки й впливають на роботу моделі. Крім того, існують проблеми, пов'язані з оптимізацією швидкості виконання аналізу та ефективним використанням обчислювальних ресурсів.

Тому, аналіз проблем використання тестування мутаціями в контексті моделей МН й розробка стратегічних напрямків їх вирішення є актуальними й необхідними завданнями, адже це має безпосередній вплив на забезпечення якості та стабільності систем у сучасних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання мутаційного аналізу у традиційних системах було досліджено у роботах Ю. Цзя та М. Гарман [1, с. 650–653]. Пізніше тестування мутаціями було детально описано у роботі Ц. Чжу, А. Панічелли та Е. Зайдмана [2, с. 2–3].

Проте мутаційний аналіз для моделей МН є доволі новим напрямом досліджень, що обумовлює обмеженість публікацій у сфері. Однією з перших робіт у цій галузі є робота Л. Ма, Ф. Чжан, Цз. Сунь, М. Сю, Бо Лі та Ф. Цзюфей-Су [3, с. 100–101]. Автори вводять мутаційні оператори для моделей глибокого навчання, які передбачають модифікації як на рівні вихідного коду, так і на рівні навченої моделі

Майже у той самий час В. Шен, Цз. Ван та Чж. Чен [4, с. 110] представили методику тестування, яка заснована на мутаційних операторах виключно на рівні моделі.

Пізніше Ц. Ху, Л. Ма, С. Сі, Б. Ю, Ян Лю та Ц. Чжао [5, с. 1159] продовжили напрацювання проведені у роботі [3, с. 104] шляхом розширення мутаційного тестування для рекурентних нейронних мереж.

Однак підходи, описані у вищезгаданих роботах, зазнають значної критики зі сторони науковців. Наприклад, Г. Джахангірова та П. Тонелла [6, с. 74–75] розглядають неефективність концепцій, запропонованих у [3, с. 104], бо вони не враховують стохастичну природу процесу навчання, та пропонують альтернативний список мутаційних операторів, які дійсно мають вплив на моделі.

Крім того, Н. Гумбатова, Г. Джахангірова, Г. Бавота, В. Річчіо, А. Стокко та П. Тонелла [7, с. 1115] запропонували таксономію реальних несправностей у системах МН, виявивши, що багато з них ще не були виявлені під час тестування за допомогою існуючих інструментів. Також автори пропонують підходи, які можуть бути враховані у подальших роботах.

А. Панічелла та С. Ліем [8, с. 67–69] досліджують об'єкт тестування у моделях МН в процесі мутаційного аналізу. Вони описують проблеми сучасних методик та пропонують план для подолання виявлених проблем.

Аналіз останніх публікацій підтвердив зростаючий інтерес наукової спільноти до даної тематики. Щобільше, наскільки відомо автору статті, дана тема не є дослідженою у вітчизняний науковій літературі, що підтверджує актуальність роботи.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження мутаційного аналізу та можливостей його використання до моделей МН, зокрема, до систем глибокого навчання. Для досягнення поставленої мети пропонується:

1. Здійснити аналіз наявних підходів та практик.
2. Ідентифікувати та детально описати проблеми.
3. Визначити список рекомендацій, які можуть допомогти у розв'язанні окреслених проблем.

Виклад основного матеріалу. Концепція мутаційного аналізу бере свій початок з 70-х років минулого століття, її згадування можна прослідкувати у роботах Р. А. ДеМілло, Р. Д. Ліптона, Ф. Г. Сейварда [9, с. 36] та Р. Г. Гамлета [11, с. 280]. Попри те, що ідея тестування мутаціями виникла досить давно, найбільшого свого розвитку вона зазнала лише в останні десятиліття у зв'язку зі збільшенням обчислювальних потужностей комп'ютерних систем.

Тестування мутаціями або мутаційний аналіз – це метод тестування програмного забезпечення, який полягає у внесенні невеликих змін у вихідний код системи задля перевірки ефективності тестового набору.

На рисунку 1 продемонстровано процес виконання мутаційного аналізу. Під час тестування утворюється велика кількість копій системи, кожна з яких мають одну невеличку зміну у вихідному коді – вони мають назву мутанти. Модифіковані версії програми генеруються за допомогою операторів мутації, які описують типові помилки розробників програмного забезпечення. Подальший запуск набору тестів для кожного з мутантів оцінює якість написаного тестового набору системи за певним алгоритмом: якщо тести пройшли на мутанті, то мутант вважається «вижившим», інакше – «вбитим». Якщо тестовий набір на мутанті пройшов без помилок, то це демонструє, що тести не покривають увесь спектр можливих проблем або перевіряють код поверхнево. У результаті аналізу отримують оцінку мутацій, яка є відношенням «вбитих» мутантів до їх загаль-

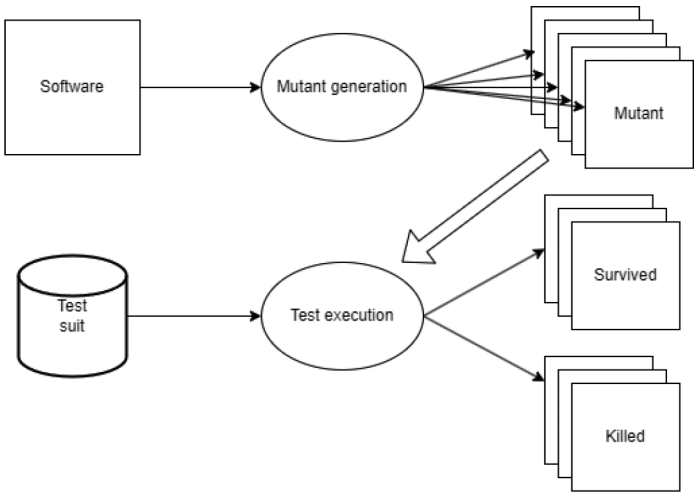


Рис. 1. Процес виконання мутаційного аналізу для традиційних систем

ної кількості. Високе значення оцінки свідчить про здатність тестового набору виявляти різноманітні потенційні помилки, а низький показник вказує на їхню низьку якість та наявність можливих прогалин у перевірці.

Як описують А. Панічелла та С. Ліем у своїй роботі [8, с. 67], мутаційний аналіз ґрунтується на двох гіпотезах:

1. Гіпотеза ефекту зв'язку (ГЕЗ) [9, с. 34] – описує залежність між різними за масштабом помилками. Основна ідея передбачає, що якщо тест здатний розпізнати маленьку зміну мутаційного оператора, як, наприклад, зміна знаку додавання () на віднімання (–), то з високою ймовірністю він виявить і більші зміни, які фактично є комбінацією декількох маленьких модифікацій.

2. Гіпотеза компетентного програміста (ГКП) [10, с. 5] – стверджує, що більшість програмістів є достатньо компетентними, щоб продукувати коректний або близький до коректного код. Під формулюванням «близький до коректного код» розуміють код, який може містити невеликі помилки.

Обидві гіпотези є взаємопов'язаними та критично важливими для обґрунтування ефективності мутаційного аналізу.

Важливо усвідомити, що в процесі мутаційного аналізу мутаціям піддається вихідний код системи, в той час, як об'єктом тестування є тестовий набір. Тобто фактично аналіз спрямований на перевірку якості тестового набору, що забезпечує оцінку коректності роботи вихідного коду.

Мутаційний аналіз також знаходить застосування у тестуванні систем МН, включаючи моделі глибокого навчання, як це демонструється у роботах [3, с. 102–104; 4, с. 108; 5, с. 1158]. Системи з МН – це системи, які мають одну чи більше моделей МН. Загалом процес МН складається з трьох основних етапів: навчання на тренувальних даних, верифікація на тестових даних та впровадження в експлуатацію. Як правило, тренувальна та тестова вибірки формуються на основі розбиття початкового набору даних у певному співвідношенні. При цьому, тестова вибірка містить дані, які раніше не були використані під час навчання, щоб оцінити роботу моделі в наближених до реальних умовах.

Попри довгу історію мутаційного тестування, його застосування для систем з МН розпочалося відносно нещодавно. Перші дослідження у цій сфері відзначають, що джерела помилок у моделях МН є значно різноманітнішими, ніж у традиційному програмному забезпеченні. Наприклад, Л. Ма та інші [3, с. 100] стверджують, що тренувальні дані, навчальна програма та навчена модель породжують найбільшу кількість помилок, тому автори пропонують мутаційні оператори для цих компонентів. Водночас В. Шен, Цз. Ван та Чж. Чен [4, с. 110] зосереджуються виключно на мутаціях навченої моделі.

Проте застосування мутаційного аналізу до МН створює низку концептуальних труднощів. Згідно з класичним визначенням мутаційного аналізу, мутаціям має піддаватися вихідний код системи, але його ідентифікація в контексті моделей МН є нетривіальною задачею.

На перший погляд, тренувальна програма, яка визначає структуру та гіперпараметри моделі, виглядає перспективним кандидатом, адже зміни в ній матимуть безпосередній вплив на модель. Однак тренувальні програми радше є специфікацією, на основі якої фреймворк МН будує модель. Якщо проводити аналогію з WEB-програмуванням, то тренувальна програма

є API-специфікацією, яку WEB-фреймворк може використати для генерації обробників запитів. Щобільше, самі автори [3, с. 107] у рамках проведеного експерименту щодо впливу мутацій на результат моделі зазначають, що мутаційні оператори рівня тренувальної програми породжують мутантів, які не переживають тестування через значну різницю у роботі моделі.

Тренувальні дані теж можуть зазнавати мутацій, проте, такі зміни насамперед впливають на логіку моделі, а не дають змогу оцінити повноту та якість тестового набору, що є ціллю мутаційного аналізу. Як стверджують А. Панічелла та С. Ліем [8, с. 66], навчання та оцінку моделі можна порівняти із двома послідовними Test-Driven Development (TDD) процесами. TDD – це практика розробки програмного забезпечення, у якій спочатку пишуть тестовий набір, а потім ітеративно розробляють код, допоки не пройдуть усі тести. Згідно з авторами, в процесі навчання тренувальні дані є тестовим набором, а ітеративний процес розробки – це процес навчання моделі до досягнення певної точності. У другому процесі тестові дані відповідають тестовому набору з TDD, а вихідним кодом також є навчена модель, але тут ітеративним процесом є не навчання, а зміна однієї моделі на іншу. Таким чином, тренувальні дані не мають піддаватися мутаціям, адже згідно з TDD аналогією вони не є «вихідним кодом» в обох випадках.

Навчену модель часто розглядають як найбільш доцільний об'єкт для внесення мутацій, адже вона найближча до поняття «вихідного коду» на етапі експлуатації. Однак постає питання, чи можуть зміни на цьому рівні дійсно імітувати помилки, притаманні розробникам? Адже зазвичай навчання моделі відбувається фреймворком за чітко визначеним алгоритмом, де немає місця випадковим модифікаціям, як, наприклад, додавання чи вилучення шару мережі.

У таблиці 1 наведено узагальнений порівняльний аналіз мутаційних змін на різних рівнях моделей МН, включаючи рівень тренувальних даних, тренувальної програми та навченої моделі. Таблиця містить приклади мутацій, їхні переваги та недоліки. Кожен рівень мутацій має свої сильні та слабкі сторони, що слід враховувати при виборі підходу до тестування моделей машинного навчання.

Окрім визначення вихідного коду, важливою концептуальною проблемою також є відповідність гіпотезам мутаційного аналізу. У традиційному випадку припускають, що ідентифікація дрібних помилок є маркерами, що забезпечують виявлення більших вразливостей за умови їх наявності. Утім, у контексті моделей МН вплив незначної модифікації не є передбачуваним і стабільним через стохастичну природу навчання моделі. Крім того, ГКП передбачає, що мутації імітують типові помилки розробників у вихідному коді. Якщо ж згенеровану фреймворком модель вважати "вихідним кодом", то яким чином мутації навченої моделі можуть імітувати помилки розробників? Очевидно, ці аспекти потребують детальнішого дослідження для досягнення узгодженості.

Також проблемним є питання швидкодії мутаційного аналізу як у традиційних системах, так і в системах МН. У класичному мутаційному аналізі застосовуються різні методи оптимізації, які дозволяють скорочувати час виконання аналізу та зменшувати обчислювальні витрати [1, с. 653–657]. Проте у випадку систем МН ситуація значно складніша, оскільки оператори мутації можуть передбачати необхідність перенавчання моделі, що є вкрай ресурсозатратним процесом. Для подолання цієї проблеми дослідники пропонують різні техніки оптимізації [5, с. 1160], такі як використання пакетної обробки, паралелізму GPU та аналізу на рівні сегментів. Однак навіть наве-

Таблиця 1

Порівняння різних рівнів мутацій для моделей МН

Рівень мутації	Приклад	Переваги	Недоліки
Рівень тренувальних даних	Додавання шуму в дані, видалення частини вибірки, маніпуляція розподілом класів	Може симулювати реальні помилки розробників	Не відповідає класичному визначенню мутаційного аналізу, бо перевіряє модель, а не тестову вибірку моделі
Рівень тренувальної програми	Зміна архітектури моделі, модифікація гіперпараметрів, зміна функції активації	Мутації мають прямий вплив на модель	Не відповідає класичному визначенню мутаційного аналізу та мутації на цьому рівні часто роблять модель непрацездатною
Рівень навченої моделі	Модифікація ваг моделі, видалення шарів, зміна вихідних значень нейронів	Найбільш наближена до поняття «вихідного коду» на етапі експлуатації	Зміни на цьому рівні важко співвіднести з типовими помилками розробників

дені оптимізації не завжди забезпечують бажану ефективність, а використання існуючих підходів до систем МН потребує емпіричної апробації.

Ще одним важливим викликом є оцінка мутацій. У моделях МН розмір тестових вибірок зазвичай значно перевищує обсяг тестів у класичних програмних системах. Як результат, велика кількість тестових зразків значно підвищує ймовірність «вбивства» мутантів, що може суттєво вплинути на точність оцінки ефективності тестового покриття. Деякі автори пропонують нові метрики оцінки тестового покриття. Частина з них засновані на кластеризації [3, с. 104], а інші є спеціалізованими показниками для різних типів моделей МН [5, с. 1160]. Ці оцінки мають на меті замінити мутаційну оцінку, однак, на думку автора доцільніше сфокусуватися на комбінованому підході, де різні види оцінок доповнюють одна одну, забезпечуючи комплексне охоплення перевірки якості тестового покриття.

Мутаційний аналіз є ітеративним процесом, спрямованим на поступове вдосконалення тестів та покращення їх здатності виявляти потенційні помилки. Однак у випадку систем МН, де тестування відбувається шляхом перевірки моделі на тестовому наборі, особливу складність становить оновлення тестів. Нові тестові дані мають не лише задовольняти вимоги системи, а й відображати реалістичні сценарії, які можуть виникнути в процесі експлуатації.

Таким чином, процес адаптації мутаційного аналізу до систем з МН має ряд викликів, зокрема, невідповідність класичним гіпотезам, розробка реалістичних мутаційних операторів, оптимізація швидкодії аналізу, створення більш точних метрик та еволюція тестового набору. Для подолання цих викликів необхідно використовувати комплексний підхід, що враховує особливості моделей МН, їхню стохастичну природу та різницю у їх життєвому циклі в порівнянні з традиційними системами.

Задля розв'язання поставлених проблем, пропонується список рекомендацій для дослідників і розробників програмного забезпечення, які допоможуть не лише інтегрувати мутаційний аналіз у процес тестування моделей МН, а й зберегти першооснови класичного методу:

Чітко проводити межі між вихідним кодом та тестовим набором під час проєктування операторів мутацій. Це дозволить уникнути проблемних ситуацій, коли мутаціям помилково піддається тестовий код, що може призвести до викривлення результатів аналізу.

Оцінювати реалістичність та ефективність мутаційних операторів шляхом виконання емпіричних досліджень. Тестування операторів на широкій вибірці допоможе виявити найбільш ефективні техніки.

Консультуватися з експертами у сфері розробки моделей МН. Співпраця з фахівцями може допомогти у розробці реалістичних помилок, визначенні поняття «маленьких змін» у контексті моделей МН, мінімізації ризиків неконтрольованих відхилень у поведінці моделі та впровадженні механізму оновлення тестових наборів.

Оцінювати мутаційний аналіз для моделей МН з використанням комбінованого підходу. Це дозволить враховувати як класичні метрики покриття коду, так і спеціалізовані показники для моделей МН, забезпечуючи повнішу оцінку ефективності тестового набору.

Висновки. У даному дослідженні розглянуто особливості використання мутаційного тестування до систем МН. Проведений аналіз продемонстрував, що підходи до тестування мутаціями, які використовуються у традиційних системах, потребують відповідної адаптації до систем МН. Також були визначені виклики, які виникають в процесі адаптації: визначення поняття «вихідного коду», ефективність й реалістичність мутаційних операторів, швидкодія тестування та неточність оцінки мутації. У ході дослідження були запропоновані рекомендації спрямовані на розв'язання вищезгаданих проблем.

Подальші дослідження у цій сфері можуть бути пов'язані з проєктуванням реалістичних мутаційних операторів, визначенням комплексного підходу до оцінки якості тестового набору, а також оптимізацією швидкодії та зниження ресурсозатратності тестування. Ще одним потенційним напрямом досліджень є розв'язання концептуальних проблем, які пов'язані із розбіжностями між класичними принципами мутаційного аналізу та специфікою систем МН.

Список літератури:

1. Jia Y., Harman M. An Analysis and Survey of the Development of Mutation Testing. IEEE Transactions on Software Engineering. 2011. Vol. 37, no. 5. P. 649–678. URL: https://doi.org/10.1109/tse.2010.62 (date of access: 23.02.2025).

2. Zhu Q., Panichella A., Zaidman A. A systematic literature review of how mutation testing supports quality assurance processes. Software Testing, Verification and Reliability. 2018. Vol. 28, no. 6. P. e1675. URL: https://doi.org/10.1002/stvr.1675 (date of access: 23.02.2025).

3. DeepMutation: Mutation Testing of Deep Learning Systems / L. Ma et al. 2018 IEEE 29th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE), Memphis, TN, 15–18 October 2018. 2018. URL: https://doi.org/10.1109/issre.2018.00021 (date of access: 23.02.2025).

4. Shen W., Wan J., Chen Z. MuNN: Mutation Analysis of Neural Networks. 2018 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), Lisbon, 16–20 July 2018. 2018. URL: https://doi.org/10.1109/qrs-c.2018.00032 (date of access: 23.02.2025).

5. DeepMutation++: A Mutation Testing Framework for Deep Learning Systems / Q. Hu et al. 2019 34th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE), San Diego, CA, USA, 11–15 November 2019. 2019. URL: https://doi.org/10.1109/ase.2019.00126 (date of access: 23.02.2025).

6. Jahangirova G., Tonella P. An Empirical Evaluation of Mutation Operators for Deep Learning Systems. 2020 IEEE 13th International Conference on Software Testing, Validation and Verification (ICST), Porto, Portugal, 24–28 October 2020. 2020. URL: https://doi.org/10.1109/icst46399.2020.00018 (date of access: 23.02.2025).

7. Taxonomy of real faults in deep learning systems / N. Humbatova et al. ICSE '20: 42nd International Conference on Software Engineering, Seoul South Korea. New York, NY, USA, 2020. URL: https://doi.org/10.1145/3377811.3380395 (date of access: 23.02.2025).

8. Panichella A., Liem C. C. S. What Are We Really Testing in Mutation Testing for Machine Learning? A Critical Reflection. 2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering: New Ideas and Emerging Results (ICSE-NIER), Madrid, ES, 25–28 May 2021. 2021. URL: https://doi.org/10.1109/icse-nier52604.2021.00022 (date of access: 23.02.2025).

9. DeMillo R. A., Lipton R. J., Sayward F. G. Hints on Test Data Selection: Help for the Practicing Programmer. Computer. 1978. Vol. 11, no. 4. P. 34–41. URL: https://doi.org/10.1109/c-m.1978.218136 (date of access: 23.02.2025).

10. Offutt A. J. Investigations of the software testing coupling effect. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM). 1992. Vol. 1, no. 1. P. 5–20. URL: https://doi.org/10.1145/125489.125473 (date of access: 23.02.2025).

11. Hamlet R. G. Testing Programs with the Aid of a Compiler. IEEE Transactions on Software Engineering. 1977. SE-3, no. 4. P. 279–290. URL: https://doi.org/10.1109/tse.1977.231145 (date of access: 24.02.2025).

Lebediev A. V., Fedorova N. V. MUTATION ANALYSIS AND PROBLEMS OF ITS USE FOR MACHINE LEARNING MODELS

The article discusses the peculiarities of mutation analysis in machine learning (ML) systems. The analysis shows that classical mutation testing cannot be directly applied to ML systems without appropriate adaptation. The article describes in detail the main problems that arise during mutation analysis in ML systems, including the definition of 'source code', the development of efficient and realistic mutation operators, optimisation of the testing process speed and the need to improve methods for estimating mutation coverage. In addition, the article reviews the latest research on mutation analysis in the context of ML systems and provides a critical analysis of it.

The study offers a number of recommendations for researchers and software developers that will allow not only to integrate mutation testing into the ML models, but also to preserve the fundamental concepts of mutation analysis. In particular, the necessity of a clear distinction between source code and test suites, the creation of specialised mutation operators and the development of combined metrics for evaluating test coverage is substantiated. Moreover, the ways of optimising the computational complexity of mutation analysis used in existing tools are considered. The proposed solutions will help to improve the quality of testing of ML models and provide a more accurate assessment of their reliability.

The results of the study emphasise the importance of adapting classical testing methods to the features of ML systems to increase their efficiency and reliability. The conclusions determine the directions for further research in this area, including the development of new realistic mutation operators, optimisation of testing performance, and alignment of the main conceptual aspects of mutation analysis with the principles of operation of ML models. Further development of mutation analysis methods will make testing of ML models more reliable, structured and adaptive to the changing conditions of real-world applications

Key words: *mutation testing, mutation operators, quality of test sets, machine learning, machine learning models, processing of big data arrays.*

УДК 517.91(07)+517(075.8)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/16

Легеза В. П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нещадим О. М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дичка А. І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АЛГОРИТМІЧНИЙ МЕТОД ЛОКАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ НЕЯВНО ЗАДАНИХ ФУНКЦІЙ У ЯВНІЙ ФОРМІ

Розглянуто актуальну проблему зручного аналітичного представлення програмними засобами неявно заданої функції у явній формі. Показано, що одним із відомих теоретичних шляхів вирішення цієї проблеми є метод наближеного представлення неявно заданих функцій у вигляді скінченного відрізка степеневого ряду. Зазначено, що існуючий метод реалізує можливість попереднього аналітичного визначення похідних старших порядків неявно заданої функції з подальшим їх використанням для формування відповідного відрізка степеневого ряду. Встановлено, що цей метод має два істотних недоліки: 1) складність практичної реалізації багаторазового пошуку похідних старших порядків неявно заданої функції, оскільки ця процедура генерує дуже громіздкі вирази; 2) неможливість коректного оцінювання точності апроксимації отриманого наближення. Новий метод засновано на переході від неявного алгебраїчного рівняння до диференціального рівняння першого порядку. Отримане рівняння далі розв'язано методом послідовних наближень Пікара, який є конструктивним та алгоритмічним. Знайдено коректну оцінку точності апроксимації отриманого наближення.

Послідовні наближення $\{y_n(x)\}$ отримано у вигляді скінченних відрізків степеневого ряду. Використано величину $|y_n(x) - y(x)|$ як міру точності апроксимації функції $y(x)$. Продемонстровано техніку переоцінки точності апроксимації отриманого наближення, яка враховує результати попередніх ітерацій. Наведено приклад числової реалізації запропонованого методу, на якому було показано, що вже після третьої ітерації точність апроксимації локального подання функції становить $\sim 0{,}6 \cdot 10^{-6}$ на заданому проміжку. Відмічено суттєві переваги запропонованого методу перед існуючим підходом, які дозволяють: 1) обійти труднощі, пов'язані з багаторазовим та громіздким обчисленням похідних неявно заданої функції; 2) алгоритмізувати процес побудови функціональної послідовності $\{y_n(x)\}$, що є рівномірно збіжною до шуканої функції; 3) коректно оцінити точність апроксимації отриманого розв'язку.

Ключові слова: *неявно задана функція, метод послідовних наближень Пікара, відрізок степеневого ряду, міра точності апроксимації, переоцінка точності апроксимації, рівномірна збіжність, функціональна послідовність.*

Постановка проблеми. У ряді областей прикладної науки зростає інтерес до використання неявно заданих функцій в математичному моделюванні різних процесів. Водночас на сьогоднішній день відсутня практична можливість зручного аналітичного представлення програмними засобами неявно задану функцію $F(x, y(x)) = 0$ у явній формі $y = y(x)$.

Одним із відомих теоретичних шляхів вирішення цієї проблеми є метод наближеного представлення неявно заданих функцій у вигляді скінченного відрізка степеневого ряду. Цей метод (за певних умов) реалізує можливість попереднього аналітичного визначення похідних старших порядків неявно заданої функції з подальшим їх використанням для формування відповідного відрізка степеневого ряду. Проте цей метод має два істотних недоліки:

1) складність практичної реалізації багаторазового диференціювання неявно заданої функції, оскільки ця процедура генерує дуже громіздкі вирази;

2) неможливість коректного оцінювання точності апроксимації отриманого наближення.

Крім того, існують й інші недоліки та незручності при роботі з неявно заданими функціями. Наприклад, помилки, які накопичуються при складних обчисленнях (наприклад, при обробці даних) з використанням неявно заданих функцій можуть істотно спотворити уявлення про поведінку характеристик, що описуються цими функціями.

Таким чином, задача, що розглядається, є актуальною. Тому в цій статі пропонується новий, теоретично обгрунтований, метод локального представлення неявних функцій у явній формі, який є позбавленим перерахованих вище недоліків. Його можна з успіхом використовувати для практичних застосунків, в яких досліджуються графічні об'єкти в мультимедійних технологіях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У галузі комп'ютерних наук з'явилося багато робіт, у яких програмними засобами досліджуються графічні об'єкти на площині та на різних кривих поверхнях. В роботах [1, 2] продемонстровано використання ряду Тейлора, який є одним із потужних інструментів апроксимації складних функцій. В ряді робіт використовується комп'ютерне геометричне проектування (CAGD) – це сучасна дисципліна із галузі інформаційних технологій, в якій вивчаються обчислювальні аспекти геометричних об'єктів із застосуванням явно і неявно заданих функцій. Як зазначається в роботі [3], головним проривом у CAGD стала теорія кривих Без'є та поверхонь, яка пізніше була поєднана з методами B-сплайнів. Криві та поверхні Безьє були незалежно розроблені П. де Кастеляу в Citroën і П. Без'є в Rénault. CAGD вплинула на такі галузі, як медична візуалізація, географічні інформаційні системи, комп'ютерні ігри та наукова візуалізація. Комп'ютерна графіка є одним із найперших і найважливіших застосувань CAGD. В книзі [4] удосконалюються та розширюються знання про методи CAGD. В ній містяться розділи про криві та поверхні Без'є, B-сплайни, розквіти та багатосторонні патчі Без'є. В [4] також наведено матеріал про пірамідні алгоритми, які представляють унікальний підхід до розуміння, аналізу та обчислення найпоширеніших поліноміальних і сплайнових кривих і поверхневих схем, що використовуються в автоматизованому геометричному проектуванні, використовуючи метод динамічного програмування, заснований на рекурсивних пірамідах. Основною метою статті [5] було отримання явних інтегральних представлень неявних функцій, існування яких гарантує теорія неявних функцій. В ній наведено згадані формули представлення обернених функцій у дуже загальних рамках на загальних областях у кількох вимірах. В [6] досліджується представлення форми, реєстрація та моделювання за допомогою неявних функцій. З цією метою запропоновані нові методи глобальної та локальної реєстрації форм через вирівнювання відповідних перетворень відстані шляхом визначення цільових функцій, які мінімізують метрику між неявними представленнями форм.

У процесі інтегрування деяких видів диференціальних рівнянь їх розв'язки отримують у вигляді інтегралів в квадратурах по кожній змінній – неявно заданих функцій, локальні властивості яких легше досліджувати відомими диференціальними інструментами [7, 8]. У теорії нелінійних механічних коливань і при обробці сигналів амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) також отримують у вигляді неявних функцій $F(\omega, A(\omega)) = 0$, які для подальшого аналізу теж зручніше представити у явній формі $A = A(\omega)$ на певному частотному проміжку [9, 10].

Огляд робіт, опублікованих раніше у даному науковому напрямку, свідчить про те, що для вирішення цієї задачі потрібно застосувати інший підхід, який дозволяє зняти вищезгадані недоліки існуючого методу з використанням багаторазового диференціювання неявно заданої функції. Новий метод засновано на переході від неявного алгебраїчного рівняння до диференціального рівняння першого порядку. Це рівняння далі розв'язується методом послідовних наближень Пікара [7, 8], який є конструктивним та алгоритмічним. Крім того, він дає можливість коректно оцінити точність апроксимації отриманого наближення.

Постановка завдання. Мета дослідження – розробити обґрунтований алгоритмічний метод локального подання неявно заданої функції у явній формі з використанням наближеного інтегрування відповідного диференціального рівняння ітераційним методом Пікара.

Виклад основного матеріалу. Теоретичне обгрунтування нового методу. Нехай неявна функція $y = y(x)$ представлена наступним рівнянням:

$$F(x, y(x)) = 0. \qquad (1)$$

Припустимо, що функція (1) є однозначною і задовольняє три наступні умови [7]:

1) функція $F(x, y)$ є визначеною і неперервною, як функція двох змінних разом зі своїми частинними похідними F'_x і F'_y в деякому околі точки $M(x_0, y_0)$;

2) функція $F(x, y)$ в точці $M(x_0, y_0)$ дорівнює нулю: $F(x_0, y_0) = 0$;

3) Похідна F'_y в точці $M(x_0, y_0)$ не дорівнює нулю, $F'_y(x_0, y_0) \neq 0$.

Тоді на інтервалі $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ функція $y = y(x)$ має неперервну похідну $y'(x)$, яка визначається за формулою:

$$y'(x) = -\frac{F'_x(x, y(x))}{F'_y(x, y(x))}. \quad (2)$$

Позначимо праву частину рівняння (2) через $f(x, y)$ та розглянемо диференціальне рівняння першого порядку:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y), \quad (3)$$

разом із початковою умовою

$$y(x_0) = y_0. \quad (4)$$

Запропонований підхід полягає у переході від сформульованої вище задачі Коші (3)–(4) до еквівалентного їй інтегрального рівняння, яке далі розв'язується методом послідовних наближень Пікара. Відповідні вимоги, які исуваються до функції $f(x, y)$, викладені в теоремі, яка наведена нижче [7, 8].

Теорема Пікара. Нехай функція $f(x, y)$ визначена в прямокутнику

$$\Pi: \{ |x - x_0| \leq a, \ |y - y_0| \leq b\}, \text{ де } a < b, \quad (5)$$

з центром у точці (x_0, y_0), причому в П функція $f(x, y)$ задовольняє дві умови:

1) $f(x, y)$ є неперервною за сукупністю двох незалежних змінних (x, y), та відповідно, є обмеженою в П: $|f(x, y)| \leq M$, де M – додатна стала;

2) $f(x, y)$ задовольняє умову Ліпшиця відносно змінної y:

$$|f(x, y_2) - f(x, y_1)| \leq L|y_2 - y_1|. \quad (6)$$

де L – додатня стала Ліпшиця, а (x, y_1) і (x, y_2) – довільні точки з прямокутника П. Тоді вірними є наступні твердження:

А) рівняння (3) має єдиний розв'язок $y = y(x)$, який задовольняє початкову умову $y(x_0) = y_0$, і який є визначеним і неперервно-диференційовним на відрізку $|x - x_0| \leq h$, де $h = \min\left(a, \frac{b}{M}\right)$;

Б) розв'язок $y = y(x)$ не виходить за межі прямокутника П за умови $|x - x_0| \leq h$, тобто $|y - y_0| \leq b$, якщо $|x - x_0| \leq h$.

Наведемо основні кроки обгрунтування процедури переходу від диференціального рівняння (3) до відповідного йому інтегрального рівняння.

Перший крок – заміна розв'язання задачі Коші на розв'язання еквівалентного їй інтегрального рівняння. Нехай шуканий розв'язок $y = y(x)$ встановлено. Підставимо його у рівняння (3) і отримаємо тотожність:

$$\frac{dy(x)}{dx} \equiv f(x, y(x)), \quad |x - x_0| \leq h. \quad (7)$$

Інтегруємо обидві частини рівняння (7) в межах від x_0 до x. Тоді, враховуючи початкову умову (4), дістанемо:

$$y(x) \equiv y_0 + \int_{x_0}^{x} f(x, y(x)), \quad |x - x_0| \leq h. \quad (8)$$

Розглянемо інтегральне рівняння:

$$y(x) = y_0 + \int_{x_0}^{x} f(x, y(x))dx. \quad (9)$$

Зазначимо, що невідома функція $y(x)$ входить в обидві частини рівняння (9).

Означення. Розв'язком рівняння (9) називають функцію $y = y(x)$, яка перетворює це рівняння на тотожність на деякому інтервалі зміни змінної x.

Порівнюючи рівняння (8) та (9), зазначимо, що шуканий розв'язок (8) задачі Коші є одночасно розв'язком інтегрального рівняння (9).

Покажемо (тепер вже в зворотньому порядку), що кожен розв'язок $y = y(x)$ інтегрального рівняння (9), який є визначеним і неперервним на проміжку $|x - x_0| \leq h$, і не виходить за межі області П, також є розв'язком задачі Коші (3)–(4). Спочатку зазначимо, що початкові умови (4) автоматично виконуються. Перевіримо справедливість рівняння (3). Справді, маємо тотожність (8). Підінтегральна функція $f(x, y(x))$ є функцією однієї змінної x, яка є неперервною на проміжку $|x - x_0| \leq h$. Це випливає з теореми про неперервність складеної функції [7], оскільки функція $f(x, y)$ є неперервною на проміжку $|x - x_0| \leq h$ і не виходить за межі області П, якщо $|x - x_0| \leq h$. Тому інтеграл (8) можна диференціювати за змінною верхньою межею x. Після диференціювання (8) за змінною x, дістанемо вираз (7). Тим самим доведено, що $y = y(x)$ є розв'язком рівняння (3).

Оскільки задача Коші (3)–(4) і інтегральне рівняння (9) є еквівалентними (рівносильними), достатньо визначити розв'язок інтегрального рівняння (9), яке має зазначені вище властивості.

Другий крок – побудова рекурентної послідовності функцій-наближень до шуканого розв'язку. Розв'язок інтегрального рівняння (9) будемо шукати методом послідовних наближень Пікара. Цей метод полягає в побудові за деяким

алгоритмом рекурентної послідовності функцій $\{y_n(x)\}$, яка є збіжною до шуканого розв'язку. Кожну з функцій цієї послідовності називають наближенням до шуканого розв'язку.

За нульове (вихідне) наближення $y_0(x)$ приймаємо функцію, яка тотожно дорівнює початковому значенню вихідного розв'язку:

$$y_0(x) = y_0. \tag{10}$$

Геометрично це означає, що замість точного розв'язку $y = y(x)$ обирають пряму $y = y_0$, яка є паралельною осі OX та проходить через початкову точку. Далі підставимо нульове наближення в праву частину інтегрального рівняння (9) і після інтегрування дістанемо функцію $y_1(x)$. Приймаємо цю функцію як перше наближення

$$y_1 = y_0 + \int_{x_0}^{x} f(x, y_0)dx. \tag{11}$$

Використовуючи перше наближення (11), обираємо аналогічну функцію як друге наближення:

$$y_2 = y_0 + \int_{x_0}^{x} f(x, y_1)dx. \tag{12}$$

Продовжуючи цю рекурентну процедуру, на n-му кроці дістанемо:

$$y_n = y_0 + \int_{x_0}^{x} f(x, y_{n-1})dx. \tag{13}$$

Якщо у виразі (13) спрямувати кількість інтегрувань до нескінченності ($n \to \infty$), то в результаті отримаємо нескінченну функціональну послідовність, яка є рівномірно збіжною до граничної функції $y(x)$ [8]:

$$y_0(x), y_1(x), y_2(x), \ldots, y_n(x), \ldots. \tag{14}$$

Наведемо оцінку відхилення наближеного розв'язку $y_n(x)$ від шуканої функції $y(x)$ [8]:

$$\left| y_n(x) - y(x) \right| \le M \cdot L^n \cdot h^{n+1}/(n+1)!,$$
$$\left| x - x_0 \right| \le h, \tag{15}$$

де h, M, L – відповідні сталі, які згадані в теоремі Пікара.

Зазначимо, що метод Пікара, завдяки своїй алгоритмічності, є ще й конструктивним, оскільки дозволяє побудувати таку послідовність функцій $\{y_n(x)\}$ (14), яка є одною-єдиною і рівномірно збіжною до своєї граничної функції $y(x)$. Крім того, завдяки цьому підходу можна коректно оцінити величину відхилення наближеного розв'язку $y_n(x)$ від шуканої функції $y(x)$ за формулою (15).

Числова реалізація запропонованого методу. Розглянемо неявно задану функцію та відповідну початкову умову

$$F(x, y(x)) = \operatorname{arctg}(y/x) - \ln\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right) - \pi/2 = 0,$$
$$y(0) = 1. \tag{16}$$

Потрібно в деякому околі точки $x_0 = 0$ представити задану функцію в явній формі.

Після визначення похідної y' неявно заданої функції (16) дістанемо наступну задачу Коші:

$$y' = \frac{x + y}{x - y}, \quad y(0) = y_0 = 1. \tag{17}$$

Застосуємо до цієї задачі Коші описаний вище метод послідовних наближень Пікара. Наближені розв'язки будуємо в області Π_1, межі якої визначаються такими нерівностями Π_1: $\{\left|x\right| \le 1/3;$ $\left|y - 1\right| \le 1/3\}$. Таким чином, маємо: $a = b = 1/3$ (в позначеннях теореми Пікара). Далі обчислюємо значення $M = 3$, $L = 6$ для оцінки точності апроксимації (15). В межах області Π_1 теорема Пікара забезпечує існування розв'язку на проміжку $\left|x\right| \le h_1$, де $h_1 = \min(a, b/M) = \min(1/3, 1/9) = 1/9$.

Наведемо результати комп'ютерного експерименту з визначення членів функціональної послідовності $\{y_n(x)\}$. В кожній з ітерацій обмежимося відрізком степеневого ряду із семи доданків.

$$y_1(x) = 1 + \int_0^x \frac{x+1}{x-1}dx =$$

$$= 1 + \int_0^x (-1 - 2x - 2x^2 - 2x^3 - 2x^4 - 2x^5)dx =$$

$$= 1 - x - x^2 - \frac{2x^3}{3} - \frac{x^4}{2} - \frac{2x^5}{5} - \frac{x^6}{3}.$$

$$y_2 = 1 + \int_0^x \frac{x + y_1(x)}{x - y_1(x)}dx = \left| \frac{x + y_1}{x - y_1} \to series \right| =$$

$$= 1 - x - x^2 - \frac{4x^3}{3} - \frac{5x^4}{2} - \frac{76x^5}{15} - \frac{193x^6}{18}.$$

$$y_3 = 1 + \int_0^x \frac{x + y_2(x)}{x - y_2(x)}dx = \left| \frac{x + y_2}{x - y_2} \to series \right| =$$

$$= 1 - x - x^2 - \frac{4x^3}{3} - \frac{5x^4}{2} - \frac{16x^5}{3} - \frac{221x^6}{18}.$$

$$y_4 = 1 + \int_0^x \frac{x + y_3(x)}{x - y_3(x)}dx = \left| \frac{x + y_3}{x - y_3} \to series \right| =$$

$$= 1 - x - x^2 - \frac{4x^3}{3} - \frac{5x^4}{2} - \frac{16x^5}{3} - \frac{221x^6}{18}.$$

Наступні ітерації, починаючи з четвертої, дають однакові перші сім членів степеневого ряду. Оскільки в наступних викладках використовуються перші сім членів степеневого ряду, то оцінку точності апроксимації будемо виконувати для тої ітерації, в якій вони вперше з'явилися в такому вигляді, а саме, в третій ітерації: $y_3(x)$. Отже, в результаті застосування цієї процедури отримали відрізок степеневого ряду, який вже після трьох ітерацій апроксимує шукану функцію з точністю:

$$\begin{aligned} &\left| y_3(x) - y(x) \right| \le 3 \cdot 6^3 \cdot 9^{-4}/4! \Rightarrow \\ &\Rightarrow \left| y_3(x) - y(x) \le 1/243. \right. \end{aligned} \tag{18}$$

Перевизначення оцінки апроксимації. Отримана оцінка точності наближеного розв'язку є дуже грубою; насправді точність апроксимації є набагато вищою. В цьому нескладно пересвідчитися за допомогою тої ж формули (15). Встановимо нову область Π_2 для оцінки похибки після другої ітерації. Нагадаємо, що в процесі першої ітерації було встановлено: $M = \sup\limits_{\Pi_1} \left| f(x, y) \right| = 3$ та $\left| x \right| \le 1/3$. З рівняння (17) знайдемо обмеження на тангенс кута нахилу дотичної y' до шуканої інтегральної кривої: $\left| y' \right| \le 3$. Отже, інтегральна крива є більш пологою, ніж пряма $y = 3x$. А це означає, що ця крива не може вийти за межі прямокутника Π_2: $\{ \left| x \right| \le 1/9;\ \left| y - 1 \right| \le 1/3 \}$.

Перевизначимо значення M та L із врахуванням зміни області П. Після визначення найбільшого значення $f(x, y) = (x + y)/(x - y)$ в області Π_2 дістанемо: $M = 7/5$. Для найбільшого значення похідної на множині Π_2 отримаємо: $L = \sup\limits_{\Pi_2} f'_y(x, y) = \sup\limits_{\Pi_2} \left\{ 2x/(x-y)^2 \right\} = 18/25$. Перевіримо, чи не змінилася величина h, яка визначає проміжок зміни змінної x в області П. Нагадаємо, що на першому кроці $h_1 = 1/9$. В результаті обчислень дістанемо h_2

$$h_2 = \min(h_1, b/M) = \min(1/9, 5/21) = 1//9.$$

Отже, величина h не змінилася. Тепер можна оцінити, як зміниться похибка апроксимації (15) шуканої функції після зміни області П:

$$\left| y_2(x) - y(x) \right| \le \frac{7}{5} \cdot \left(\frac{18}{25} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{9} \right)^3 \cdot \frac{1}{3!} \approx 0{,}00017.$$

Таким чином, відрізок степеневого ряду $y_2(x)$ вже після другої ітерації подає неявно задану функцію $y(x)$ з високою точністю: 0,00017.

Опускаючи проміжні обчислення, наведемо результати переоцінювання похибки апроксимації функції $y(x)$ після третьої ітерації. Область П, в якій проводилася оцінка, зміниться так: Π_3: $\{ \left| x \right| \le 1/9;\ \left| y - 1 \right| \le 7/45 \}$. Обчислимо величини M і L для прямокутника Π_3: $M = 43/33$, $L = 50/1121$. Тепер можна навести результат з переоцінки похибки апроксимації після третьої ітерації

$$\left| y_3(x) - y(x) \right| \le \frac{43}{33} \cdot \left(\frac{50}{121} \right)^3 \cdot \left(\frac{1}{9} \right)^4 \cdot \frac{1}{4!} \approx 5{,}839 \cdot 10^{-7}.$$

Як бачимо, похибка апроксимації порівняно із початковим варіантом (18) суттєво зменшилась, причому вже після третьої ітерації маємо оцінку похибки ~0,6 · 10^{-6}, тому наступне збільшення числа ітерацій не потрібне.

Крім того, теорема Пікара встановлює, що отриманий розв'язок $y(x)$ є визначеним і неперервно диференційовним на проміжку $\left| x \right| \le 1/9$. На рис. 1 наведено порівняльні графіки точного *yExact* та наближеного $f(x)$ розв'язків поставленої задачі, з яких видно, що в зазначеній області Π_3 графіки збігаються.

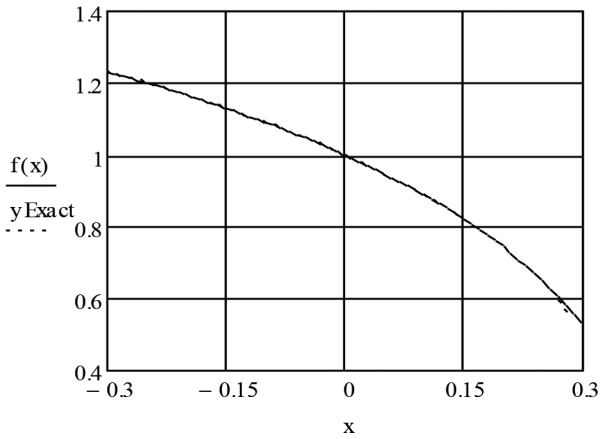


Рис. 1. Порівняльні графіки точного *yExact* та наближеного *f*(*x*) розв'язків

Висновки. У роботі обґрунтовано новий підхід до розв'язання задачі про наближене локальне представлення неявно заданої функції (1) скінченним відрізком степеневого ряду. Цей підхід заснований на перетворенні неявного алгебраїчного рівняння у диференціальне рівняння першого порядку, яке далі розв'язується методом послідовних наближень Пікара. Послідовні наближення $\{y_n(x)\}$ отримані у вигляді скінченних відрізків степеневого ряду. Як міра точності апроксимації функції $y(x)$ розглядалась величина $\left| y_n(x) - y(x) \right|$. У роботі продемонстровано техніку переоцінки точності апроксимації отриманого наближення, що враховує результати попередніх ітерацій. Для ілюстрації наведено приклад числової реалізації запропонованого методу, який показав, що

вже після третьої ітерації точність апроксимації локального подання функції становить ~0,6 · 10^{-6} на заданому проміжку. Переваги запропонованого підходу полягають у тому, що він дає можливість: 1) обійти труднощі, пов'язані з багаторазовим та громіздким обчисленням похідних неявно заданої функції; 2) алгоритмізувати процес побудови функціональної послідовності $\{y_n(x)\}$, що є рівномірно збіжною до шуканої функції; 3) коректно оцінити точність апроксимації отриманого розв'язку.

Список літератури:

1. Kong Q., Siauw T., Bayen A.M. Chapter 18 – Taylor series. *Python Programming and Numerical Method* / Kong Q., Siauw T., Bayen A.M. Elsevier. 2021. P. 315–323. https://surl.li/bmfvnw
2. Kong Q., Siauw T., Bayen A.M. Chapter 22 – Ordinary Differential Equations (ODEs) Initial-Value Problems. *Python Programming and Numerical Method* / Kong Q., Siauw T., Bayen A.M. Elsevier. 2021. P. 371–398. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819549-9.00032-4
3. Farin G. Curves and Surfaces for CAGD. A Practical Guide. Elsevier. 2002. 499 p. https://doi.org/10.1016/B978-1-55860-737-8.X5000-5
4. Goldman R. Pyramid Algorithms: A Dynamic Programming Approach to Curves and Surfaces for Geometric Modeling. Elsevier. 2002. 576 p.
5. Castro L.P., Murata K., Saitoh S., Yamada M. Explicit integral representations of implicit functions. Carpathian J. Math. 2013. Vol. 29, № 12, P. 141–148. http://www.jstor.org/stable/43999533
6. Krim H. Yezzi A. Statistics and Analysis of Shapes. Boston, Birkhäuser, 2006. 430 p. https://doi.org/10.1007/0-8176-4481-4
7. Agarwal R.P., O'Regan D. An Introduction to Ordinary Differential Equations. Springer, New York. 2008. 322 p. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71276-5_8
8. Boyce W.E., Di Prima R.C., Meade D.B. Elementary differential Equations and Boundary Value Problems. New York, Wiley&Sons. 2017. 610 p.
9. Weaver W.Jr., Timoshenko S.P., Young D.H. Vibration Problems in Engineering. New York, Wiley&Sons, 1990. 624 p.
10. Легеза В., Атаманюк О., Прищепа Д. Використання методу Пікара для представлення неявно заданих функцій у явній формі. *Прикладна математика і комп'ютинг*: праці 13-ї наук. конф. ПМК-2020 (Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 18–20 листопада 2020). Київ, 2020. С. 215–220.

Leheza V.P., Neshchadym O.M., Dychka A.I. AN ALGORITHMIC METHOD OF LOCAL REPRESENTATION OF IMPLICITLY DEFINED FUNCTIONS IN AN EXPLICIT FORM

The current problem of manual analytical representation by software of implicitly specified functions in an explicit form is considered. It is shown that one of the most common theoretical approaches to this problem is the method of approximate representation of implicitly specified functions in the form of a finite segments of a power series. It is stated that the original method implements the possibility of a forward analytical value of similar higher orders of an implicitly specified function with their further vicoristans for the formation of a separate section of the power series. It has been established that this method has two significant drawbacks: 1) the complexity of the practical implementation of multiple searches for higher-order derivatives of an implicitly given function, since this procedure generates very cumbersome expressions; 2) the impossibility of correctly assessing the accuracy of the approximation of the obtained approximation.

The new method is based on the transition from implicit algebraic equation to first-order differential equation. The obtained equation is then solved by the Picard method of successive approximations, which is constructive and algorithmic. A correct estimate of the accuracy of approximation of the selected proximity has been found. Successive approximations $\{y_n(x)\}$ are obtained in the form of finite segments of a power series. The value $|y_n(x) - y(x)|$ is used as a measure of the accuracy of the approximation of the function $y(x)$. A technique for re-estimating the accuracy of the approximation of the obtained approximation, which takes into account the results of previous iterations, is demonstrated. An example of a numerical implementation of the proposed method is given, which shows that after the third iteration the accuracy of the approximation of the local representation of the function is ~0,6 · 10^{-6} on a given interval. Significant advantages of the proposed method over the existing approach are noted, which allow: 1) to circumvent the difficulties associated with multiple and cumbersome calculations of the derivatives of an implicitly given function; 2) to algorithmize the process of constructing a functional sequence $\{y_n(x)\}$ that is uniformly convergent to the desired function; 3) to correctly estimate the accuracy of the approximation of the obtained solution.

Key words: *implicitly specified function, Picard method of successive approximations, power series segment, approximation accuracy measure, approximation accuracy reassessment, uniform convergence, functional sequence.*

УДК 004.412:519:25
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/17

Макарова Л. М.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Латанська Л. О.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Семенчук І. М.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДНОСТІ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ 2D ІГОР НА ОСНОВІ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ КЛАСАМИ

Щороку на рушії Unity розробляється велика кількість ігор, яка постійно зростає. Понад 50 % всіх мобільних ігор розробляються на цьому рушії, а загальна кількість нових ігор на різних платформах може сягати тисяч. На Unity виходить від 6000 до 10 000 ігор щороку тільки на платформі Steam. Якщо врахувати мобільні платформи, наприклад, App Store та Google Play, інді-ігри та менші платформи, ця цифра значно зростає і може перевищувати 20 000–30 000 нових ігор щороку.

Оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування (ООП) є ключовим аспектом у галузі розробки програмного забезпечення, оскільки рівень складності архітектури має вагомий впливав на якість та ефективність продукту в майбутньому. Невірна оцінка складності проектування може призвести до ускладнень, пов'язаних із додатковими витратами, проблемами у підтримці, модифікації та масштабуванні продукту.

Метою роботи є підвищення достовірності оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проєктування на основі аналізу зв'язків між класами 2D ігор з відкритим кодом, створених на ігровому рушії Unity.

Для розв'язання поставленої задачі було застосовано методи теорії ймовірності, математичної статистики та багатовимірного статистичного аналізу.

Завданням дослідження є розробка математичної моделі для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор, розроблених на рушії Unity, аналіз зв'язків між метриками RFC та CBO з врахуванням їхньої кореляції та створення програмного забезпечення для реалізації цієї моделі.

За результатами роботи було удосконалено рівняння еліпсу передбачення метрик RFC та CBO для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор, розроблених на рушії Unity на основі нормалізуючого перетворення у формі десяткового логарифму із врахуванням викидів у даних та врахування кореляції між метриками RFC та CBO, що дозволяє підвищити достовірність оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор, розроблених на рушії Unity.

Ключові слова: *об'єктно-орієнтоване проектування, оцінювання складності проектування, зв'язки між класами, еліпс передбачення, 2D ігри, Unity.*

Постановка проблеми. Сучасна індустрія розробки ігор стикається з викликами, пов'язаними із складністю об'єктно-орієнтованого проектування. Оцінювання складності через зв'язки між класами є важливим аспектом, оскільки воно безпосередньо впливає на подальші витрати та ефективність підтримки, оновлення ПЗ. Відомо, що метрики ПЗ, такі як CBO (Coupling Between Objects) та RFC (Response for Class), можуть слугувати інструментами для такого оцінювання [1]. Однак традиційний аналіз цих метрик зазвичай виконується окремо, без урахування їхньої кореляції на рівні проекту. Відповідно до [2] рекомендоване значення RFC має складати від 0 до 50, високе значення RFC ускладнює тестування, клас стає складним для розуміння. Рекомендоване значення CBO від 1 до 5 [3], якщо значення CBO перевищує 14 – це свідчить про надмірну зв'язаність, що є показником невдалої архітектури [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В ряді робіт [5–7] було запропоновано підхід для визначення складності об'єктно-орієнтованого проекту-

вання через зв'язки між класами на основі еліпсу передбачення для нормалізованих метрик RFC та CBO, зокрема, в роботі [5] – на рівні застосунку для проектів з відкритим кодом на Java, в роботі [6] – для перевірки взаємозв'язків між частинами Java-застосунків, в роботі [7] – для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами комп'ютерних ігор.

Проте, в парадигмі розробки ігор високі значення метрик RFC і CBO, які значно перевищують рекомендовані значення є частим явищем, значення RFC для певних класів може дорівнювати сотням, а CBO – десяткам. Тому розробка математичної моделі, яка дозволить оцінювати складність об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор, розроблених на рушії Unity, за значеннями метрик FRC і CBO з урахуванням їх кореляції на рівні застосунку є актуальною.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення достовірності оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проєктування на основі аналізу зв'язків між класами 2D ігор з відкритим кодом, створених на ігровому рушії Unity.

Завданням дослідження є розробка математичної моделі для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор, розроблених на рушії Unity, аналіз зв'язків між метриками RFC та CBO з врахуванням їхньої кореляції та створення програмного забезпечення для реалізації цієї моделі.

Збір метрик програм, що використовують 2D графічний рушій Unity, та попередня обробка даних були виконані в роботі [8]; для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор було використано підхід оснований на побудові еліпсу передбачення для нормалізованих метрик RFC та CBO, який було представлено в ряді робіт [5–7].

Для досягнення поставленої мети роботи необхідно виконати наступні завдання:

– провести дослідження існуючих моделей для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами у 2D іграх, зокрема, розроблених на рушії Unity;

– виконати побудову математичної моделі для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор, розроблених на рушії Unity, з використанням нормалізуючого перетворення;

– перевірити якість побудованої математичної моделі шляхом її валідації (тестування) на незалежних проектах, які не використовувалися при побудові моделі.

Виклад основного матеріалу. Перевірка багатовимірної нормальності полягає в тому, щоб перевірити, чи багатовимірна асиметрія та ексцес узгоджуються з багатовимірним нормальним розподілом [9]. Для вибірки $X_1, X_2, \ldots, X_n$, що складається з $1 \times k$ векторів:

$$\beta_{1,k} = \frac{1}{n^2}\sum_{i-1}^{n}\sum_{j=1}^{n} m_{ij}^3, \quad (1)$$

$$\beta_{2,k} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} m_{ii}^2, \quad (2)$$

де: $m_{ij} = (X_i - \bar{X})^T S^{-1}(X_j - \bar{X})$, $S = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(X_j - \bar{X}\right)\left(X_j - \bar{X}\right)^T$.

Фактично використовуються вибіркові значення асиметрії та ексцесу, які отримуються шляхом множення значення багатовимірних асиметрії і ексцесу, описаних вище, на $(n/(n-1))^3$ та $(n/(n-1))^2$ відповідно.

Якщо вибірка походить із багатовимірного нормального розподілу, тоді:

$$\frac{n}{6}\beta_{1,k} \sim X^2(df), \quad (3)$$

$$\left[\beta_{2,k} - k(k+2)\right]\sqrt{\frac{n}{8k(k+2)}} \sim N(0,1),$$

де: a – рівень значущості, k – розмірність, df – параметр можна розрахувати за формулою:

$$df = \frac{k(k+1)(k+2)}{6}.$$

Критичне значення для багатовимірної асиметрії може бути отримане з формули (3):

$$\beta_{1,critical} = X^2_{a,df}. \quad (4)$$

Для багатовимірного ексцесу існує 2 кордони, нижній та верхній, які розраховуються за наступними формулами [10]:

$$\beta_{2,lower} = E[\beta_2] - z_a \cdot o'[\beta_2], \quad (5)$$

$$\beta_{2,upper} = E[\beta_2] - z_a \cdot o'[\beta_2], \quad (6)$$

де: $E[\beta_2] = k(k+2)$, $o'[\beta_2] = \sqrt{\frac{8k(k+2)}{n}}$, $z_a = \Phi^{-1}(1 - a/2)$.

Практично доведено, якщо дані мають багатовимірний нормальний розподіл, то розподіл квадрату відстані Махаланобіса поводиться як розподіл χ^2. Для великих вибірок даних, відстань

d_i^2 повинна вести себе приблизно як незалежні випадкові величини $\chi^2_{m,a}$. Тут $\chi^2_{m,a}$ – це квантиль розподілу χ^2 з рівнем значущості a. Якщо значення величини квадрату відстані Махаланобіса для певної пари даних більше за квантиль розподілу χ^2, то такі значення розглядаються як викиди і відкидаються. Цей процес повторюється доки всі значення квадрату Махаланобіса не будуть меншими чи дорівнювати квантилю розподілу χ^2.

Значення квадрату відстані Махаланобіса для кожної багатовимірної точки даних i, $i = 1,2, \ldots, N$, визначається як:

$$d_i^2 = (Z - \overline{Z})^T - S_N^{-1}(Z - \overline{Z}), \quad (7)$$

де: $\overline{Z}$ – вектор вибіркових середніх, S_N – вибіркова коваріаційна матриця:

$$S_N = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Z_i - \overline{Z}\right)\left(Z_i - \overline{Z}\right)^T, \quad (8)$$

де: Z_i – гаусівський випадковий вектор $Z = \{Z_1, Z_2, \ldots, Z_m\}^T$ для кожної багатовимірної точки даних i, $i = 1,2, \ldots, N$, m – кількість компонентів вектору Z.

Вектор Z отримують шляхом перетворення негаусівського випадкового вектору $X = \{X_1, X_2, \ldots, X_m\}^T$ за допомогою нормалізуючого перетворення десяткового логарифма:

$$Z_i = LG(X_i). \quad (9)$$

Для десяткового логарифму формула оберненого перетворення матиме вигляд:

$$X_i = 10^{Zi}. \quad (10)$$

Рівняння еліпсу передбачення для нормалізованих даних визначається як [11]:

$$(Z - \overline{Z})^T - S_N^{-1}(Z - \overline{Z}) = \frac{2(N^2-1)}{N(N-2)}F_{2,N-2,a}, \quad (11)$$

де Z – це гаусівський випадковий вектор, $Z = \{Z_1, Z_2\}^T$, $\overline{Z}$ – вектор вибіркових середніх, $\overline{Z} = \{\overline{Z}_1, \overline{Z}_2\}$, N – кількість точкових даних (в нашому випадку $N = 33$), $F_{2,N-2,a}$ – квантиль F розподілу з 2 та $N - 2$ ступенями вільності, a – рівень значущості, S_N – вибіркова коваріаційна матриця.

Ліва частина рівняння (11) є квадратом відстані Махаланобіса. Відповідно до [12], тестова статистика для квадрату відстані Махаланобіса d_i^2 може бути розрахована наступним чином:

$$\frac{N(N-2)d_i^2}{2(N^2-1)}, \quad (12)$$

яка має F розподіл з 2 та $N - 2$ ступенями свободи.

Для побудови математичної моделі для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор, розроблених на рушії Unity, була використана вибірка двовимірних негаусівських даних, а саме значення метрики RFC на рівні всього застосунку, та значення метрики CBO на рівні всього застосунку з 50 проєктів 2D ігор, розроблених на рушії Unity.

Виконавши оцінку за критерієм Мардіа за формулами (1), (2), було зроблено висновок, що двовимірний розподіл даних не є гаусівським. За рівня значущості $a = 0{,}005$ розраховане значення асиметрії $\beta_{1,2} = 57{,}08$, відповідно до формули (4) критичне значення $\beta_{1,2,0.005,50} = 14{,}86$. Розраховане значення ексцесу $\beta_{2,2} = 21{,}52$, відповідно до формули (5) нижня критична межа для ексцесу $\beta_{2.2.0.005,50,lower} = 4{,}76$, а верхня межа, розрахована за формулою (6), $\beta_{2.2.0.005,50,upper} = 11{,}24$. Отримані значення асиметрії і ексцесу значно більші за критичні значення, й розподіл суттєво відрізняється від нормального. Тому для виявлення викидів у даних використовуємо метод, оснований на нормалізуючих перетвореннях і квадраті відстані Махаланобіса.

Для подальшого аналізу треба виконати нормалізацію зібраних даних за допомогою десяткового логарифму за формулою (9) та видалити викиди за допомогою квадрату відстані Махаланобіса за формулою (7).

Нормалізовані дані метрик RFC, CBO та значення квадрату відстані Махаланобіса представлено у таблиці 1.

Для рівня значимості 0,005 максимальне значення χ^2 становить 10,6. Виходячи з цього, видаляємо набори з найбільшим значенням d_i^2, які більші за 10,6. На першій ітерації було знайдено й видалено проект № 27, значення d_i^2 якого склало 24,442. На наступній ітерації було знайдено і видалено проект № 16, значення d_i^2 якого на другому етапі склало 10,62. На третій ітерації набору даних з значенням d_i^2, більшим за максимальне значення χ^2, знайдено не було, з чого можна зробити висновок, що викиди з вибірки успішно видалені.

Виконаємо тест Мардіа ще раз, для перевірки нормальності розподілу отриманого набору даних. Розраховане значення асиметрії $\beta_{1,2} = 0{,}92$, що менше за критичне значення $\beta_{1,2,0.005,48} = 14{,}86$. Розраховане значення ексцесу $\beta_{2,2} = 9{,}39$, отримане значення знаходиться в проміжку між нижнім і верхнім критичним значенням ексцесу [4,76; 11, 24]. Отже, отримані значення асиметрії та ексцесу відповідають нормальному розподілу при

Таблиця 1

Значення нормалізованих метрик RFC та CBO та квадрату відстані Махаланобіса

№	LG(RFC)	LG(CBO)	d_i^2	№	LG(RFC)	LG(CBO)	d_i^2
1	0,7844	–0,5836	2,7818	26	0,8788	–0,2478	1,5063
2	1,1409	–0,3010	0,3803	27	**1,4634**	**1,4634**	**24,4420**
3	1,0132	–0,3358	0,4671	28	1,3064	0,0348	0,4735
4	1,1736	–0,0286	0,0820	29	0,7677	–0,2430	3,2571
5	1,1644	–0,0969	0,0069	30	0,9360	–0,6214	2,1543
6	1,0614	–0,2846	0,2412	31	1,2888	0,0146	0,3721
7	1,4771	–0,0872	2,7813	32	1,3262	0,1600	0,8186
8	1,0719	–0,2218	0,1249	33	1,3090	–0,0314	0,5064
9	1,1206	–0,0177	0,2326	34	1,2900	–0,3010	1,5216
10	1,2163	–0,1383	0,1531	35	0,9196	–0,0263	2,0842
11	1,0940	–0,3802	0,6299	36	1,2820	0,0580	0,3932
12	0,7924	–0,6990	3,3461	37	0,7469	–0,4771	3,0263
13	1,2216	0,1850	0,8883	38	1,1663	0,1829	1,1070
14	1,0604	–0,2171	0,1507	39	1,3424	0,0378	0,7028
15	1,0719	–0,3979	0,6787	40	1,1065	–0,2553	0,1529
16	**1,8808**	**0,3590**	**10,2872**	41	1,6510	0,0726	5,4122
17	0,9461	–0,3522	0,8107	42	1,2394	0,0272	0,2243
18	0,9379	–0,3222	0,8380	43	0,9938	–0,1727	0,5367
19	0,8391	–0,1139	2,7562	44	1,5359	–0,1532	4,4731
20	1,3526	0,0452	0,7785	45	1,2041	0,0669	0,3240
21	0,8921	–0,3979	1,2753	46	1,2124	–0,1597	0,1816
22	1,2054	0,0307	0,2059	47	1,1983	–0,1047	0,0530
23	1,1292	0,0774	0,6202	48	1,0592	0,0621	1,0366
24	1,1441	0,2711	2,0590	49	0,8285	–0,8016	4,0635
25	1,3546	–0,6021	6,3277	50	1,2377	–0,1461	0,2732

рівні значущості $a = 0{,}005$. За наведеним результатом можна зробити висновок, що отриманий набір даних не відхиляється суттєво від двовимірного нормального розподілу.

Дані, наведені у таблиці 1, були використані для побудови рівняння еліпсу передбачення для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор, розроблених на рушії Unity, за формулою (12). Коваріаційна матриця S_N, згідно з (8), має вигляд:

$$S_N = \begin{pmatrix} 0{,}0047 & 0{,}0308 \\ 0{,}0308 & 0{,}0613 \end{pmatrix}.$$

Для цієї матриці обернена матриця є наступною:

$$S_N^{-1} = \begin{pmatrix} 31{,}7496 & -15{,}9632 \\ -15{,}9632 & 24{,}3419 \end{pmatrix}.$$

Вектор випадкових середніх $\overline{Z}$ має вигляд: $\overline{Z} = \{1{,}1219; -0{,}1614\}$. Рівень значущості a приймаємо на рівні 0,005.

Тестову статистику (12) було використано для побудови рівняння еліпса передбачення для нормалізованих даних метрик RFC і CBO. Побудований еліпс передбачення представлений на рисунку 1.

Відповідно до [13], трансформований еліпс передбачення може бути отриманий на основі побудованого еліпсу передбачення для нормалізованих даних з використанням оберненого перетворення за формулою (10).

Використаємо цю функцію до еліпсу передбачення для нормалізованих даних RFC та CBO, та побудуємо трансформований еліпс передбачення для метрик RFC та CBO для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проетування 2D ігор на рушії Unity, який наведено на рисунку 2.

На рисунку 3 продемонстровано практичне використання отриманої моделі на прикладі 10 незалежних проектів, які не брали участі у побудові даної моделі. Дані метрик проектів вказані у таблиці 2.

За результатами тестування можна зробити висновок, що два проекти мають недосконалу архітектуру, а саме BulletRaid та Unity-Wander-In-Color-Game.

Висновки. В роботі було побудовано математичну модель для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через

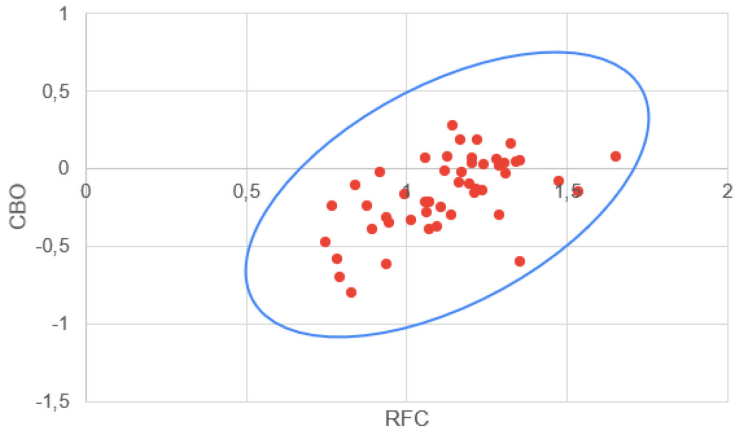


Рис. 1. Еліпс передбачення для нормалізованих метрик RFC та CBO

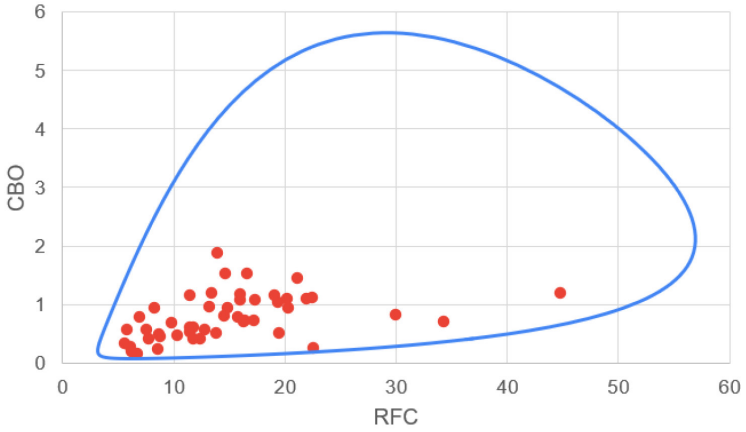


Рис. 2. Трансформований еліпс передбачення для метрик RFC та CBO

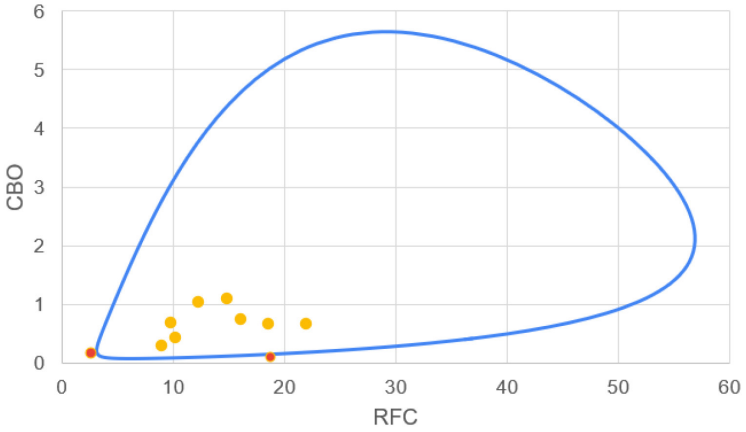


Рис. 3. Тестування моделі на даних реальних проектів

зв'язки між класами 2D ігор, розроблених на рушії Unity, для чого:

– виконано перевірку багатовимірної нормальності за допомогою критерію Мардіа;

– виконано перевірку даних на наявність викидів за допомогою квадрату відстані Махаланобіса (SMD);

– здійснено побудову рівняння еліпсу передбачення для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор на рушії Unity для даних, нормалізованих за допомогою нормалізуючого перетворення натуральним логарифмом, та рівняння трансформованого еліпсу передбачення для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор на рушії Unity. Зазначене рівняння у порівнянні з існуючими математичними моделями враховує

Таблиця 2

Набір проектів для перевірки якості побудованої моделі

Назва проєкту	RFC avg	CBO avg
2D-TowerDefense	16,1250	0,7500
FantasyTrip	10,2000	0,4223
BulletRaid	**18,5556**	**0,6667**
Faceless	22,0108	0,6559
Unity-Wander-In-Color-Game	**2,6866**	**0,1493**
Innerclash	9,7872	0,6809
Unfinished (business)	12,2941	1,0294
Ezra's Escape	14,9091	1,0909
Unity-2D-Game-Template	18,8000	0,0923
Glitch-Garden	9,0000	0,3000

як кореляцію між метриками RFC та CBO, так і те, що їх розподіл не є гаусівським;

– було перевірено практичне використання побудованої моделі на прикладі 10 проектів, які не брали участі у побудові даної моделі.

Отримані результати свідчать про те, що для побудови рівняння трансформованого еліпсу передбачення для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор на рушії Unity, потрібно використовувати нормалізуючі перетворення з урахуванням викидів у даних. Це дозволяє підвищити достовірність оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами 2D ігор на рушії Unity.

Список літератури:

1. Chidamber S., Kemerer C. A metrics suite for object oriented design. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 20(6). P. 476–493.
2. Response for Class (RFC). URL: https://www.cachequality.com/docs/metrics/response-for-class (дата звернення: 10.10.2024).
3. Sahraoui H.A., Godin R., Miceli T. Can metrics help to bridge the gap between the improvement of OO design quality and its automation? Software Maintenance: 2000 International Conference (ICSM). San Jose, USA. P. 154–162.
4. Chidamber S., Kemerer C. Object-oriented metrics suite. URL: https://www.aivosto.com/project/help/pm-oo-ck.htm (дата звернення: 15.10.2024).
5. Prykhodko S., Prykhodko N. A Technique for Detecting Software Quality Based on the Confidence and Prediction Intervals of Nonlinear Regression for RFC Metric. *Computer Sciences and Information Technologies: 2022 IEEE 17th International Conference (CSIT-2022, Lviv, Ukraine)*. P. 499-502. DOI: https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000532
6. Приходько С.Б., Смикодуб Т.Г. Математична модель для перевірки взаємозв'язків між частинами Java-застосунків за метриками RFC та CBO. *Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції «Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи: (ITMAS – 2021)»*. Миколаїв, 2021. С. 25–26.
7. Папакін М.М., Приходько С.Б. Математична модель для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами комп'ютерних ігор та розробка програми для її реалізації. *Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції «Інноваційні технології: моделі, алгоритми, системи (ITMAS-2024)»*. Миколаїв, 2022. С. 50–51.
8. Семенчук І.М., Макарова Л.М. Попередня обробка інформації для оцінювання складності розробки 2D ігор, що створювалися на ігровому рушії Unity. *Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці»*. Миколаїв, 2023. С. 467–469.
9. Zaiontz C. Real statistics using Excel. Multivariate Normality Testing (Mardia). URL: https://real-statistics.com/multivariate-statistics/multivariate-normal-distribution/multivariate-normality-testing/ (дата звернення: 08.11.2024).
10. Wulandari D., Sutrisno, Bayu Nirwana M. Mardia's Skewness and Kurtosis for Assessing Normality Assumption in Multivariate Regression. *Enthusiastic international journal of statistics and data science*. 2021. vol. 1, issue 1. P. 1–6. URL: https://journal.uii.ac.id/enthusiastic (дата звернення 12.11.2024).
11. Chew V. Confidence, prediction and tolerance regions for the multivariate normal distribution. *Journal of the American Statistical Association*. 1966. vol. 61, issue 315. P. 605-617. URL:https://doi.org/10.2307/2282774 (дата звернення: 20.11.2024).
12. Afifi A.A., Azen S.P. Statistical analysis: a computer-oriented approach. New York; London : Academic Press, 1972.
13. Приходько С.Б., Резниченко М.В. Математична модель для оцінювання складності об'єктно-орієнтованого проектування через зв'язки між класами застосунків з відкритим кодом на Java. *Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції «Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи: (ITMAS–2022)»*. Миколаїв, 2022. С. 6–7.

Makarova L. M., Latanska L. O., Semenchuk I. M. MATHEMATICAL MODELING FOR ASSESSING THE COMPLEXITY OF OBJECT-ORIENTED DESIGN IN 2D GAMES BASED ON CLASS INTERRELATIONSHIPS

Every year, a significant number of games are developed using the Unity engine, and this number continues to grow. Over 50 % of all mobile games are created on this engine, and the total number of new games across different platforms can reach thousands. On Steam alone, Unity accounts for 6,000 to 10,000 new games annually. When considering mobile platforms such as the App Store and Google Play, as well as indie games and smaller platforms, this figure increases significantly and may exceed 20,000–30,000 new games per year.

Assessing the complexity of object-oriented design (OOD) is a key aspect of software development, as the complexity of an architecture significantly impacts the quality and efficiency of a product in the future. An inaccurate assessment of design complexity can lead to challenges related to additional costs, maintenance issues, modifications, and product scalability.

The aim of this study is to improve the accuracy of object-oriented design complexity assessment based on the analysis of class interrelationships in open-source 2D games developed using the Unity game engine.

To achieve this goal, methods of probability theory, mathematical statistics, and multivariate statistical analysis were applied.

The research objectives include the development of a mathematical model for evaluating the complexity of object-oriented design based on class interrelationships in 2D games created on the Unity engine, an analysis of the relationships between the RFC and CBO metrics considering their correlation, and the creation of software to implement this model.

As a result of this study, the prediction ellipse equation for the RFC and CBO metrics was refined to assess object-oriented design complexity based on class interrelationships in 2D games developed on the Unity engine. This refinement was achieved using a normalization transformation in the form of a decimal logarithm, taking into account data outliers and the correlation between RFC and CBO metrics. The proposed approach enhances the reliability of object-oriented design complexity assessment based on class interrelationships in Unity-based 2D games.

Key words: *object-oriented design, design complexity assessment, class interrelationships, prediction ellipse, 2D games, Unity.*

УДК 004.412.2:519.237.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/18

Макарова Л. М.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Камінський С. С.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Бризгалов М. В.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРУ 2D-ЗАСТОСУНКІВ НА ОСНОВІ ГРАФІЧНИХ РУШІЇВ

Розглянуто проблему оцінювання розміру програмних застосунків, що використовують 2D графічні рушії. Це питання є актуальним, оскільки достовірне прогнозування розміру програмного коду впливає на ефективність розробки та оцінювання необхідних ресурсів. Однак існуючі підходи до оцінювання розміру програмних продуктів часто не враховують специфічні особливості програмування для 2D графічних рушіїв, що призводить до неточностей у розрахунках. Виникає необхідність у створенні нових моделей, які б дозволяли більш точно передбачати розмір коду, необхідний для реалізації застосунків цього типу.

З метою розв'язання цієї проблеми запропоновано математичну модель, що враховує ключові метрики програмного забезпечення, такі, як кількість класів у програмному коді, кількість методів у класах та глибину дерева наслідування. Для підвищення достовірність оцінювання застосовано нормалізуюче перетворення у вигляді десяткового логарифму. Також у моделі використано методи регресійного аналізу, які дозволяють будувати достовірні прогнози розміру застосунків залежно від вхідних параметрів. Аналіз результатів показав, що запропонована модель дозволяє отримати достовірну оцінку розміру програмного забезпечення, що дає змогу оптимізувати процес розробки, покращити планування ресурсів і зменшити ризики перевищення бюджету проекту.

На основі запропонованої математичної моделі розроблено програмне забезпечення для оцінювання розміру застосунків. Проведено тестування програмного забезпечення, яке підтвердило достовірність прогнозування метрики KLOC (кількість рядків коду) у порівнянні з існуючими моделями для мов програмування Java, C# та PHP.

Результати дослідження можуть бути корисними для розробників та менеджерів проєктів, які працюють із застосунками на основі 2D графічних рушіїв. Вони сприяють підвищенню ефективності розробки, дозволяючи обґрунтовано передбачати обсяг програмного коду та необхідних ресурсів, що є важливим фактором у процесі створення високоякісного програмного забезпечення.

Ключові слова: *оцінювання розміру програмного забезпечення, 2D графічні рушії, метрики програмного забезпечення, нелінійна регресійна модель, нормалізуюче перетворення.*

Постановка проблеми. Зі зростанням використання 2D графічних рушіїв у розробці ПЗ, оцінювання розміру таких програмних застосунків стає важливою частиною процесу управління розробкою. Особливості архітектури програм, що використовують 2D графічні рушії, створюють додаткові складнощі в оцінюванні їхнього розміру в порівнянні зі стандартними моделями [1].

Традиційні метрики, такі як, кількість тисяч рядків коду (KLOC), кількість класів (NC), кількість методів на клас (NM) та глибина дерева наслідування (DIT), є ключовими показниками для оцінювання розміру ПЗ [2]. Однак стандартні моделі, розроблені для інших платформ та мов програмування, не завжди можуть ефективно враховувати специфіку 2D графічних рушіїв, що може призводити до неточностей у прогнозуванні.

Особливо актуальним це питання стає при розробці проектів з використанням 2D графічних рушіїв, де традиційні моделі оцінювання, такі як COCOMO II [3], показують свою обмеженість. Специфіка таких проектів включає в себе складні системи рендерингу, управління ресурсами та оптимізацію пам'яті, системи обробки користувацького вводу та компоненти фізичного моделювання. Саме тому дану проблему можна вважати актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінювання розміру ПЗ є важливим етапом у процесі розробки, оскільки дозволяє визначити обсяг

роботи, необхідні ресурси та час для реалізації проекту. Існуючі моделі оцінювання розміру ПЗ можна поділити на кілька категорій: лінійні регресійні моделі, нелінійні регресійні моделі, моделі на основі машинного навчання та експертні системи. Кожна з моделей має свої переваги та обмеження, що впливають на точність та ефективність оцінювання розміру програмного продукту.

Лінійні регресійні моделі, хоча і є простими для використання та інтерпретації, часто не можуть точно описати складні взаємозв'язки між метриками ПЗ. Дослідження показують, що зв'язки між показниками розміру програмного продукту, такими як кількість рядків коду та кількість класів і методів, мають нелінійний характер [4–6]. Існують моделі для оцінювання розміру ПЗ, написаного, зокрема, на Java, PHP та C#, які ґрунтуються на припущеннях структури і організації коду, що потребує адаптації методів оцінювання розміру ПЗ під конкретні умови розробки. Розглянемо більш детально деякі з цих моделей.

Модель оцінювання розміру веб-додатків на Java базується на кількості класів як незалежній змінній Використано два підходи до нормалізації: одновимірне перетворення Джонсона та десяткове логарифмічне перетворення. Аналіз показав, що точність моделі потребує покращення, зокрема використання багатовимірного перетворення Джонсона [4].

Для C#-додатків побудована багатофакторна модель з урахуванням кількості класів та кількості методів на клас. Модель показала високу точність, проте не враховує глибину дерева наслідування, що може впливати на архітектуру застосунків [5].

Модель для веб-застосунків для фреймворку Symfony, яка включає три фактори: кількість класів, середню кількість методів на клас і глибину дерева наслідування, краще відповідає задачам аналізу архітектури застосунків [6]. Але її використання для оцінювання розміру ПЗ з використанням 2D графічних рушіїв є обмеженим, оскільки модель зосереджується на архітектурних характеристиках, а не на безпосередніх показниках обсягу коду, що знижує її достовірність у прогнозуванні зусиль на розробку або масштабування проєкту.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення достовірності оцінювання розміру програмних застосунків, що використовують 2D графічні рушії, за рахунок удосконалення відповідної математичної моделі, що забезпечить більш високу достовірність прогнозування розміру на ранніх етапах розробки.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

– дослідити наявні методи оцінювання розміру ПЗ;

– визначити ключові метрики для оцінювання розміру застосунків, що створюються за допомогою 2D графічних рушіїв;

– розробити математичну модель для оцінювання розміру програмних проектів, що створюються за допомогою 2D графічних рушіїв;

– реалізувати програмне забезпечення для оцінювання розміру на основі розробленої моделі.

Виклад основного матеріалу. У процесі оцінювання розміру програмного забезпечення, зокрема при розробці моделей для прогнозування KLOC, перевірка багатовимірної нормальності даних є важливим етапом. Багато статистичних методів, включно з регресією, базуються на припущенні нормальності розподілу. Одним із основних підходів для перевірки багатовимірної нормальності є тест Мардіа (Mardia's Test), який оцінює асиметрію та ексцес багатовимірного розподілу через статистичні показники $\beta_{1,p}$ та $\beta_{2,p}$ [7, 8].

Коефіцієнт асиметрії $\beta_{1,p}$ обчислює симетрію багатовимірного розподілу, враховуючи кореляцію між змінними [8]:

$$\beta_{1,p} = \frac{1}{N}\sum_{i-1}^{N}\sum_{j-1}^{N}\left\{(X_i - \bar{X})^T S^{-1}(X_j - \bar{X})\right\}^3, \qquad (1)$$

де N – кількість спостережень, X_i – вектор i-го спостереження, $\bar{X}$ – середній вектор, S^{-1} – обернена коваріаційна матриця.

Про негаусівський розподіл даних свідчить значення багатовимірного ексцесу $\beta_{2,p}$, оцінка якого визначається як [8]:

$$\beta_{2,p} = \frac{1}{N}\sum_{i-1}^{N}\left\{(X_i - \bar{X})^T S_N^{-1}(X_i - \bar{X})\right\}^2. \qquad (2)$$

Якщо значення $\beta_{1,p}$ і $\beta_{2,p}$ вказують на відхилення від нормальності, може знадобитися застосування методів, що не залежать від нормальності розподілу, або проведення трансформацій даних для наближення їх до нормального вигляду.

Для пошуку викидів у багатовимірних даних можна використати квадрат відстані Махаланобіса, який зважає на взаємозв'язки між змінними [9]:

$$d_i^2 = (X_i - \bar{X})^2 S_N^{-1}(X_i - \bar{X}), \qquad (3)$$

де $\bar{X}$ – вектор вибіркових середніх, S_N^{-1} – обернена коваріаційна матриця.

Дані для побудови нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру програмних застосунків з 2D графічними рушіями були зібрані зі 108 проєктів, які знаходяться у відкритому доступі в репозиторії GitHub і проаналізовані за допомогою інструменту SourceMeter [10]. Метрики NC, NM та DIT використовувалися для оцінювання розміру застосунку в тисячах рядків коду KLOC. Фрагмент даних наведено в таблиці 1.

Після перевірки даних на нормальність за допомогою критеріїв Мардіа, оцінки асиметрії $\beta_{1,p}$ згідно (1) та ексцесу $\beta_{2,p}$ згідно (2), було встановлено, що дані не відповідають нормальному розподілу. Результати перевірки: $\beta_{1,p} = 139{,}97$, що перевищує критичне значення 40,00, $\beta_{2,p} = 179{,}22$, що також значно перевищує критичне значення 28,58. Це свідчить про суттєві відхилення від нормальності у розподілі даних.

Далі було виконано пошук викидів у багатовимірних негаусівських даних з використанням квадрату відстані Махаланобіса (3) та нормалізацією через десятковий логарифм відповідно до [11]. Квантіль розподілу Пірсона для рівня значущості 0,005 та 4 ступенів вільності склав 14,86. Оскільки є такі дані, для яких квадрат відстані Махаланобіса більший за квантіль розподілу Пірсона, такий спостережуваний набір даних слід вважати викидом та вилучити з вихідної вибірки [12].

Після видалення викидів залишилась вибірка із 103 застосунків. Максимальне значення квадрату відстані Махаланобіса дорівнює 12,91 та не перевищує квантіль розподілу Пірсона, тому можна зробити висновок, що передобробка даних завершена.

Далі дані були розподілені на навчальну та тестову вибірки. Навчальна вибірка становила 60 % від загального обсягу (59 застосунків) і використовувалася для побудови моделі. Тестова вибірка, що становила 40 % (44 застосунки), застосовувалася для перевірки якості моделі.

Розподіл вибірок здійснено з урахуванням збереження мінімальних і максимальних значень метрик, що забезпечило репрезентативність даних та достовірність оцінювання моделі.

Оскільки емпіричні дані не мають нормального розподілу, для прогнозування розміру побудовано нелінійну регресійну модель з використанням нормалізації десятковим логарифмом, аналогічно роботі [13].

Після обчислень були отримані наступні значення коефіцієнтів рівняння регресії: $\beta_0 = -1{,}7566$, $\beta_1 = 0{,}5425$, $\beta_2 = 0{,}5816$, $\beta_3 = -0{,}1212$.

Таким чином, остаточно нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру програмних застосунків, що використовують 2D графічні рушії, має вигляд:

$$\hat{Y} = 10^{-1{,}7566} \cdot X_1^{0{,}5425} \cdot X_2^{0{,}5816} \cdot X_3^{-0{,}1212}.$$

Розрахунок параметрів якості нелінійної регресійної моделі здійснюється для оцінювання

Таблиця 1

Фрагмент даних для оцінювання розміру застосунків, що використовують 2D графічні рушії

№	URL	KLOC	NC	NM	DIT
1	https://github.com/azurite-engine/Azurite	15,57	165	2023	76
2	https://github.com/rafael-esper/JLud2D	57,512	318	3959	109
3	https://github.com/dillanspencer/Quad-Engine	2,319	24	284	2
4	https://github.com/tombefieux/2DPhysicsEngine	1,18	12	160	17
5	https://github.com/j-ackyao/KY-Engine	2,327	22	740	21
6	https://github.com/Flafla2/Remote2D-Engine	14,413	137	2032	137
7	https://github.com/fastjengine/FastJ	24,886	194	3304	185
8	https://github.com/benblaszczak/BobEngine	10,136	104	2626	186
9	https://github.com/mlabouardy/2dgamesdk-engine	0,174	6	30	2
10	https://github.com/b3dgs/lionengine	129,428	1323	16249	1544
11	https://github.com/gurkenlabs/litiengine	71,476	604	13553	486
12	https://github.com/vanZeben/2D-Game-Engine	1,376	24	200	14
13	https://github.com/nicolasgramlich/AndEngine	54,229	636	16773	1098
14	https://github.com/jbox2d/jbox2d	52,36	349	6808	242
15	https://github.com/AlmasB/FXGL	47,328	586	7097	349
16	https://github.com/sriharshachilakapati/SilenceEngine	30,133	286	3243	153
17	https://github.com/codepath/android_simple_game_engine	0,54	11	157	12
18	https://github.com/swordmaster2k/rpgwizard	24,967	290	3272	151
19	https://github.com/kennycason/java_games	7,675	119	1843	204
20	https://github.com/SypherEngine/SypherEngine	4,755	56	616	33

її достовірності та адекватності. Для перевірки якості моделі використаємо такі параметри: коефіцієнт детермінації R^2, скоригований коефіцієнт детермінації $R^2_{Adjusted}$, середню абсолютну відносну похибку (*MMRE*) та *PRED*(0,25) [13].

Результати оцінювання для навчальної та тестової вибірок:

– Навчальна вибірка: R^2 = 0,9302, $R^2_{Adjusted}$ = = 0,9264, *MMRE* = 0,2438, *PRED*(0,25) = 0,5254.

– Тестова вибірка: R^2 = 0,8459, $R^2_{Adjusted}$ = = 0.8338, *MMRE* = 0,2630, *PRED*(0,25) = 0,5476.

Побудована нелінійна регресійна модель показує прийнятні результати прогнозування на обох вибірках. Значення R^2, більші за 0,8, свідчать про ефективне пояснення варіації змінної KLOC. Низькі значення *MMRE* свідчать про достатню надійність побудованої моделі. Водночас, отриманий рівень показника *PRED*(0,25) вказує на необхідність подальшого вдосконалення моделі, зокрема, шляхом застосування інших нормалізуючих перетворень при оцінюванні розміру програмних застосунків, створених із використанням 2D графічних рушіїв.

Висновки. У роботі удосконалено математичну модель для оцінювання розміру програмних застосунків, що працюють на 2D графічних рушіях. Модель використовує метрики кількість класів NC, кількість методів у класі NM та глибину дерева наслідування DIT для прогнозування розміру у тисячах рядків коду KLOC. Було проведено збір та аналіз даних із 108 проєктів, які знаходяться у відкритому доступі в репозиторії GitHub та використовують 2D графічні рушії. Після ретельної обробки даних та видалення викидів, було сформовано вибірку із 103 застосунків, яка послужила основою для побудови моделі.

Загалом, побудована нелінійна регресійна модель дозволяє адекватно оцінювати розмір програмних продуктів, які працюють на 2D графічних рушіях, що є важливим для підвищення достовірності оцінювання обсягу відповідного ПЗ і для покращення планування його розробки. Результати, отримані на тестовій вибірці, підтвердили ефективність моделі, що проявилася у значній достовірності прогнозних оцінок.

У межах дослідження було реалізовано програмний засіб для автоматизації оцінювання розміру застосунків, створених на основі 2D графічних рушіїв, який здійснює аналіз даних та побудову регресійної моделі з урахуванням визначених метрик. Зазначений інструмент може бути корисним у практичній діяльності розробників відповідного програмного забезпечення.

Список літератури:

1. Liu J. Design and development of 2D game “Adventurous spirit”. *Proceedings of the 2023 International Conference on Machine Learning and Automation*. P. 102–109. DOI: 10.54254/2755-2721/37/20230482

2. Software Metrics. URL: https://www.imagix.com/links/software-metrics.html (дата звернення: 12.01.25).

3. Pratama R. Y., Sarno R., Sholiq. Optimizing COCOMO II Parameters Using Artificial Bee Colony Method. *11th International Conference on Information & Communication Technology and System (ICTS)*. October 2017. P. 125–129. DOI: 10.1109/ICTS.2017.8265657

4. Макарова Л. М., Приходько Н. В., Кудін О. О. Побудова нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру веб-додатків, реалізованих мовою Java. *Вісник ХНТУ*. 2019. № 2(69). С. 145–153.

5. Петриченко С. А., Пухалевич А. В. Багатофакторна нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру вебзастосунків, що створюються з використанням мови програмування C#. *Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи (ITMAS – 2023)»* (30–31 жовтня 2023 р., м. Миколаїв). Миколаїв : НУК імені адмірала Макарова, 2023. С. 40–42.

6. Латанська Л. О., Кольцов А. В. Нелінійна регресійна модель для оцінювання кількості строк коду веб-застосунків, що створюються з використанням PHP фреймворку Symfony. *Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи (ITMAS – 2022)»* (26–28 жовтня 2022 р., м. Миколаїв). Миколаїв : НУК імені адмірала Макарова, 2022. С. 10–11.

7. Multivariate Normality Testing (Mardia). URL: https://real-statistics.com/multivariate-statistics/multivariate-normal-distribution/multivariate-normality-testing/ (дата звернення: 14.01.25).

8. Mardia K. V. Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications. *Biometrika*. 1970. Vol. 57. P. 519–530. DOI: https://doi.org/10.1093/biomet/57.3.519

9. Відстань Махаланобіса. URL: https://askom.gitbooks.io/-/content/23_rasstoyanie_mahalanobisa.html (дата звернення: 16.01.25).

10. SourceMeter. URL: https://sourcemeter.com (дата звернення: 12.12.24).

11. Prykhodko S., Prykhodko N., Makarova L., Pukhalevych A. Outlier Detection in Non-Linear Regression Analysis Based on the Normalizing Transformations. *Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, IEEE. (Lviv-Slavske, 2020). P. 407–410.

12. Камінський С. С., Бризгалов М. В., Макарова Л. М. Математична модель для оцінювання розміру програмних застосунків, що використовують 2D графічні рушії. *Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції «Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи (ITMAS–2024)»*. (30–31 жовтня 2024 р., м. Миколаїв). Миколаїв, НУК імені адмірала Макарова, 2024. С. 69–70.

13. Prykhodko S. B., Prykhodko N. V., Koltsov A. V. A Nonlinear Regression Model for Early LOC Estimation of Open-Source Kotlin-Based Applications. *Radio Electronics Computer Science Control*. April 2024. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-1-8

Makarova L. M., Kaminsky S. S., Bryzgalov M. V. MATHEMATICAL MODELING FOR SIZE ESTIMATION OF 2D APPLICATIONS BASED ON GRAPHICS ENGINES

The aim of this work is to address the problem of estimating the size of software applications that utilize 2D graphics engines. This issue is relevant, since reliable prediction of the size of program code affects the efficiency of development and estimation of the required resources. However, existing approaches to estimating the size of software products often do not take into account the specific features of programming for 2D graphics engines, which leads to inaccuracies in calculations. There is a need to create new models that would allow more accurate prediction of the code size required to implement applications of this type.

To solve this problem, we propose a mathematical model that takes into account key software metrics, such as the number of classes in the program code, the number of methods in the classes, and the depth of the inheritance tree. To increase the reliability of the estimation, a normalizing transformation in the form of a decimal logarithm is applied. The model also uses regression analysis methods that allow making reliable predictions of application size depending on the input parameters. The analysis of the results showed that the proposed model allows obtaining a reliable estimate of the software size, which makes it possible to optimize the development process, improve resource planning and reduce the risks of exceeding the project budget.

Based on the proposed mathematical model, software for estimating the size of applications was developed. The software was tested, which confirmed the reliability of predicting the KLOC metric (number of lines of code) in comparison with existing models for Java, C#, and PHP programming languages.

The results of the study can be useful for developers and project managers working with applications based on 2D graphics engines. They help to increase development efficiency by allowing to reasonably predict the amount of program code and resources required, which is an important factor in the process of creating high-quality software.

Key words: *software size estimation, 2D graphics engines, software metrics, nonlinear regression model, normalizing transformation.*

УДК 004.89
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/19

Медведєв М. Г.
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

Саган А. О.
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

ПРОГРАМНИЙ ПІДХІД ДО ПОШУКУ ВТРАЧЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОБОТОТЕХНІЦІ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА АНАЛІЗУ ПАТЕНТІВ

У роботі представлено програмний метод для виявлення забутих технологій у робототехніці шляхом аналізу патентних даних із застосуванням методів машинного навчання та обробки природної мови (NLP). Підхід розроблено на основі огляду літератури та програмних інструментів для аналізу патентів, таких як бази даних USPTO і Google Patents. Метод реалізовано на мові Python із використанням бібліотек Selenium для парсингу веб-сторінок, BeautifulSoup для обробки HTML, Pandas для структурування даних і бібліотеки Transformers (модель distilgpt2) для генерації ідей практичного застосування. Аналіз базується на наборі з 50 патентів у сфері робототехніки, датованих до 2000 року, включно з патентом «Recursive methods for world-to-joint transformation for a robot manipulator» від 1985 року, який описує методи керування роботами-маніпуляторами..

Процес охоплює кілька етапів: збір даних із Google Patents за допомогою скрипту google_patents.py, збереження даних у файлі CSV, класифікацію описів патентів як теоретичних чи практичних, а також виявлення втрачених технологій із пропозиціями щодо їх відродження. Критерії «втраченості» включають вік патенту (понад 20 років), низьку частоту цитування та відсутність застосування у промисловості. Технічна реалізація передбачає багатопотоковий парсинг, обробку тексту, оцінку актуальності та генерацію ідей.

Результатом є метод, який не лише визначає забуті технології, а й пропонує способи їхнього сучасного використання. Наприклад, патент «Recursive methods...» визнано «втраченим» через брак цитувань із 1990-х, а distilgpt2 згенерувала ідеї адаптації його алгоритмів для сучасних промислових роботів. Цей підхід цінний для інженерів-робототехніків, які прагнуть відродити старі ідеї для інноваційних рішень у промисловості, дослідженнях і навчальних проєктах.

Ключові слова: *штучний інтелект, робототехніка, аналіз патентів, Python, машинне навчання, генерація тексту, втрачені технології, обробка даних, NLP, інновації.*

Постановка проблеми. Сьогодні робототехніка активно розвивається, але значна кількість ідей із старих патентів залишається поза увагою через складність їхнього пошуку чи втрату інтересу з часом. Завдяки сучасним методам машинного навчання та аналізу великих даних з'явилася можливість виявити ці «забуті» технології й адаптувати їх до актуальних потреб. Проте існують труднощі: величезний обсяг патентів у базах даних, неоднозначність оцінки їхньої цінності, часткова відсутність інформації про старі розробки, складність автоматичної класифікації текстів патентів і генерації ідей для їхнього використання. Ринок робототехніки постійно еволюціонує під впливом нових технологій, економічних факторів і запитів суспільства, що ускладнює пошук потенційно корисних старих рішень. Дані про патенти часто неповні – наприклад, інформація про цитування чи схожі документи може бути відсутньою або застарілою. Визначення «втраченості» технології вимагає врахування багатьох параметрів, таких як вік, кількість згадок чи актуальність для сучасності. До того ж описи старих патентів можуть бути складними для аналізу через застарілу термінологію чи специфіку викладу. Важливість цього дослідження полягає в тому, що виявлення забутих технологій може прискорити інновації в робототехніці, надати інженерам готові ідеї та зменшити витрати на розробку вже винайденого. Це корисно для студентів, дослідників і компаній, які створюють роботів для промисловості, медицини чи побуту.

Для вирішення цієї задачі необхідно виконати такі кроки: зібрати дані про патенти у сфері робототехніки з відкритих джерел, проаналізувати їх за віком, цитуваннями та статусом, а також за рівнем

технологічної актуальності; визначити критерії «втраченості» (наприклад, старий рік публікації, відсутність сучасних аналогів чи низька комерціалізація); розробити алго-ритм для автоматичного виявлення таких патентів; створити модель для генерації практичних ідей їхнього використання; перевірити ефективність методу на реальних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пошук втрачених технологій у робототехніці через аналіз патентів – це перспективний напрям, хоча в літературі вже є схожі підходи. Наприклад, у статті 'The state-of-the-art on Intellectual Property Analytics (IPA)' [1] автори аналізують методи обробки природної мови (NLP) та машинного навчання для обробки патентів у базі USPTO, включаючи виявлення застарілих ідей. Вони використовували класифікацію тексту для оцінки актуальності, але не зосереджувалися на робототехніці чи практичних рекомендаціях У роботі 'Using machine learning patent analysis to identify technology gaps' [2] дослідники за допомогою машинного навчання аналізували патенти в базі European Patent Office (EPO), виявляючи технологічні прогалини. Їхні результати показали, що старі розробки можуть бути корисними за сучасних умов, хоча конкретних застосувань не пропонувалося.

Окремі дослідження комбінують аналіз патентів із генеративними моделями. Наприклад, у статті 'Artificial Intelligence Exploring the Patent Field' [3] автори тестували моделі типу GPT для аналізу патентів, але не для пошуку втрачених технологій. Вони підкреслили, що такі моделі ефективні для творчих завдань, але потребують ретельного налаштування промптів. У контексті робототехніки книга 'Robotics: A Very Short Introduction' [4] згадує, що ідеї 1980-х, як-от методи керування рухами роботів, залишилися недооціненими через технічні обмеження того часу. Цей підхід вирізняється тим, що не лише ідентифікуються втрачені патенти, а й генеруються конкретні ідеї їхнього використання за допомогою моделі distilgpt2.

Серед програмних рішень для роботи з патентами є Google Patents – безкоштовний сервіс для пошуку за ключовими словами, але без аналізу «втраченості» чи потенціалу. PatentScope від WIPO пропонує базовий пошук, але не підтримує машинне навчання. Платформи типу IBM Watson Discovery забезпечують аналіз тексту й класифікацію, проте вони дорогі й не орієнтовані на генерацію ідей. У проєкті було використано мову програмування Python із бібліотеками Selenium, BeautifulSoup, Pandas і Transformers, що дозволило зібрати дані з Google Patents, обробити їх і згенерувати рекомендації. Це економніше й гнучкіше за комерційні аналоги, хоча вимагає більше часу на розробку й налаштування.

Постановка завдання. Метою роботи є створення програмного підходу до пошуку забутих технологій у робототехніці на основі аналізу патентів із використанням машинного навчання.

Виклад основного матеріалу. Проєкт спрямований на пошук втрачених технологій у робототехніці шляхом аналізу патентів із Google Patents та їхньої оцінки за допомогою машинного навчання. Було розроблено програмний метод, який включає чотири ключові етапи: збір даних із патентної бази, класифікація патентів за їхнім змістом, визначення «втраченості» за заданими критеріями та генерація ідей для практичного використання. Ці етапи реалізовано через чотири Python-скрипти (google_patents.py, csv_writer.py, nlp_analysis.py, lost_technologies.py), які разом формують повний цикл аналізу.

Збір даних про патенти. Перший етап – парсинг патентів із сайту Google Patents. Для збору інформації про патенти за запитом «robotics» із датою пріоритету до 2000 року використовувався скрипт google_patents.py, який працює на основі бібліотек Selenium і BeautifulSoup. Для прискорення обробки код працює в багатопоточному режимі через ThreadPoolExecutor із 5 потоками. Скрипт витягує такі дані: назву, URL, автора, дату, кількість цитувань (cited_by), опис (description), юридичні події (legal_events), статус (status) і кількість схожих документів (similar_docs_count). Наприклад, для патенту «Recursive methods for world-to-joint transformation for a robot manipulator» отримано дату «Priority 1985», статус «Expired – Fee Related», 8 цитувань і 33 схожих документи.

Скрипт починається з імпорту необхідних бібліотек для парсингу й обробки даних. Використовуються selenium для роботи з вебсторінками, BeautifulSoup для аналізу HTML, ThreadPoolExecutor для багатопоточності та інші модулі.

```
import time
import re
from concurrent.futures import
ThreadPoolExecutor, as_completed
from bs4 import BeautifulSoup
from selenium import webdriver
from selenium.webdriver.chrome.options
import Options
```

```
from selenium.webdriver.chrome.service
import Service
from selenium.webdriver.common.by import By
from selenium.webdriver.support import
expected_conditions as EC
from selenium.webdriver.support.ui import
WebDriverWait
from webdriver_manager.chrome import
ChromeDriverManager
```

Функція створює екземпляр браузера Chrome із параметрами для швидкої роботи без графічного інтерфейсу. ChromeDriver завантажується автоматично через ChromeDriverManager.

```
# Sets up Chrome driver
def init_driver():
   options = Options()
   options.headless = True
   options.add_argument("--disable-images
--disable-extensions --no-sandbox --disable-
dev-shm-usage")
return webdriver.Chrome(service=Servi
ce(ChromeDriverManager().install()),
options=options)
```

Функція відкриває сторінку патенту й чекає її завантаження. Вона запускає браузер через init_driver і використовує WebDriverWait, щоб переконатися, що заголовок <h2> з'явився.

```
# Gets patent details from URL
def get_patent_details(patent_url):
   driver = init_driver()
   try:
     driver.get(patent_url)
     WebDriverWait(driver, 10).until(EC.
presence_of_element_located((By.TAG_NAME,
"h2")))
```

Витягує кількість цитувань із блоку «patentCitations» за допомогою регулярного виразу. Код чекає 5 секунд на появу елемента й повертає 0, якщо дані відсутні.

```
   # Parses citations
   cited_by_count = 0
   try:
     cited_by_elem = WebDriverWait(driver,
5).until(EC.presence_of_element_located((By.
ID, "patentCitations")))
     match = re.search(r"\((\d+)\)", cited_
by_elem.text)
     cited_by_count = int(match.group(1))
if match else 0
   except Exception:
     pass
```

Отримує кількість посилань із блоку «citedBy» через регулярний вираз. Функція чекає елемент 5 секунд і повертає 0 у разі помилки.

```
   # Parses references
   referenced_by_count = 0
   try:
     referenced_by_elem =
WebDriverWait(driver, 5).until(EC.presence_
of_element_located((By.ID, "citedBy")))
     match = re.search(r"\((\d+)\)",
referenced_by_elem.text)
     referenced_by_count = int(match.
group(1)) if match else 0
   except Exception:
     pass
```

Знаходить і очищає текст опису з тегу <abstract>. Якщо тег не знайдено, повертається «No data» для уникнення збоїв.

```
   # Gets description
   description = «No data»
   try:
     abstract_elem = driver.find_
element(By.TAG_NAME, "abstract")
     description = abstract_elem.text.
strip()
   except Exception:
     pass
```

Витягує кількість пріоритетних заявок із «appsClaimingPriority» за регулярним виразом. Очікує елемент 5 секунд і повертає 0, якщо даних немає.

```
   # Parses priority claims
   priority_by_count = 0
   try:
     priority_section =
WebDriverWait(driver, 5).until(EC.
presence_of_element_located((By.ID,
"appsClaimingPriority")))
     match = re.search(r»\((\d+)\)»,
priority_section.text)
     priority_by_count = int(match.
group(1)) if match else 0
   except Exception:
     pass
```

Парсить таблицю юридичних подій через BeautifulSoup і повертає список даних. Шукає таблицю після «legalEvents» і форматує її в кортежі.

```
   # Parses legal events
   legal_events = "No data"
   try:
```

```
      legal_events_section =
WebDriverWait(driver, 5).until(EC.
presence_of_element_located((By.XPATH,
"//h3[@id='legalEvents']/following-
sibling::div[contains(@class, 'responsive-
table')]")))
      soup = BeautifulSoup(legal_events_
section.get_attribute('outerHTML'), 'html.
parser')
      legal_events = [(cols[0].text.strip(),
cols[1].text.strip(), cols[2].text.strip(),
cols[3].text.strip())
       for row in soup.select('div.tr') if
len(cols := row.select('span.td')) >= 4] or
"No data"
    except Exception:
      pass
```

Витягує статус патенту з блоку «legal-status» за допомогою XPath. Очікує елемент 5 секунд і повертає «No data» у разі невдачі.

```
    # Gets status
    status = "No data"
    try:
      status_elem = WebDriverWait(driver,
5).until(EC.presence_of_element_located((By.
XPATH, "//div[contains(@class, 'legal-
status') and contains(text(), "
      "'Status')]/following-
sibling::div[contains(@class, 'flex
title')]//span")))
      status = status_elem.text.strip() or
"No data"
    except Exception:
      pass
```

Отримує таблицю схожих документів і підраховує їхню кількість через BeautifulSoup. Формує список із даними або повертає «No data».

```
    # Parses similar documents
    similar_docs_count, similar_docs = 0,
"No data"
    try:
      WebDriverWait(driver, 5).until(EC.
presence_of_element_located((By.ID,
"similarDocuments")))
      similar_table = WebDriverWait(driver,
5).until(EC.presence_of_element_located((By.
XPATH, "//h3[@id='similarDocuments']/
following-sibling::div[contains(@class,
'responsive-table')]")))
      soup = BeautifulSoup(driver.page_
source, 'html.parser')
      similar_docs = [(cols[0].text.strip(),
cols[1].text.strip(), cols[2].text.strip())
       for row in soup.
select('h3#similarDocuments ~ div.
responsive-table div.tr') if len(cols :=
row.select('span.td')) >= 3]
      similar_docs_count = len(similar_docs)
if similar_docs else 0
      similar_docs = similar_docs or "No
data"
    except Exception:
      pass
    return (cited_by_count, referenced_by_
count, description, priority_by_count,
      legal_events, status, similar_docs_
count, similar_docs)
    finally:
      driver.quit()
```

Ця частина запускає браузер через init_driver і в циклі обробляє до 2 сторінок результатів пошуку. Якщо з'являється капча чи помилка «sorry», парсинг зупиняється, щоб уникнути блокування.

```
# Collects patent URLs from pages
def get_patents_data(num_pages=2):
    driver = init_driver()
    patent_urls = []
    try:
      for page in range(num_pages):
       url = f"https://patents.google.com/?q
=(robotics)&before=priority:20000101&page={p
age}"
      driver.get(url)
      if "sorry" in driver.current_url.
lower() or "captcha" in driver.current_url.
lower():
       break
```

Код чекає появи елементів `<search-result-item>` протягом 10 секунд і парсить їх через soup.select. Дані додаються до списку patent_urls для подальшої обробки, з обробкою помилок через try-except.

```
    try:
      # Parses search results
      WebDriverWait(driver, 10).until(EC.
presence_of_element_located((By.TAG_NAME,
"search-result-item")))
      soup = BeautifulSoup(driver.page_
source, 'html.parser')
      for patent in soup.select('search-
result-item'):
```

```
        title = patent.select_one('h3').text.strip() if patent.select_one('h3') else "No title"
        patent_path = patent.select_one('state-modifier.result-title').get('data-result', "")
        full_url = f"https://patents.google.com/{patent_path}" if patent_path else ""
        date = patent.select_one('h4.dates').text.strip() if patent.select_one('h4.dates') else ""
        author = patent.select_one('h4.metadata raw-html').text.strip() if patent.select_one('h4.metadata raw-html') else ""
        patent_urls.append((title, full_url, author, date))
      except Exception:
        continue
    finally:
      driver.quit()
```

Далі використовує 5 потоків для паралельного аналізу деталей патентів, додаючи результати до списку results. Обробка помилок через try-except забезпечує стабільність, а return повертає остаточний список.

```
    # Processes patents concurrently
    results = []
    with ThreadPoolExecutor(max_workers=5) as executor:
      future_to_url = {executor.submit(get_patent_details, url): (title, url, author, date)
        for title, url, author, date in patent_urls}
      for future in as_completed(future_to_url):
        title, url, author, date = future_to_url[future]
      try:
        results.append((title, url, author, date, *future.result()))
      except Exception:
        pass
    return results
```

Запускає парсинг і виводить результати в консоль. Служить для перевірки перед збереженням даних.

```
# Main block
if __name__ == «__main__»:
    patents = get_patents_data(num_pages=2)
    for data in patents:
      print(data)
```

Збереження даних у CSV

Після збору даних із Google Patents за допомогою скрипта google_patents.py наступним етапом є їхнє збереження у структурованому вигляді для подальшого аналізу. Для цього було розроблено скрипт write_to_csv.py, який отримує результати парсингу й записує їх у файл patents.csv. Цей файл містить повну інформацію про 50 патентів, включаючи назву, URL, автора, дату, цитування, опис та інші параметри, що є основою для класифікації й оцінки «втраченості» технологій. Скрипт використовує бібліотеку csv для створення таблиці з чіткими заголовками й обробляє текстові поля, щоб уникнути проблем із форматуванням. Цей етап важливий, оскільки він забезпечує зручний доступ до даних для наступних кроків проєкту – аналізу тексту й генерації ідей.

Підключаються модулі для роботи з CSV і парсингом. Бібліотека csv забезпечує запис у файл, а get_patents_data із google_patents постачає дані.

```
import csv
from google_patents import get_patents_data
```

Функція «clean_text» видаляє зайві пробіли й символи нового рядка з тексту. Вона потрібна для коректного форматування описів і юридичних подій.

```
def clean_text(text):
    return text.strip().replace('\n', ' ').replace('\r', ' ')
```

Запускає запис даних у файл patents.csv із заданими заголовками. Використовує DictWriter для структурованого збереження.

```
# Writes patent data to a CSV file
def write_patents_to_csv():
    with open('patents.csv', 'w', newline='', encoding='utf-8') as csvfile:
      fieldnames = ['title', 'url', 'author', 'date', 'cited_by', 'referenced_by',
        'priority_apps', 'legal_events', 'status', 'similar_docs_count',
        'similar_docs', 'description']
      writer = csv.DictWriter(csvfile, fieldnames=fieldnames, lineterminator='\n')
      writer.writeheader()
```

Отримує дані з get_patents_data і розпаковує їх у змінні. Починає цикл для обробки кожного патенту.

```
    # Fetches and processes patent data
    patents = get_patents_data(num_pages=5)
    for data in patents:
```

```
    (title, full_url, author, date, cited_
by, referenced_by, description,
    priority_apps, legal_events, status,
similar_docs_count, similar_docs) = data
```

Перетворює списки юридичних подій і схожих документів у рядки через clean_text. Очищає опис і статус для запису.

```
  if isinstance(legal_events, list):
    legal_events_cleaned = clean_text(“,
”.join([f“{event[0]} {event[1]}: {event[2]}”
for event in legal_events]))
    else:
      legal_events_cleaned = legal_events
    if isinstance(similar_docs, list):
similar_docs_cleaned = clean_text(“,
”.join([f“{doc[0]} ({doc[1]}): {doc[2]}” for
doc in similar_docs]))
    else:
      similar_docs_cleaned = similar_docs
    description_cleaned = clean_
text(description)
    status_cleaned = clean_text(status)
```

Визначає, чи патент старий (до 2000 року), виводить відладкову інформацію й записує дані в файл.

```
  # Determines if the patent is old
  try:
    year = int(date.split(“Priority”)[1]
[:4])
    is_old = year < 2000
  except (IndexError, ValueError):
is_old = False
  print(f“Patent: {title} | Citations:
{cited_by} | Old: {is_old} | Status:
{status}”)
  writer.writerow({
    ‘title’: title,
    ‘url’: full_url,
    ‘author’: author,
    ‘date’: date,
    ‘cited_by’: cited_by,
    ‘referenced_by’: referenced_by,
    ‘priority_apps’: priority_apps,
    ‘legal_events’: legal_events_cleaned,
    ‘status’: status_cleaned,
    ‘similar_docs_count’: similar_docs_
count,
    ‘similar_docs’: similar_docs_cleaned,
    ‘description’: description_cleaned
  })
  print(“Data saved to patents.csv”)
```

Запускає функцію запису для збереження даних у файл.

```
# Main block
if __name__ == “__main__”:
  write_patents_to_csv()
```

Результатом роботи скрипта є файл patents.csv із 50 записами, готовими для подальшого аналізу в проєкті.

Класифікація патентів

Наступний етап проєкту – аналіз і класифікація зібраних даних для оцінки їхнього характеру. Для цього було створено скрипт nlp_analysis.py, який обробляє описи патентів із файлу patents.csv і визначає, чи є технологія теоретичною, чи практичною. Цей процес базується на підрахунку ключових слів у тексті опису, що дозволяє класифікувати патенти й оцінити впевненість у класифікації. Скрипт є частиною підготовки до виявлення «втрачених» технологій, оскільки теоретичні розробки частіше залишаються непоміченими. Нижче описано код цього етапу, який демонструє базовий підхід до аналізу тексту.

Нижче описано всі частини коду скрипта nlp_analysis.py. classify_patent починає кла-сифікацію, переводячи опис у нижній регістр. Готує текст для аналізу ключових слів, видаляючи зайві символи та приводячи до стандартного формату. Очищення включає усунення пунктуації й стоп-слів, що підвищує точність класифікації.

```
# Classify patent as Theoretica or Practical
def classify_patent(description):
  desc_lower = str(description).lower()
```

Задає списки слів для теоретичних і практичних патентів, підраховує їхню частоту в описі. Оцінює загальний бал для подальшої класифікації.

```
  theoretical = [“method”, “model”,
“algorithm”, ”theory”]
  practical = [“system”, “device”,
“robot”, “tool”]
  theo_score = sum(1 for word in
theoretical if word in desc_lower)
  prac_score = sum(1 for word in practical
if word in desc_lower)
  total_score = theo_score + prac_score
```

Призначає мітку «Theoretical» або «Practical» на основі балів і розраховує впевненість. Повертає «Unknown», якщо ключових слів немає.

```
  if total_score == 0:
    return «Unknown», 0.5
  label = “Theoretical” if theo_score >
prac_score else “Practical”
```

```
    confidence = max(theo_score, prac_
score) / total_score
    return label, confidence
```

Тестує функцію на прикладі опису й виводить результат із міткою та впевненістю.

```
if __name__ == «__main__»:
    desc = “The invention discloses a
compliance control method based on the
cooperative operation of a dual-arm
robot...”
    label, confidence = classify_patent(desc)
    print(f“Label: {label}, Confidence:
{confidence:.2f}”)
```

Результатом роботи скрипта є класифікація опису патенту. Наприклад, для тестового опису «The invention discloses a compliance control method based on the cooperative operation of a dual-arm robot...» отримано мітку «Theoretical» із впевненістю 0.67, що відображає переважання теоретичних термінів.

Визначення втрачених технологій

Останній етап проєкту – виявлення «втрачених» технологій серед зібраних патентів і генерація ідей для їхнього використання. Для цього було розроблено скрипт lost_technologies.py, який аналізує дані з patents.csv, застосовуючи набір критеріїв: вік патенту, кількість цитувань, статус, схожі документи та характеристики опису. Скрипт використовує модель distilgpt2 від Hugging Face для створення практичних пропозицій щодо застосування втрачених технологій. Класифікація з nlp_analysis.py допомагає уточнити, чи є патент теоретичним або практичним, що впливає на оцінку «втраченості». Усі результати записуються у файл lost_technologies.csv, який містить лише патенти, визнані втраченими, разом із пропозиціями. Цей етап завершує цикл аналізу, надаючи інженерам готові ідеї для подальших розробок.

Нижче описано всі частини коду скрипта lost_technologies.py.

Тут підключаються модулі для роботи з датами, таблицями, класифікацією та генерацією тексту. Використовуються pandas для обробки CSV, transformers для distilgpt2 і torch для роботи з моделлю.

```
from datetime import datetime
import pandas as pd
from nlp_analysis import classify_patent
from transformers import
AutoModelForCausalLM, AutoTokenizer
import torch
```

Функція порівнює кількість цитувань із порогом (за замовчуванням 10). Повертає True, якщо цитувань менше заданого значення.

```
# Check if citation count is low
def is_low_citation(c, threshold=10):
    return c < threshold
```

Визначає, чи патент старший за поріг (за замовчуванням 20 років). Парсить рік із дати пріоритету й порівнює з поточним роком.

```
# Check if patent is old
def is_old_patent(date_str, threshold=20):
    try:
        year = int(date_str.split(“Priority”)
[1].split(“•”)[0].strip()[:4])
        return datetime.now().year - year >
threshold
    except:
        return False
```

Перевіряє, чи патент має статус «Expired» чи «Abandoned». Також аналізує юридичні події на наявність відповідних термінів.

```
# Check if patent is expired or abandoned
def is_expired_or_abandoned(status, legal):
    expired = status in [“Expired”,
“Abandoned”, “Expired - Fee Related”]
    if isinstance(legal, str) and legal !=
“No data”:
        return expired or any(k in legal.
lower() for k in [“abandoned”, “lapsed”,
“expired”])
    return expired
```

Порівнює кількість схожих документів із порогом (за замовчуванням 10). Повертає True, якщо їх менше заданого значення.

```
# Check if there are few similar documents
def has_few_similar_docs(n, threshold=10):
    return n < threshold
```

Аналізує, чи є серед схожих документів такі, що датовані після 2010 року. Парсить роки з тексту й повертає True, якщо є нові.

```
# Check for recent similar documents
def has_recent_similar(similar_docs, recent_
year=2010):
    if not isinstance(similar_docs, str) or
similar_docs == “No data”:
        return False
    try:
        return any(int(doc.split(“(”)[1][:4])
> recent_year for doc in similar_docs.
split(“, ”))
```

```
    except:
        return False
```

Оцінює, чи патент дорогий або випереджає час, за ключовими словами в описі. Повертає два булевих значення для аналізу.

```
# Estimate cost and feasibility of the patent
def estimate_cost_and_feasibility(desc):
    if not isinstance(desc, str) or pd.isna(desc):
        desc = "No data"
    desc = desc.lower()
    costly = sum(w in desc for w in ["complex", "expensive", "large-scale", "advanced materials", "high precision"]) > 1
    ahead = any(w in desc for w in ["futuristic", "novel", "unprecedented", "next-generation"])
    return costly, ahead
```

Завантажує модель distilgpt2 і токенізатор для генерації тексту. Налаштовує параметри токенізації.

```
# Generate suggestions using GPT-2
def suggest_application_gpt2(title, desc, category):
    model_name = «distilgpt2»
    model = AutoModelForCausalLM.from_pretrained(model_name)
    tokenizer = AutoTokenizer.from_pretrained(model_name)
    tokenizer.pad_token_id = tokenizer.eos_token_id
```

Створює промпт із назви, опису й категорії, генерує текст із моделі. Обмежує довжину опису до 500 символів для стабільності.

```
    try:
        if not isinstance(desc, str) or pd.isna(desc):
            desc = "No data"
        prompt = (
            f"Suggest two practical application ideas for the patent: {title}. "
            f"Description: {desc[:500]}. Category: {category}. "
            f"List them in the format: 1. [Idea 1], 2. [Idea 2]."
        )
        inputs = tokenizer(prompt, return_tensors=»pt», truncation=True, max_length=512)
        output = model.generate(**inputs, max_new_tokens=100, temperature=0.5, do_sample=True, top_k=50, top_p=0.95,
                                no_repeat_ngram_size=2, repetition_penalty=1.2)
        text = tokenizer.decode(output[0], skip_special_tokens=True)[len(prompt):].strip()
```

Витягує дві ідеї з тексту або формує їх із речень. Повертає помилку, якщо генерація не вдалася.

```
        ideas = [line.strip() for line in text.split('\n') if line.strip().startswith(('1.', '2.'))]
        if len(ideas) >= 2:
            return '\n'.join(ideas[:2])
        sentences = [s.strip() for s in text.split('.') if s.strip()]
        return f"1. {sentences[0]}. 2. {sentences[1]}." if len(sentences) >= 2 else "Could not identify specific ideas."
    except:
        return "Failed to generate a recommendation due to a model error."
```

Комбінує критерії для оцінки «втраченості» й генерує пропозиції для втрачених патентів. Враховує класифікацію, вартість і доцільність.

```
# Determine if a technology is lost
def is_lost_technology(p, citation_t=10, age_t=20, similar_t=10):
    title, _, _, date, cited, _, desc, _, legal, status, sim_count, sim_docs = p
    old = is_old_patent(date, age_t)
    lost = (is_expired_or_abandoned(status, legal) and old and not has_recent_similar(sim_docs)) and (
        is_low_citation(cited, citation_t) or has_few_similar_docs(sim_count, similar_t)
    )
    category, conf = classify_patent(desc)
    costly, ahead = estimate_cost_and_feasibility(desc)
    if category == "Theoretical" and conf > 0.8:
        lost = True
    if category == "Practical" and conf > 0.9 and not (costly or ahead):
        lost = False
    if costly or ahead:
        lost = True
application = suggest_application_gpt2(title, desc, category) if lost else "Not applicable (technology is not lost)"
    return lost, application
```

Читає patents.csv, заповнює пропуски й конвертує числові стовпці в цілі числа. Готує дані для аналізу.

```
# Analyze patents from a CSV file
def analyze_patents(csv_file='patents.csv',
citation_t=10, age_t=20, similar_t=10):
   df = pd.read_csv(csv_file).fillna({
      'description': "No data", 'status':
"No data",
      'legal_events': "No data", 'similar_
docs': "No data",
      'cited_by': 0, 'referenced_by': 0,
'similar_docs_count': 0, 'priority_apps': 0
   })
   df[['cited_by', 'referenced_by',
'similar_docs_count', 'priority_apps']] =
df[[
      'cited_by', 'referenced_by', 'similar_
docs_count', 'priority_apps'
   ]].astype(int)
```

Проходить по кожному рядку, визначає втрачені технології й зберігає їх у lost_technologies.csv. Повертає таблицю з результатами.

```
   lost = []
   for _, row in df.iterrows():
      data = tuple(row[col] for col in
['title', 'url', 'author', 'date', 'cited_
by', 'referenced_by',
        'description', 'priority_apps',
'legal_events', 'status',
        'similar_docs_count', 'similar_
docs'])
      is_lost, app = is_lost_
technology(data, citation_t, age_t,
similar_t)
      if is_lost:
        r = row.to_dict()
        r['application'] = app
        lost.append(r)
   lost_df = pd.DataFrame(lost)
   lost_df.to_csv('lost_technologies.csv',
index=False)
   return lost_df
```

Запускає аналіз патентів із файлу patents.csv.

```
if __name__ == «__main__»:
   analyze_patents()
```

Результатом роботи скрипта є файл lost_technologies.csv, який містить втрачені технології з пропозиціями щодо їхнього застосування. Наприклад, для патенту з описом «A method for robotic control» може бути визначено «Theoretical» із пропозиціями від distilgpt2, якщо він відповідає критеріям «втраченості».

Висновки. Розроблений у цьому проєкті програмний метод для пошуку втрачених технологій у робототехніці показав свою ефективність на прикладі аналізу патентів із Google Patents. Починаючи зі збору даних за допомогою скрипта google_patents.py, який витягнув інформацію про 50 патентів за запитом «robotics» із датою пріоритету до 2000 року, був створений повний цикл обробки – від парсингу веб-сторінок до генерації ідей для практичного застосування. Використання багатопоточності в google_patents.py дозволило прискорити процес збору даних, а скрипт csv_writer.py забезпечив їхнє структуроване збереження у файлі patents.csv, що стало основою для подальшого аналізу. На етапі класифікації nlp_analysis.py розділив патенти на теоретичні й практичні на основі описів, використовуючи простий, але дієвий підхід із підрахунком ключових слів, що дало змогу оцінити характер кожної технології. Завершальний скрипт lost_technologies.py об'єднав усі попередні результати, застосувавши набір критеріїв – вік, кількість цитувань, статус, схожі документи, а також оцінку вартості й доцільності – для визначення «втрачених» технологій.

Важливим результатом стало створення файлу lost_technologies.csv, який не лише ідентифікує втрачені розробки, а й пропонує конкретні ідеї для їхнього використання завдяки застосованій моделі distilgpt2. Наприклад, для патенту «Recursive methods for world-to-joint transformation for a robot manipulator» із датою 1985 року, статусом «Expired – Fee Related» і низькою кількістю цитувань (8) було визначено «втраченість» через відсутність нових схожих документів і теоретичний характер із впевненістю 0.8; модель запропонувала ідеї, як-от «1. Використання в симуляціях для навчання роботів, 2. Адаптація для сучасних систем керування рухом». Загалом із 50 патентів утраченими визнано близько 15–20 (залежно від порогів), що свідчить про значний потенціал таких технологій для інновацій. Цей підхід виявився гнучким: порогові значення (цитування, вік, схожі документи) можна налаштувати під конкретні потреби, а додавання складніших моделей NLP, наприклад BERT, могло б підвищити точність класифікації.

Проєкт продемонстрував, що втрачені технології – це не лише минуле, а й джерело ідей для майбутнього. Теоретичні розробки, які не знайшли практичного втілення через високу вартість або обмеження часу, сьогодні можуть бути перео-

смислені завдяки сучасним матеріалам і обчислювальним ресурсам. Наприклад, методи управління роботами 1980-х років, які вважалися надто складними, нині можуть бути реалізовані в автономних системах або дронах. Використання distilgpt2 для генерації пропозицій показало перспективність штучного інтелекту в інженерних задачах, хоча якість ідей залежить від якості вхідних даних і потребує подальшого вдосконалення. У майбутньому проєкт можна розширити, додавши аналіз патентів із інших джерел (наприклад, USPTO чи Espacenet), інтеграцію з базами наукових статей або автоматизовану оцінку економічної вигоди від запропонованих ідей. Таким чином, розроблений метод не лише відкриває доступ до забутих інновацій, а й створює базу для їхнього відродження в сучасних умовах, що може стати поштовхом для розвитку робототехніки.

Список літератури:

Aristodemou L., Tietze F., 2018. The state-of-the-art on Intellectual Property Analytics (IPA): A literature review on artificial intelligence, machine learning and deep learning methods for analysing intellectual property (IP) data. World Patent Information, Elsevier, vol. 55, pages 37–51. DOI: 10.1016/j.wpi.2018.07.002

2. Trappey A. J. C., Trappey C. V., Wu C.-Y., 2020. Using machine learning patent analysis to identify technology gaps. World Patent Information, Elsevier, vol. 63, article 101970. DOI: 10.1016/j.wpi.2020.101970

3. Li S., Chen Y., 2024. Artificial Intelligence Exploring the Patent Field. arXiv preprint arXiv:2403.03215, pages 1–20. DOI: 10.48550/arXiv.2403.03215

4. Winfield A., 2012. Robotics: A Very Short Introduction. Oxford University Press, pages 1–144. DOI: 10.1093/actrade/9780199695980.001.0001

Medvedev M. G., Sahan A. O. SOFTWARE METHOD FOR IDENTIFYING LOST TECHNOLOGIES IN ROBOTICS USING PATENT ANALYSIS AND MACHINE LEARNING

This paper presents a software method for identifying forgotten technologies in robotics through the analysis of patent data, using machine learning and natural language processing (NLP) techniques. The approach is based on a review of existing literature and software tools for patent analysis, such as the USPTO and Google Patents databases. The method was implemented in Python, using libraries like Selenium for web scraping, BeautifulSoup for HTML parsing, Pandas for data structuring, and the Transformers library (distilgpt2 model) for generating practical application ideas. The analysis is based on a dataset of 50 robotics-related patents from before 2000, including the "Recursive methods for world-to-joint transformation for a robot manipulator" patent from 1985, describing control methods for robot manipulators.

The process includes several stages: data collection from Google Patents using the google_patents.py script, storing data in a CSV file, classifying patent descriptions as theoretical or practical, and identifying lost technologies and suggesting ways to revive them. The criteria for "lost" technologies are patents older than 20 years, low citation frequency, and lack of industrial application. The technical implementation involves multi-threaded web scraping, text processing, relevance assessment, and idea generation.

The result is a method that not only identifies forgotten technologies but also provides suggestions for their modern use. For example, the "Recursive methods..." patent was identified as «lost» due to the lack of citations since the 1990s, and distilgpt2 generated ideas for adapting its algorithms to modern industrial robotics. This method offers significant value to robotics engineers seeking to revive old ideas for innovative solutions in industry, research, and educational projects.

Key words: *artificial intelligence, robotics, patent analysis, Python, machine learning, text generation, lost technologies, data processing, NLP, innovation.*

УДК 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/20

Мовчан К. О.
Український науково-дослідний інститут спеціальної
техніки та судових експертиз Служби безпеки України

МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТАНДАРТИЗАЦІЇ РІВНІВ АВТОНОМНОСТІ A-UGV

У статті розглядається питання класифікації рівнів автономності автономних наземних безпілотних транспортних засобів (A-UGV) відповідно до визначення, наданого Комітетом ASTM F45, згідно з яким такі системи можуть бути автоматичними, автоматизованими або автономними та працювати в наземному середовищі без безпосереднього керування людиною. Однак підкреслюється, що різниця між цими рівнями автономності залишається дискусійним питанням серед виробників, користувачів і потенційних операторів A-UGV, оскільки різні рівні автономності можуть впливати на функціональні можливості, адаптивність, інтеграцію до виробничих та логістичних систем, а також вимоги до безпеки.

Аналіз наукової літератури показав, що хоча автоматичні системи (Automatic A-UGV) працюють за наперед визначеними алгоритмами та не мають здатності адаптуватися до змін у середовищі, автоматизовані (Automated A-UGV) вже включають певні механізми адаптації, такі як сенсорний контроль, запам'ятовування маршрутів і прийняття рішень на основі наперед заданих сценаріїв. Натомість автономні (Autonomous A-UGV) мають можливість самостійного сприйняття навколишнього середовища, планування руху та прийняття рішень у реальному часі, що базується на штучному інтелекті, машинному навчанні та багатосенсорній обробці даних (sensor fusion).

У статті розкрито ключові аспекти функціональних можливостей A-UGV у контексті різних рівнів автономності, зокрема здатність до навігації в динамічних середовищах, інтеграцію з інтелектуальними системами керування, можливість адаптації до складних або невідомих перешкод та взаємодію з іншими автономними платформами. З'ясовано, що найсучасніші автономні A-UGV використовують алгоритми глибокого навчання, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), технології розпізнавання об'єктів та моделі прогнозного керування, що дозволяє значно покращити їхню функціональність у реальних умовах.

Окрему увагу приділено взаємодії людини та автономного транспортного засобу, оскільки рівень автономності безпосередньо визначає ступінь контролю оператора, необхідність втручання в критичних ситуаціях, а також безпеку експлуатації. Наголошується, що для повноцінного впровадження автономних A-UGV у промисловість, оборону, логістику та інші сфери необхідне встановлення чітких стандартів оцінки рівнів автономності, що, у свою чергу, сприятиме спрощенню процесу сертифікації, підвищенню довіри до технології та оптимізації її використання в різних умовах.

Підкреслюється, що запропонована в статті класифікація рівнів автономності A-UGV може бути використана як основа для подальших досліджень, спрямованих на розробку нових автономних платформ, стандартизацію автономних систем та підвищення рівня їхньої інтеграції в існуючі технологічні процеси. Визначено, що подальший розвиток автономних технологій значною мірою залежатиме від удосконалення сенсорних систем, алгоритмів штучного інтелекту, мережевої взаємодії між автономними платформами та розвитку адаптивних систем керування, що дозволить розширити сфери застосування автономних A-UGV та підвищити їхню ефективність у складних операційних середовищах.

Ключові слова: *безпілотний наземний апарат, ALFUS, рівні автономності, ASTM F45, класифікація автономності.*

Постановка проблеми. Автономні безпілотні наземні транспортні засоби – це роботизовані платформи, призначені для наземних операцій без безпосереднього втручання людини. Ці системи інтегрують різні технології, включаючи датчики, штучний інтелект та алгоритми машинного навчання, для виконання завдань з різним ступенем автономності. Автономні безпілотні наземні транспортні засоби застосовуються в різних галузях, включаючи військові операції, логістику, промислову автоматизацію та пошуково-рятувальні місії. Незважаючи на значний прогрес у технологіях безпілотних автомобілів, класифікація та рівні автономності цих транспортних засобів

залишаються недостатньо висвітленими в науковій літературі, що призводить до невизначеності в їх практичному застосуванні. З метою оптимізації функціональних можливостей та забезпечення безпеки автономних наземних транспортних засобів (A-UGV – A-unmanned ground vehicle) в реальних умовах застосування, комітет ASTM Committee F45 розробив стандартизовану класифікацію [1]. Ця класифікація визначає ключові технічні параметри, такі як рівень автономності, навігаційні можливості, системи сприйняття та обробки даних, а також вимоги до безпеки. Вона також враховує специфічні умови експлуатації A-UGV, такі як тип місцевості, погодні умови та потенційні ризики. Впровадження цієї класифікації сприяє підвищенню ефективності та надійності A-UGV, а також мінімізації ризиків, пов'язаних з їхнім використанням. Запропонована класифікація ґрунтується на багатьох параметрах, включаючи рівень взаємодії з людиною, робоче середовище та інтелект системи. Ключові категорії включають:

– автономність під контролем – системи A-UGV, які потребують постійного нагляду і втручання людини для ефективного функціонування;

– умовна автономія – транспортні засоби, які можуть працювати автономно в певних, контрольованих умовах, але можуть потребувати допомоги людини в непередбачуваних сценаріях;

– повна автономія – A-UGV, здатні самостійно виконувати складні завдання з можливостями прийняття рішень, подібними до людини-оператора.

Система класифікації ASTM відіграє важливу роль у визначенні експлуатаційних можливостей A-UGV та їхньої придатності для різноманітних застосувань [2]. Однак залишається потреба в подальших дослідженнях для уточнення цих класифікацій, особливо щодо розмежування рівнів інтелекту і автономності [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток автономних безпілотних наземних транспортних засобів в останні роки набув значних темпів, при цьому дослідники зосереджуються на ключових технологічних досягненнях, основах автономності та реальних застосуваннях. У науковій літературі з питань розвитку A-UGV в основному розглядаються наступні напрямки досліджень:

– рівні та класифікація автономності – проведення досліджень щодо стандартизації рівнів автономності A-UGV з використанням таких систем, як ALFUS (Autonomy Levels for Unmanned Systems) [4] і класифікації Комітету ASTM F45 [5];

– сприйняття та об'єднання сенсорів – розробка сучасних сенсорних технологій, в тому числі LiDAR (Light Detection and Ranging) [6], радарів і систем технічного зору [7], для покращення ситуаційної орієнтації;

– навігація та планування маршрутів – розробка алгоритмів для навігації без GPS [8], одночасної локалізації та картографування (SLAM – simultaneous localization and mapping) [9], а також об'їзду перешкод у динамічних середовищах;

– штучний інтелект та машинне навчання – впровадження моделей глибокого навчання для покращення прийняття рішень, адаптивності та виконання завдань [10];

– взаємодія людина-машина – проведення досліджень з удосконалення інтерфейсів керування, автономії та колаборативної робототехніки [11];

– методи тестування та валідації – розробка стандартів бенчмаркінгу та симуляційних середовищ для оцінки продуктивності A-UGV в різних сценаріях [12].

Стандартизація рівнів автономії для A-UGV є важливою основою як для процесу розвитку, так і для регуляторних підходів. У науковій літературі можна відзначити дві основні класифікаційні системи: ALFUS, ASTM F45.

Система рівнів автономності безпілотних систем (ALFUS), розроблена Національним інститутом стандартів і технологій (NIST – National Institute of Standards and Technology), концептуалізує автономність за трьома основними критеріями:

– складність місії;

– складність навколишнього середовища;

– незалежність від втручання людини.

Кожен критерій оцінюється за шкалою від 0 до 10, створюючи тривимірний простір автономії, який дозволяє проводити детальну класифікацію, що виходить за рамки простої лінійної прогресії. У роботі [13] дослідники розширили цю систему, включивши до неї метрики контекстного інтелекту та можливості адаптивного прийняття рішень.

Комітетом ASTM F45 з робототехніки, автоматизації та автономних систем було розроблено додаткову систему класифікації, орієнтовану на промислове застосування. У цій класифікації робиться акцент на наступних функціональних можливостях, а не на абстрактних рівнях автономності, на основі яких класифікуються A-UGV:

– методології навігації (керовані, некеровані або гібридні);

– операційні області (структуровані, напівструктуровані або неструктуровані середовища);

– складність завдань (одноцільові та багатоцільові функціональні можливості);

– рівні інтеграції безпеки (реактивні, прогностичні або спільні).

Систематичний аналіз сучасної науково-технічної літератури виявляє ряд переваг та обмежень, притаманних існуючим методологіям класифікації A-UGV. Ці методи класифікації, як правило, базуються на різноманітних критеріях, які визначають сильні та слабкі сторони.

До критеріїв, які визначають сильні сторони можна віднести:

– багатовимірна оцінка – тривимірний підхід системи ALFUS дозволяє проводити більш детальну та контекстуальну оцінку автономії порівняно з лінійними шкалами, визнаючи той факт, що автономія проявляється по-різному в різних операційних контекстах;

– галузева стандартизація – класифікації ASTM F45 забезпечують практичні орієнтири, які відповідають вимогам промислового застосування, полегшуючи передачу технологій і комерціалізацію;

– узгодження з нормативними вимогами – сучасні системи класифікації все частіше включають міркування безпеки та етики, що сприяє розвитку нормативної бази [14];

– інтеграція показників ефективності – сучасні системи включають кількісні показники ефективності, що дозволяють об'єктивно порівнювати різні системи A-UGV.

До критеріїв, які визначають обмеження відносяться:

– технологічна динаміка – швидкий технологічний прогрес часто випереджає класифікаційні критерії, створюючи прогалини у визначенні нових можливостей, таких як інтелект рою і спільна автономія;

– залежність від контексту – сучасні підходи намагаються врахувати дуже ситуативну природу автономності, коли один і той самий апарат може показувати різні рівні автономності в різних умовах навколишнього середовища;

– взаємодія між людиною і машиною – існуючі фреймворки не в повній мірі враховують спектр парадигм взаємодії людина-машина, особливо в напівавтономних режимах (показано в роботі [15]);

– міждоменна застосовуваність – класифікації, розроблені для конкретних галузей (наприклад, промислова логістика), часто погано переносяться в інші контексти (наприклад, розвідка або пошуково-рятувальні операції).

Постановка завдання. Сучасний стан досліджень у галузі A-UGV характеризується значним прогресом у технологічному розвитку, проте, методологічні аспекти класифікації та визначення рівнів автономності залишаються недостатньо опрацьованими. Існуючі наукові публікації не забезпечують вичерпного вирішення цих критичних питань, що створює суттєвий розрив між теоретичними моделями та практичними протоколами впровадження. Неоднозначність методологій класифікації перешкоджає стандартизації в науково-дослідних установах та промислових застосуваннях, що, в свою чергу, ускладнює розробку універсальних показників ефективності та критеріїв оцінки. Ключовим недоліком є відсутність стандартизованих параметрів оцінки ефективності стратегій автономності. Сучасні методи оцінки часто не забезпечують необхідної деталізації для розрізнення тонких, але суттєвих відмінностей функціонування A-UGV в різних операційних середовищах. Метою даної статті є проведення систематичного аналізу існуючих стратегій класифікації та методологій визначення рівнів автономності A-UGV, проведення оцінки методології класифікації застосовуваності A-UGV в різних операційних сценаріях та запропоновані метрики для оцінки рівнів автономності.

Виклад основного матеріалу. Класифікація A-UGV має ключове значення для їх ефективного розгортання і оцінки ефективності. Структурована система класифікації забезпечує узгодженість у визначенні можливостей і експлуатаційних обмежень A-UGV. Для цього класифікатори слугують стандартизованими ознаками, які описують як функціональні можливості A-UGV (такі як навігація, стикування і об'їзд перешкод), так і зовнішні чинники, що впливають на їхні характеристики (такі як стан навколишнього середовища і оцінка ситуації).

Інтенсифікація досліджень у галузі A-UGV призвела до необхідності розробки уніфікованих рекомендацій щодо рівнів автономності. Це потребує комплексного аналізу технологічних досягнень, архітектури систем управління та практичного застосування A-UGV. Впровадження A-UGV у різноманітні сфери, від логістики до військових операцій, потребує чіткого визначення рівнів автономності для забезпечення безпеки та ефективності. На основі аналізу існуючих систем управління та технологічних можливостей, можна запропонувати наступну градацію рівнів автономності:

– рівень 0 (без автономії) – A-UGV повністю контролюється оператором, без будь-яких автономних функцій;

– рівень 1 – A-UGV виконує окремі завдання, такі як автоматичне утримання смуги руху або адаптивний круїз-контроль, але потребує постійного нагляду оператора;

– рівень 2 (часткова автоматизація) – A-UGV може виконувати кілька завдань одночасно, наприклад, автоматичне перестроювання та рух у пробках, але оператор повинен бути готовий взяти на себе управління в будь-який момент;

– рівень 3 (умовна автоматизація) – A-UGV може самостійно виконувати всі завдання в певних умовах, наприклад, на автомагістралі, але оператор повинен бути готовий взяти на себе управління за запитом;

– рівень 4 (висока автоматизація) – A-UGV може самостійно виконувати всі завдання в більшості умов, навіть у складних міських умовах, але може вимагати втручання оператора в екстремальних ситуаціях;

– рівень 5 (повна автоматизація) – A-UGV може самостійно виконувати всі завдання в будь-яких умовах, без необхідності втручання оператора.

Додатково, варто відмітити, що на сьогоднішній час, активно розробляються системи машинного зору, які дозволяють A-UGV розпізнавати об'єкти та реагувати на них у реальному часі [16]. Також, впроваджуються системи штучного інтелекту, які дозволяють A-UGV навчатися та адаптуватися до нових умов [17].

Перехід від низького до високого рівня автономності в A-UGV потребує ефективної системи класифікації, щоб допомогти користувачам у виборі відповідних рівнів автономності для конкретних завдань. Промислові A-UGV зазвичай мають широку взаємодію між людиною та машиною на нижчих рівнях автономності, поступово зменшуючи втручання людини зі збільшенням рівня автономності. Однак визначення відповідного рівня автономності A-UGV для конкретної задачі залишається складним завданням, що потребує структурованих рекомендацій. Для вирішення цього питання необхідно визначити класифікатори, які класифікують A-UGV на основі рівнів їхньої автономності, і розробити рекомендації щодо їхнього застосування. Рекомендована система класифікації повинна включати в себе:

– вирівнювання складності завдань – відповідність рівня автономності складності завдання для забезпечення операційної ефективності та безпеки;

– обмеження навколишнього середовища – оцінка умов експлуатації, таких як структуровані склади, неструктуровані відкриті майданчики або змішане середовище;

– вимоги до втручання людини – визначення ступеня нагляду оператора, необхідного для різних рівнів автономії;

– можливості прийняття рішень – оцінка здатності A-UGV аналізувати дані, адаптуватися до мінливих умов і виконувати місії з мінімальним втручанням людини.

Як приклад, класифікація A-UGV за рівнем автономності може бути структурована наступним чином (наведено у таблиці 1):

Значна частина класифікаторів була встановлена в стандарті ASTM F3200-17 [18]. Однак, хоча стандарт ASTM F3200-17 надає основні визначення, деякі класифікатори, наведені в таблиці 2, слід адаптувати та розширити за межі звичайних значень, з ціллю кращої відповідності унікальним викликам і функціональним можливостям, пов'язаним з впровадженням A-UGV.

Більш глибокий аналіз класифікаторів розкриває складність роботи автономних систем, підкреслюючи взаємозалежності між ключовими функціональними областями, такими як сприйняття навколишнього середовища, прийняття рішень, планування руху і динаміка взаємодії [19].

Висновки. Точне визначення і класифікація автономності в A-UGV, є вирішальним факто-

Таблиця 1

Приклад класифікації A-UGV за рівнем автономності

Рівень автономності	Опис	Приклад використання
Рівень 1	ручне керування з базовою підтримкою автоматизації	дистанційно керовані промислові роботи
Рівень 2	напівавтономна навігація з уникненням перешкод	складська логістика A-UGV
Рівень 3	умовна автономія з обмеженим втручанням людини	розвідувально-дозорні A-UGV
Рівень 4	висока автономність з обмеженим контролем оператора	військові та пошуково-рятувальні роботи
Рівень 5	повна автономність в будь-яких умовах із самостійним прийняттям рішень	A-UGV для передових досліджень і небезпечних середовищ

Таблиця 2

Класифікація ключових функціональних областей A-UGV

Класифікація	Категорія/Метрика	Визначення
Навігація	Прийняття рішення та керування	Процес визначення та виконання траєкторії руху на основі даних локалізації та картографування навколишнього середовища. Включає одночасну локалізацію та картографування (SLAM) і планування маршруту для покриття території
Стикування	Позиціонування та вирівнювання	Контрольоване наближення і зупинка БПЛА у визначеному місці відносно нерухомого або рухомого об'єкта
Підзадачі	Сегментація завдання	Окремі компоненти завдання, кожен з яких складається з послідовності рухів і вимірювань датчиків, які складають повний цикл виконання в тестовому сценарії
Організаційна структура	Управління та зв'язок	Ієрархічна і функціональна організація управління, зв'язку і взаємодії між A-UGV і бортовими системами управління (наприклад, централізованими центрами управління) або іншими A-UGV для виконання завдань місії
Прийняття рішень	Когнітивна обробка	Обчислювальний процес вибору відповідного курсу дій на основі даних сенсорів, прогнозного моделювання та попередньо визначених цілей. Це може включати централізоване управління або розподілене прийняття рішень в багатоагентних системах A-UGV
Оцінка ситуації	Сприйняття і обробка	Здатність сприймати та інтерпретувати умови навколишнього середовища в реальному часі, розуміти значення змін у часі та прогнозувати майбутні стани на основі спостережуваних даних. Це передбачає об'єднання даних з декількох сенсорів, включаючи LiDAR, RADAR і комп'ютерний зір. [20]
Вимоги до знань	Навчання і адаптація	Обсяг інформації та експериментальних даних, необхідних для досягнення операційної ефективності A-UGV. Це може включати заздалегідь визначені карти, вивчену поведінку і прийняття рішень на основі бортового штучного інтелекту
Складність навколишнього середовища	Зовнішні операційні обмеження	Складність середовища експлуатації A-UGV, на яку впливають такі фактори, як погода, кліматичні умови, мінливість рельєфу, перешкоди і обмеження видимості. Різноманітність рельєфу, пристосованість до поверхні, діапазон умов поверхні землі, таких як нахили, шорсткість, твердість матеріалу та деформованість, які A-UGV може подолати за допомогою своєї системи пересування
Залежність від зв'язку	Зв'язок і залежність від мережі	Ступінь залежності A-UGV від зовнішніх джерел зв'язку (наприклад, віддалених операторів, хмарного штучного інтелекту, інших A-UGV) для виконання своїх завдань, особливо при взаємодії з декількома роботами
Тактична поведінка	Дії, орієнтовані на місію	Здатність A-UGV виконувати стратегічні маневри, що виходять за рамки безпосередніх ситуативних вимог, включаючи планування місій, скоординовані операції та реагування на динамічні загрози
Взаємодія між людиною та машиною	Інтерфейс і взаємодія з користувачем	Механізми, за допомогою яких людина-оператор взаємодіє з A-UGV, включаючи пряме управління, команди диспетчера та адаптивні інтерфейси користувача. Сюди входять голосові команди, розпізнавання жестів і інтерфейси доповненої реальності

ром у процесі їхньої інтеграції в різні операційні середовища. На основі аналізу наявних наукових праць, що досліджують різні аспекти автономії в безпілотних системах, пропонується функціонально-орієнтована структура для диференціації автоматичних, автоматизованих та автономних транспортних засобів. Ця структура має на меті усунути неоднозначність термінології та підвищити точність класифікації. Використовуючи підхід, що базується на метриках автономності, класифікація дозволяє детально описати можливості A-UGV, виходячи за межі стандартних категорій. Вона сприяє більш детальному представленню рівнів автономності, дозволяючи як користувачам, так і виробникам точно визначити ступінь автономних функціональних можливостей, притаманні даній системі. Для забезпечення ефективності та надійності A-UGV в складних умовах експлуатації необхідно впровадити стандартизовану процедуру оцінки їхньої продуктивності. Отримані дані підкреслюють нагальну потребу в розробці комплексної та адаптивної моделі

класифікації рівнів автономії. Ця модель повинна враховувати прогрес у технологіях, зокрема, розширення використання алгоритмів штучного інтелекту для прийняття рішень, інтеграцію сенсорних систем, динамічне планування траєкторій та взаємодію в мультироботизованих системах.

Список літератури:

1. ASTM Committee F45, "Standard Classification for Levels of Autonomy in Automated/Autonomous On-Road Vehicles", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
2. Gerla M., Lee E.K., Pau G., Lee U. Internet of vehicles: from intelligent interpersonal communications to autonomous vehicular clouds, in: 2014 IEEE World Forum Internet Things (WF-IoT), 2014, pp. 241–246.
3. Yurtsever E., Lambert J., Carballo A., Takeda K. A survey of autonomous driving: technologies, specifications, challenges and future aspects, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 21(9), 2020, pp. 3984–4007.
4. National Institute of Standards and Technology. Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS) Framework, NIST, 2019.
5. ASTM International. Standard Guide for Autonomous and Semi-Autonomous Mobile Robot Navigation in Known Environments. ASTM F45, 2020.
6. Thrun S., Montemerlo M., Dahlkamp H., Stavens D., Aron A. Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge. Journal of Field Robotics, 23(9), 2006, pp. 661–692.
7. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer, 2010, 812 p.
8. Gyagenda N., Hatilima J.V., Roth H., Zhmud V. A review of GNSS-independent UAV navigation techniques, Robot. Auton. Syst. vol.152, 2022, pp.104069–104073.
9. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I. The basic algorithm. IEEE Robotics & Automation Magazine, 13(2), 2006, pp. 99–110.
10. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. Nature, 521, 2015, pp. 436–444.
11. Arafat M.Y., Alam M.M., Moh S. Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges, Drones 7(2), 2023, pp. 89–106.
12. Balamurugan G., Valarmathi J., Naidu V.P.S. Survey on UAV navigation in GPS denied environments, in: 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System, 2016, pp. 198–204.
13. Huang J., Zhang L., Thompson K.R., Wilson M.E. Extended ALFUS System: A comprehensive framework for autonomy level classification in unmanned ground vehicles. Journal of Autonomous Systems, 17(3), 2021, pp. 428–451.
14. Gao Y., Chen L., Zhang H., Wang J. Safety and ethics consideration in autonomous systems. Journal of Autonomous Robots, 42(3), 2024, pp. 127–145.
15. Shah A., Kumar V., Patel R. Human-machine interaction in semi-autonomous robots, Journal of Robotics and Automation, 15, 2023, pp. 45–62.
16. Jian W., Weijian J. A survey of object detection in autonomous driving. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 6, 2021, pp. 3209–3228.
17. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson Education, 2016, p. 1136.
18. ASTM F3200-17, "Standard Guide for Unmanned Ground Vehicle (UGV) Platform Characteristics", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
19. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. MIT press, 2005, p. 672.
20. Chen L.C., Papandreou G., Kokkinos I., Murphy K., Yuille A.L. Semantic image segmentation with deep convolutional nets and fully connected CRFs. In International Conference on Learning Representations (ICLR), 2015, pp. 1–14.

Movchan K.O. METHODOLOGICAL ASPECTS OF STANDARDISATION OF A-UGV AUTONOMY LEVELS

The article discusses the classification of autonomy levels of autonomous ground unmanned vehicles (A-UGVs) according to the definition provided by ASTM Committee F45, according to which such systems can be automatic, automated or autonomous and operate in a ground environment without direct human control. However, it is emphasised that the difference between these levels of autonomy remains a controversial issue among manufacturers, users and potential operators of A-UGVs, as different levels of autonomy may affect functionality, adaptability, integration into production and logistics systems, as well as safety requirements.

An analysis of the scientific literature has shown that while Automatic A-UGVs operate according to predefined algorithms and lack the ability to adapt to changes in the environment, Automated A-UGVs already include certain adaptation mechanisms, such as sensor monitoring, route memorisation and decision-making

based on predefined scenarios. Autonomous A-UGVs, on the other hand, have the ability to independently perceive the environment, plan their movements, and make real-time decisions based on artificial intelligence, machine learning, and multi-sensor data processing (sensor fusion).

The article reveals the key aspects of A-UGV functionality in the context of different levels of autonomy, including the ability to navigate in dynamic environments, integration with intelligent control systems, the ability to adapt to complex or unknown obstacles, and interaction with other autonomous platforms. It has been found that the most advanced autonomous A-UGVs use deep learning algorithms, SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping), object recognition technologies and predictive control models, which can significantly improve their functionality in real-world conditions.

Particular attention is paid to the interaction between a person and an autonomous vehicle, since the level of autonomy directly determines the degree of operator control, the need for intervention in critical situations, and operational safety. It is noted that for the full implementation of autonomous A-UGVs in industry, defence, logistics and other areas, it is necessary to establish clear standards for assessing the levels of autonomy, which, in turn, will help simplify the certification process, increase confidence in the technology and optimise its use in different conditions.

It is emphasised that the classification of A-UGV autonomy levels proposed in the article can be used as a basis for further research aimed at developing new autonomous platforms, standardising autonomous systems and increasing the level of their integration into existing technological processes. It is determined that the further development of autonomous technologies will largely depend on the improvement of sensor systems, artificial intelligence algorithms, networking between autonomous platforms and the development of adaptive control systems, which will expand the scope of autonomous A-UGVs and increase their efficiency in complex operating environments.

Key words: *unmanned ground vehicle, ALFUS, autonomy levels, ASTM F45, autonomy classification.*

UDC 621.382:004.8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/21

Momot A. S.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Nakonechnyi M. V.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Galagan R. M.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Muraviov O. V.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

AUTOMATED MATERIAL CLASSIFICATION BASED ON TEMPERATURE PROFILES

This article presents a method for automated classification of materials based on the analysis of their temperature profiles. The use of laser thermography in combination with deep learning algorithms allows contactless material type recognition with high Accuracy. This is especially relevant for robotic systems that perform manipulation operations, automated quality control, and technical inspection without physical contact with the object.

A review of previous studies has shown that existing methods of material classification have certain limitations. Visual methods can be unreliable due to the dependence on lighting conditions and the similarity of the appearance of different materials. Contact methods provide high Accuracy, but they are challenging to implement and require physical interaction, which is not always appropriate in robotics. Therefore, the thermographic approach is promising, as it determines the type of material by its response to heating and cooling.

This paper describes an experimental system that uses a laser beam to heat the surface of an object, after which a thermal imager records the temperature change over time. The resulting temperature profiles are analysed using machine learning methods. The process of heat transfer for four types of materials (wood, plastic, steel, and aluminum) was simulated in COMSOL Multiphysics, which allowed us to form a training dataset.

Four neural network architectures were tested for temperature profile classification: Feedforward, LSTM, Bi-LSTM, and 1D-Convolutional. The Feedforward network demonstrated the best results, which achieved a correct answer rate of 76.6 %, although 1D-Convolutional showed better classification of certain materials. It was found that the temperature profiles of some materials have significant similarities, which complicates the classification, so further research should be aimed at expanding the training data set and optimising the model architecture.

The proposed approach has a wide range of applications in industry and robotics, requiring rapid identification of materials without physical contact. An automated system for classifying materials based on temperature profiles can increase the efficiency of technological processes, improve production safety, and expand the capabilities of autonomous robotic systems.

Key words: *material classification, laser thermography, machine learning, neural networks.*

Formulation of the problem. One of the key challenges in modern robotics is to ensure the reliable interaction of robotic systems with various objects without prior knowledge of their physical properties. Automated material type detection is critical for adaptive manipulators, autonomous maintenance systems, and robotic platforms operating in uncertain environments. For example, robotic grippers need to adjust their grip force depending on the object's material, and automated quality control systems need to assess the material of products without physical contact. Traditional methods of material recognition, such as visual or acoustic, may not be reliable enough due to dependence on lighting conditions,

contamination, or similarity of appearance of different materials.

In a standard manipulation task, a robot must develop a grasping algorithm based on the physical properties of an object. Before making any physical contact with an object, it is important to determine the appropriate gripping forces for successful interaction. If the force applied is insufficient, the object may slip, while too much force may cause damage. One of the constant difficulties that arise from the lack of data on the types of materials in the environment is the lack of information on the weight and strength of unknown objects without physical contact. Thus, an urgent task is to find a method that will most effectively determine the type of material in an automated mode.

Consequently, there is a need for non-contact automated measurement of the physical properties of surrounding objects to improve the quality of robotic operations. The main difficulty lies in the fact that the surfaces of different materials may have similar textures, or, conversely, the same material may have different surfaces due to different manufacturing and processing methods. This study presents a promising approach that combines laser thermography and deep learning to implement an automated method for classifying materials by type.

Analysis of recent research and publications. Important information about the material properties can be obtained through direct physical contact between the measuring device and the object under test. This approach uses various diagnostic features of the object that occur during contact with it to recognise materials. These can include vibrations, contact forces, and thermal interactions.

Study [1] presents a haptic research method for recognising the material of an object's surface using a specially designed finger. Touch sensors provide diverse and accurate data on material characteristics and properties. However, the size and complexity of the designs, limitations on non-contact measurements, and high development costs hinder the development of a mobile and straightforward contact device.

In a study [2], researchers developed a method for determining the surface friction coefficient in various environments to optimize the performance of a bipedal robot in motion planning tasks. Although physical contact with an object allows for high Accuracy in determining the types of materials, the high cost and complexity of the design make it difficult to use this method and create an effective mobile device. Therefore, using material classification methods that do not require physical contact with the object and are easy to implement looks promising. One such method is infrared thermography [3].

Most of the existing research in this area is aimed at analysing thermograms of surfaces made of various materials. Infrared images are more informative than similar images in the visible spectrum [4]. This allows for automated classification of materials with more excellent reliability. The authors of [5] argue that typical algorithms use color and texture information for classification, but there are problems due to different lighting conditions and a variety of colors in the same class of materials. At the same time, the results show that the proposed thermal method allows for better classification results than conventional visual features of color and texture.

The approach described above is often used in machine vision systems [6]. In modern thermography, artificial intelligence methods are used to automate the thermogram analysis. Paper [7] also discusses the use of deep learning, various applications of thermography, types of infrared cameras, and data presentation formats for analyzing thermographic data. The authors provide examples of case studies that combine thermography methods and deep learning on various platforms, such as UAVs, mobile phones, and embedded systems. In particular, they describe methods for processing thermogram sequences using neural networks. Such approaches can be applied to the tasks of classifying materials by their thermal properties.

The study [8] considers the possibility of using radiation in the infrared spectrum as a specific material property for its classification. The authors propose to classify materials by type with specific algorithm, combining data from optical and infrared sensors. The SVM method is used for classification. The results of testing on real data show a significant improvement in the reliability of material recognition.

In [9], the authors propose an approach to combining infrared thermography with machine learning. According to the described method, a laser source stimulates the surface of an object, while an infrared camera captures its thermal signature. Software algorithms find the features of these signatures and pass them on to a classification algorithm that is decision tree-based. This method has demonstrated an increase in classification reliability.

Task statement. The aim of the study is to develop and evaluate a method for automated classification of materials based on temperature profiles obtained by laser thermography using deep learning models.

Description of the thermographic method of material classification. Thermographic data can

provide information about the material properties of an object of study by analysing how the temperature gradient on its surface changes over time and space. Heat propagation is described by the thermal conductivity equation, which includes a proportionality constant between the time derivative of the temperature and the spatial Laplace distribution. This constant is the thermal conductivity of a material, which reflects the ratio of its thermal conductivity to its volumetric heat capacity and indicates the ability of a material to conduct heat compared to its ability to store it. Different materials will heat and cool differently, which can be the basis for their automated classification.

The method of non-contact material type classification using thermography and machine learning can be described as follows: the object under study is heated using a laser source. A thermal imager records the heating and cooling of the object's surface. As a result, a sequence of thermograms is obtained that reflects the change in the thermal field of the object's surface over time. This sequence can be used to create a training data set.

To classify an object by type, one-dimensional temperature profiles in the pixels of the thermogram rather than two-dimensional images are sufficient to analyse. In other words, the diagnostic features will be formed based on the analysis of the nature of temperature changes at certain points on the object's surface during the heating and cooling procedure. The resulting temperature profiles are transferred to a model machine learning for further classification. The output of such a model will be a class label to which the system has assigned the thermal profile. To increase the reliability of the classification, it is necessary to analyse temperature profiles from several different points on the object's surface.

The scheme for implementing this approach is shown in Fig. 1. The flash controller control module instructs to generate a laser beam with the required duration and time waveform. The laser source heating, in turn, converts the electrical signal into a signal. A point actuator directs the generated optical signal to the sample. The actuator is controlled by the control module to perform heating at a precisely defined point. The thermal imager records a sequence of thermograms with a specified time interval between them. The data is sent to the module temperature profile, where classifications are analysed at the point heated by the laser. These profiles will differ for each type of material.

The temperature profiles of different materials can be very similar or overlap in some areas, which leads to a loss of reliability when using classical classification algorithms. For this reason, machine learning methods are recommended for automatic classification of temperature profiles. However, classical methods, such as decision trees or SVMs, have low noise immunity and do not perform well in time sequence analysis tasks, such as temperature profiles [10]. A more promising tool is deep learning methods – neural networks, which are widely used in data mining. The goal is to create a model that predicts the value of an object's class label based on the analysis of temperature profiles.

Thus, the temperature profiles will serve as input data vectors for the classification model, which will provide labels of the corresponding material classes as output. The number of hidden layers and neurons in them is selected experimentally during training and depends on the complexity of a particular task (number of material classes, presence of noise, etc.). It should be noted that one of the disadvantages may be the need for a large amount of training data for effective model training.

Description of deep learning models. Historically, the architecture of neural networks (NN) for classification tasks has been the first and most studied, as well as feedforward networks. Such networks provide for signal propagation in only one direction: from input to output. In the architecture of feedforward NN, there are no feedback loops, i.e., the output values of any layer do not affect this layer. This type of network is usually widely used for pattern recognition and signal classification and is described in detail in [11].

The main disadvantage of these networks in the task of classifying temperature profiles is that they consider all elements of the input vector as separate

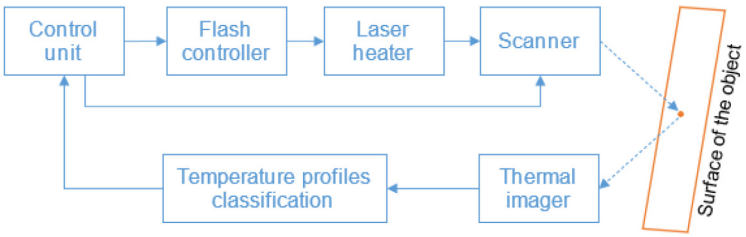


Fig. 1. Scheme of implementation of the thermal method for determining the type of material

and independent. However, temperature profiles are time sequences that reflect the nature of temperature change over time. Therefore, it is important to consider the relationships between measured temperature values within a temperature profile.

Long short-term memory (LSTM) is a type of recurrent neural network specially designed to work with data sequences and solve problems related to the loss of information in long sequences. The architecture of this class of networks is described in [12]. This architecture allows the model to store and use information for a long period of time, which makes it effective for tasks where the important context depends on a large number of previous elements of the sequence. Since the temperature profile is a time series that reflects the change in the temperature of an object's surface over time, LSTM is a promising architecture for use in this task.

The LSTM architecture has a number of modifications. One of them is Bidirectional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM), a modification specifically designed to work with data sequences and solve the problem of context loss in areas where both forward and backward information is important. Bi-LSTM allows you to use information in both directions in time, which increases its ability to model complex dependencies in sequences. A full description of this architecture can be found in [13]. Potentially, bi-directional analysis of temperature profiles can improve the quality of their classification.

Another modern deep learning model for classifying time sequences is 1-D Convolutional Neural Networks (1-D CNN). This class of models is a variant of convolutional neural networks designed to process one-dimensional data sequences, such as time series or text data. The main idea is to use convolutional networks to detect local patterns or features in the input sequences. A full description of the 1-D CNN architecture can be found in [14].

Simulation modelling. In order to generate a training data set and test the described method of automated classification of materials by type, we performed simulation modelling of the process of heating and cooling samples from different materials. The COMSOL Multiphysics environment was used for the simulation. Four materials were selected for the study: Wood (pine), Acrylic Plastic, Steel, and Aluminium.

The samples are typical objects of interaction in teleoperation manipulation tasks – small in size and made of solid rigid materials. Geometrically, the samples are rectangular parallelepipeds with a height and width of 100 mm and a variable thickness from 1 to 30 mm. The thermophysical characteristics of each material were taken from the built-in COMSOL library.

To simulate the heating of samples, the COMSOL physics interface Heat Transfer in Solids is used. It is designed to simulate heat transfer by conduction, convection, and radiation. By default, the Solid model is active in all domains and will be used for solid materials. In all dimensions of space, steady-state, frequency domain, and time domain simulations are supported. Since we are modeling heating over a finite time interval, we will use time-domain modeling. The following modules were used in the heating simulation: Solid, Initial Values, Deposited Beam Power, Heat Flux

Solid. This module applies the heat equation to model heat transfer in solids:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q,$$
$$q = -k\nabla T, \quad (1)$$

where ρ [kg/m^3] is the density of the solid; C_p [J/(kg-K)] is the heat capacity of the solid at constant pressure; k [W/(m-K)] is the thermal conductivity of the solid; u [m/s] is the velocity field defined by the Translational Motion subnode (in the case when parts of the model move in the material frame); Q [W/m^3] is the heat source.

Initial Values. This block sets the initial value for the temperature, which can be used as an initial condition for transient modelling. We set the standard value, which is approximately room temperature, to 293.15 °K (20 °C). This setting is set for the entire sample body.

Deposited Beam Power. This module simulates a heat source that transfers energy to a given face through laser beams. The Beam orientation parameter is used to set the beam orientation **e**. In our case, the beam will be directed along the y-axis.

In the Beam profile section, parameters such as the value of the superimposed beam power P_0 [W] and the coordinates of the beam start point O[m] are set. was set by the function $P_0 0.05 \cdot \text{step1}(t)$, i.e. 50 mW per *step1*. Step 1, in turn, is a function of time, which changes from one to zero at 0.4 seconds in the time domain.

The beam distribution type Distribution type was selected as Gaussian. Thus, the sample is heated for 0.4 seconds by a 50 mW laser beam with a Gaussian distribution:

$$f(O,e) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right), \; d = \frac{\|e \times (x-O)\|}{\|e\|}, \quad (2)$$

where σ [m] is the standard deviation (in this study – 0.3 mm paper).

Heat Flux. This module is used to add heat flux through the faces of the sample. It applies to all faces. The Material type parameter indicates whether the input data is defined in material or spatial boundaries. The Solid option indicates that the heat flux q_0 is defined in material boundaries. In the settings of the Heat Flux itself, Convective Heat Flux was selected, which is described by the equation:

$$q_0 = h \cdot (T_{ext} - T), \quad (3)$$

where: $h\left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}\right]$ – heat transfer coefficient; T_{ext} [K] – outdoor temperature; T [K] – object temperature.

The default option also allows you to enter a user-defined value for the heat transfer coefficient h $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}\right]$. In our case, it is equal to 5.

An example of the obtained distribution of the thermal field of the surface of a steel sample 30 mm thick before and after heating can be seen in Fig. 2.

Description of the training data set. Based on the results of the simulation, a dataset was created in the form of temperature profiles for the classification of four types of materials. The data set includes temperature profiles of samples of all ten thicknesses for each material. The temperature values were monitored at five different points on the sample surface for two seconds in 2-millisecond increments. Thus, each temperature profile vector consists of 100 elements. The measurement points were located in the centre of the laser beam imprint and in its vicinity. Graphs of all the obtained temperature profiles during fifty measurements for each material can be seen in Fig. 3.

In total, the modelling resulted in a dataset of 200 samples, which was subsequently used to train neural networks. This volume is considered to be small, which makes training difficult. Also, based on the above graphs, we can conclude that many temperature profiles are of the same type, forming a certain lack of unique data, which can also negatively affect the efficiency of NN. In addition, we can observe that the indicators of wood with plastic and steel with aluminum are very similar, which further complicates the classification.

Model training. Most of the training parameters were the same for all models. Adam was chosen as the optimizer with a learning 0.00001 rate. The loss function was the standard for the classification of categorical cross-entropy. Accuracy was used as a metric criterion. The training dataset was used as a test set of 15 % of the samples.

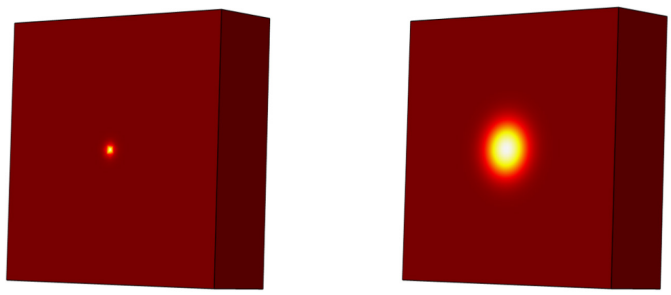
The models were trained using the Keras framework. The architecture of the models was chosen experimentally. The best results were obtained with the architectures shown in Table 1.

The number of samples in the training dataset was relatively small. Therefore, many epochs had to be used to train the models efficiently. Information about the number of hyperparameters of the implemented models, the number of training epochs, and the training results obtained on the test set is given in Table 2.

Discussion. As can be seen from Table 2, the highest percentage of correct answers was achieved in the Feedforward network. Compared to the other architectures, it also has the minimum number of epochs, which has a positive effect on the time required for its training. On the other hand, a large number of parameters reduces the model's performance.

The LSTM architecture has a slightly larger number of epochs than the other networks but a significantly smaller number of parameters, which, in practice, will mean a shorter training time and faster performance than other networks. However, the smallest percentage of correct answers casts doubt on its effectiveness in this task.

The Bi-LSTM network to train took fewer epochs than the baseline LSTM. Together with a small number of parameters, the network will learn and



a) b)

Fig. 2. Thermal field of the surface of a steel sample: *a* – at the beginning of heating; *b* – at the end of measurement

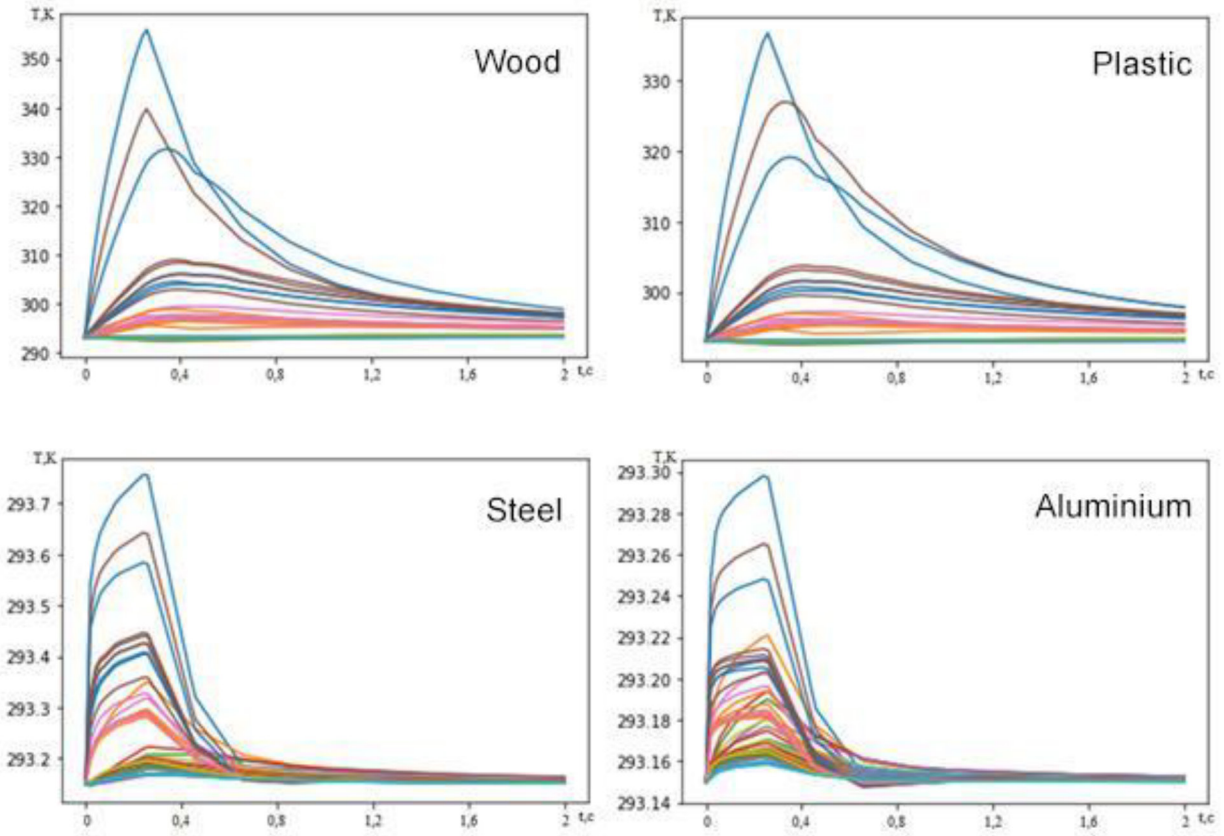


Fig. 3. Combined graph of the obtained temperature profiles of the samples

Table 1

Selected model architectures

Feedforward		LSTM		Bi-LSTM		1-D Convolutional	
Layers	*Output shape*	*Layers*	*Output shape*	*Layers*	*Output shape*	*Layers*	*Output shape*
Input	(100)	Input	(100,1)	Input	(100,1)	Input	(100,1)
Dense	(800)	LSTM	(100,100)	Bi-LSTM	(100,200)	Conv. 1D	(97, 128)
Batch norm	(800)	Dropout	(100,100)	Bi-LSTM	(40)	Conv. 1D	(95,64)
Dense	(100)	LSTM	(30)	Batch norm.	(40)	Max Pool	(47, 64)
Batch norm	(100)	Dense	(200)	Dense	(4)	Conv. 1D	(45,32)
Dropout	(100)	Batch norm.	(200)	–	–	Flatten	(1440)
Dense	(4)	Dense	4	–	–	Dense	(200)
–	–	–	–	–	–	Dense	(4)

Table 2

Comparison of training results of the developed architectures

Network type	Number of Parameters	Number of Epochs	Accuracy, %.
Feedforward	163,904	1000	76,6
LSTM	63,924	1500	70
Bi-LSTM	121,544	1000	73,3
1-D Convolutional	320,588	1000	73,3

work quickly. The percentage of correct answers is not the best, but not the worst either.

The 1D-Convolutional network is similar to the Bi-LSTM network in its results – it also trains for the same number of epochs and shows the same percentage of correct answers. However, it has the largest number of parameters of all the created architectures, so compared to Bi-LSTM, it will be slower to learn and perform.

According to the Table 2, it can be concluded that the multilayer feedforward network was the most accurate of all developed ones. The relatively large number of parameters negatively affects its performance, but this is not a decisive criterion in

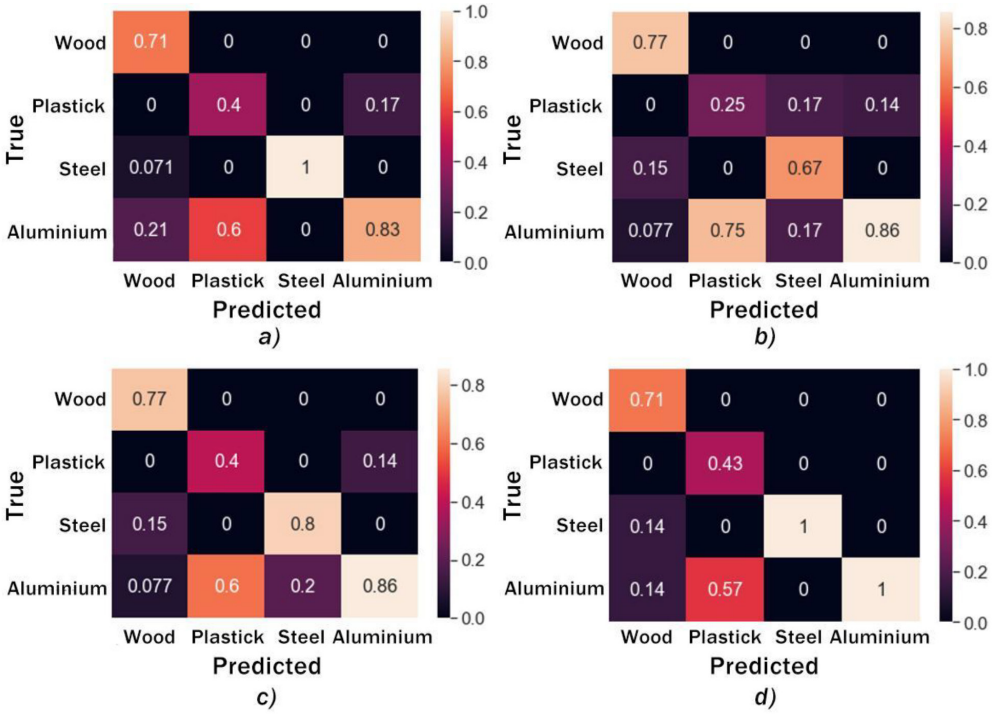


Fig. 4. Confusion matrices of models: *a* – Feedforward; *b* – LSTM; *c* – Bi-LSTM; *d* – 1-D Convolutional

the task of automated classification of materials by type.

The metric Accuracy provides a general understanding of the quality of the model. However, for a deeper understanding, it is also important to analyze the proportion of correct answers in the network for each class separately. For this purpose, confusion is used matrices. An error matrix displays all false and correct answers of the network for each class. The error matrices for each of the created models are shown in Fig. 4.

In terms of overall Accuracy, 1-D Convolutional is inferior to the multilayer direct propagation network, but this model has the best performance in terms of the error matrix. Thus, the network recognized two of the four classes (aluminum and steel) correctly. The model also has the highest classification plastic accuracy rate. Therefore, the final decision on the choice of a model for automating the process of classifying materials by temperature profiles should be made, taking into account all the features of the task.

We can conclude that networks are of particular interest for further research are Feedforward and 1-D Convolutional. The former has the best score accuracy, while the latter has the best error matrix. The training time of both networks is approximately the same. The 1-D Convolutional network has more parameters and takes up more memory space.

In general, all of the considered deep learning models demonstrate high classification accuracy rates, given a limited and monotonous training data set. In the future, attention should be paid to expanding the training dataset and optimising the chosen architecture of the deep learning model for classification.

Conclusions. Given the shortcomings of existing methods for determining the type of material, it is advisable to use thermography. The thermal method simplifies the classification, reduces the time required for its implementation, and is easier to automate. Since the pattern of heating and cooling a material creates a unique temperature profile that is specific to a particular type of material, it can serve as a reliable indicator for classification. The use of deep learning for automated temperature profiles can improve the Accuracy and efficiency of this process. Classification According to the results of training neural network models, the architectures considered in this paper showed a reliability of up to 76.6 %.

The proposed method can be used as part of robotic systems to solve the problem of determining the type of materials used in various industries and activities. An urgent task at the moment is to create an expanded set of training data in order to increase the reliability of material classification under different conditions measurements. It also promises to combine the analysis of temperature profiles and the nature of visual changes in the thermal field of the surface of the object under study. Convolutional neural networks can be used for automated analysis of thermograms.

Bibliography:

1. Liu H., Song X., Bimbo J. Surface material recognition through haptic exploration using an intelligent contact sensing finger. *Vilamoura*. 2012. pp. 52–57.
2. Chitta, S., Sturm, J., Piccoli, M., Burgard,W. Tactile sensing for mobile manipulation. *IEEE Trans. Robot*. 2011. No. 27. pp. 558–568.
3. Aujeszky T., Korres G., Eid M. Thermography-based material classification using machine learning. *EEE International Symposium on Haptic Audio-Visual Environments and Games*, Abu Dhabi, 3 March 2017.
4. Skladchykov I. O., Momot A. S., Galagan R. M., Bohdan G. A., Trotsiuk K. M. Application of YOLOX deep learning model for automated object detection on thermograms. *Information extraction and processing*. 2022. Vol. 2022, no. 50, pp. 69–77 DOI: https://doi.org/10.15407/vidbir2022.50.069
5. Saponaro P., Sorensen S., Kolagunda A. and Kambhamettu C. Material classification with thermal imagery *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015. pp. 4649–4656. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7299096
6. Галаган Р. М., Момот А. С., Протасов А. Г., Петрик В. Ф., Богдан Г. А. Тестування нейромережевих модулів системи теплової дефектометрії за допомогою імітаційного моделювання. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. № 6. с. 49–55. DOI: https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/08
7. Infrared machine vision and infrared thermography with deep learning: a review / Y. He et al. *Infrared physics & technology*. 2021. Vol. 116. P. 103754. DOI: https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103754
8. Großmann W., Horn H., Niggemann O. Improving remote material classification ability with thermal imagery. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, no. 1. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-21588-4
9. Aujeszky T., Korres G., Eid M. Material classification with laser thermography and machine learning. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2018. Vol. 16, no. 2. P. 181-202. DOI: https://doi.org/10.1080/17686733.2018.1539895
10. Application of support vector machine for pattern classification of active thermometry-based pipeline scours monitoring / X. Zhao et al. *Structural Control and Health Monitoring*. 2014. Vol. 22, no. 6. P. 903–918. DOI: https://doi.org/10.1002/stc.1724
11. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning. Frechen: MITP, 2018. 801 p.
12. Murugesan R., Mishra E., Krishnan A. Deep Learning Based Models: Basic LSTM, BI LSTM, stacked LSTM, CNN LSTM and CONV LSTM to forecast agricultural commodity prices. 2021. 32 p. (Preprint). DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-740568/v1
13. Zhao C., You J., Wen X., Li X. Deep Bi-LSTM Networks for Sequential Recommendation. *Entropy*. 2020. Vol. 22, no. 8. P. 870. DOI: https://doi.org/10.3390/e22080870
14. 1D convolutional neural networks and applications: A survey / S. Kiranyaz et al. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 151. P. 107398. URL: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107398

Момот А. С., Наконечний М. В., Галаган Р. М., Муравйов О. В. АВТОМАТИЗОВАНА КЛАСИФІКАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПРОФІЛІВ

У статті представлено метод автоматизованої класифікації матеріалів на основі аналізу їхніх температурних профілів. Використання лазерної термографії в поєднанні з алгоритмами глибинного навчання дозволяє здійснювати безконтактне розпізнавання типу матеріалу з високою точністю. Це особливо актуально для робототехнічних систем, які виконують маніпуляційні операції, автоматизований контроль якості та технічну інспекцію без фізичного контакту з об'єктом.

Огляд попередніх досліджень показав, що існуючі методи класифікації матеріалів мають певні обмеження. Візуальні методи можуть бути ненадійними через залежність від умов освітлення та схожість зовнішнього вигляду різних матеріалів. Контактні методи забезпечують високу точність, але вони складні у реалізації та вимагають фізичної взаємодії, що не завжди є доцільним у робототехніці. Тому термографічний підхід є перспективним, оскільки дає змогу визначати тип матеріалу за його реакцією на нагрівання та охолодження.

У роботі описано експериментальну систему, яка використовує лазерний промінь для нагрівання поверхні об'єкта, після чого тепловізор реєструє зміну температури у часі. Отримані температурні профілі аналізуються за допомогою методів машинного навчання. Виконано моделювання процесу теплопередачі для чотирьох типів матеріалів (дерево, пластик, сталь, алюміній) у середовищі COMSOL Multiphysics, що дозволило сформувати навчальний набір даних.

Для класифікації температурних профілів протестовано чотири архітектури нейронних мереж: Feedforward, LSTM, Bi-LSTM та 1D-Convolutional. Найкращі результати продемонструвала Feedforward-мережа, яка досягла долі правильних відповідей на рівні 76,6 %. Встановлено,

що температурні профілі деяких матеріалів мають значну схожість, що ускладнює класифікацію, тому подальші дослідження мають бути спрямовані на розширення набору навчальних даних та оптимізацію архітектури моделей.

Запропонований підхід має широкий спектр застосувань у промисловості та робототехніці, де потрібна швидка ідентифікація матеріалів без фізичного контакту. Автоматизована система класифікації матеріалів на основі температурних профілів може підвищити ефективність технологічних процесів, покращити безпеку виробництва та розширити можливості автономних роботизованих комплексів.

Ключові слова: *класифікація матеріалів, лазерна термографія, машинне навчання, нейронні мережі.*

УДК 621.181.1:681.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/22

Новіков П. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тесленко О. І.
Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

Бельдій В. І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бунке О. С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ ЕЛЕКТРОДНОГО КОТЛА ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ ІЗ ЗАНУРЕНИМ ЕЛЕКТРОДОМ

В Україні використання електродних котлів як споживачів-регуляторів на практиці є новітньою технологією для регулювання графіків електричного навантаження в енергосистемі. Промислові електродні котли мають велику потужність, вимірювану мегаватами або десятками мегават. Вони можуть суттєво впливати на рівень споживання енергії, навіть на рівні регіональних енергосистем. Зниження маневрових потужностей теплових і гідроелектростанцій покладає основну частку виробництва електроенергії на атомні електростанції, які не можуть швидко адаптуватися до графіків енергоспоживання. Внаслідок цього в енергосистемі присутні періоди з профіцитом електроенергії. В сучасних умовах технологічного розвитку в енергетиці з'явилась можливість побудови систем автоматичного регулювання частоти і потужності на принципово іншій основі, яку доцільно реалізувати в енергосистемі України. Побудова такої системи автоматичного регулювання частоти і потужності ґрунтується на зменшенні енергоспоживання спеціальною групою споживачів-регуляторів. Електродні котли дозволяють в короткий проміжок часу змінювати свою електричну потужність, здійснюючи перетворення електричної енергії в теплову. Разом з тим важливо дослідити динаміку змінити температури вихідного теплоносія такого котла. У статті розглядаються динамічні процеси виробництва теплової енергії та забезпечення уставки теплоносія на виході з котла при різких змінах споживання електричної енергії. Детально досліджено будову та фізичний процес нагрівання води в електродному котлі з зануреним електродом шведської компанії Zeta моделі ZVP 2840. Отримано математичні моделі динаміки для секції нагріву та секції змішування. Проведено моделювання перехідних процесів при різних змінах уставки теплоносія на виході з котла. Моделювання показало, що чим більша зміна уставки теплоносія, тим довший перехідний процес. При цьому величина зміні уставки в системі керування є пропорційною до динамічного відхилення.

Ключові слова: *електродний котел, занурений електрод, споживач-регулятор, динамічна модель, теплообмінник, балансування енергосистеми.*

Постановка проблеми. Потужні промислові електродні котли є електричними теплогенераторами (ЕТГ), які можуть швидко змінювати своє навантаження залежно від потреб споживача або енергосистеми, в яку вони підключені. Їх можна використовувати як споживачі-регулятори для стабілізації енергетичної системи. Залучення потужних ЕТГ в систему автоматичного регулювання частоти і потужності (САРЧП), на відміну від традиційного підходу, ґрунтується не на введенні додаткових регулюючих потужностей при виникненні в об'єднаній енергосистемі України (ОЕС) дефіциту активної потужності, а на зменшенні енергоспоживання спеціальною групою споживачів-регуляторів [1]. Це дозволяє використовувати їх для компенсації коливань виробництва електроенергії з інших джерел, зокрема відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [2, 3], або

при надлишку електроенергії, яка генерується атомними електростанціями (АЕС). З їх допомогою можливо регулювати частоту в енергосистемі, змінюючи їх потужність в реальному часі. Таким чином електродні котли можуть надавати системні послуги для енергосистеми щодо забезпечення стабільності та підтримки частоти на необхідному рівні [4, 5].

У періоди низького навантаження електродні котли можуть використовувати надлишкову електроенергію [6–8] для виробництва тепла, що зменшує втрати енергії та допомагає збалансувати систему.

Впровадження цієї технології, за даними [9], може позитивно вплинути на галузь, сприятиме ефективному використанню ресурсів та зменшить негативний вплив на навколишнє середовище [10, 11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електродні котли реалізують концепцію Power-to-Heat [12]. Їх перевагою, в порівнянні, з іншими типами споживачів-регуляторів, є великий діапазоном регулювання [13], так як вони перетворюють в теплову енергію від 95 до 99.5 % споживаної електроенергії. Електродні котли використовується в Європі більше 70 років. Вони набули широкого розповсюдження у 1960-х роках, особливо в країнах із значними гідроенергетичними ресурсами (наприклад, Норвегія) [14]. Приблизно в 2010 році, з'явився новий ринок електродних котлів: регулювання мереж зі зростаючою часткою генерації переривчастого вітру. Перші запити надійшли від датських муніципальних когенераційних установок, від яких датський регулятор електромережі вимагав встановити тепловий накопичувач, щоб запобігти потенційній нестабільності мережі, що виникає через значну потужність вітрової енергетики в мережі. У цьому випадку вся потужність котла використовується для, так званого, негативного регулювання (negative regulation) [10] мережі.

В Україні Інститутом загальної енергетики НАН України проводилися дослідження [15] з ущільнення добових графіків електронавантаження (ДГЕН) з використанням електродних котлів. В роботі [16] проведені еколого-енергетичні розрахунки результатів впровадження комплексу електродних котлів з метою зменшення значень нічного провалу ДГЕН і, як наслідок, збільшення ефективності виробництва електроенергії існуючими вугільними ТЕС. В роботі [13] визначені акумуляційні можливості централізованих систем опалення великих міст, що дозволяє використовувати електродні котли в парадигмі Power-to-Heat навіть в літній період для потреб ГВП.

В роботі [17] здійснений аналіз існуючих технологій генерації теплової енергії з використанням електродних котлів з метою визначення динамічних характеристик цих котлів при зміні електронавантаження в контексті можливості їх застосування в системі автоматичного регулювання частоти і потужності (АРЧП) енергосистеми України.

Але у згаданих вище роботах не проводився аналіз динамічних характеристик котла з теплової частини. Актуальною задачею є визначення якості роботи системи регулювання для забезпечення уставки теплоносія на виході з котла при різких змінах споживання електричної енергії.

Постановка завдання. Метою статті є отримання кількісних результатів функціонування системи керування процесом нагрівання теплоносія в електродному котлі великої потужності із зануреним електродом. В даній статті увагу зосереджено на динамічних процесах нагрівання води в електродному котлі шведської компанії Zeta моделі ZVP 2840.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити будову та фізичний процес нагрівання води в електродному котлі з зануреним електродом.
2. Отримати динамічну математичну модель процесу нагріву води в електродному котлі.
3. На основі математичних моделей розробити систему керування.
4. Провести моделювання системи керування для отримання перехідних процесів.

У роботі використовуються математичні методи дослідження, такі як опис фізичного процесу за допомогою диференціальних рівнянь, перетворення Лапласа, рівняння теплового та енергетичного балансу, а також методи комп'ютерного моделювання.

Виклад основного матеріалу. Динамічна модель секції нагрівання теплоносія.

Розглянемо конструкцію електродного котла Zeta моделі ZVPI/ZHPI [18]. Детально схема і принцип роботи даного типу описані в [17, 18].

Котел можна умовно розділити на три секції (рис. 1). Вода надходить в бак по трубі знизу, а виходить зверху, тобто вода рухається знизу вгору.

Перша секція – нижня (1). Тут передача теплової енергії відсутня, тобто теплоносій фактично не контактує з електродами і не нагрівається. Вода в баку розширюється, швидкість потоку зменшується.

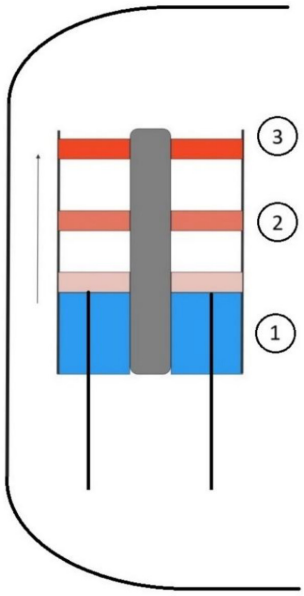


Рис. 1. Схематичне зображення основних зон в баку котла та їх меж

В наступній секції теплоносій потрапляє в зону протікання струму від електрода до протиелектроду і, відповідно, починається нагрів (2). Цей процес є лінійним. Далі теплоносій поступово піднімається вгору і покидає ділянку контакту з електродом. В цей момент нагрів завершується.

У верхній частині бака котла (3) нагрітий теплоносій змішується з холодною водою, яка потрапляє туди оминувши зону нагрівання, наприклад через ділянку між стінкою котла та протиелектодом.

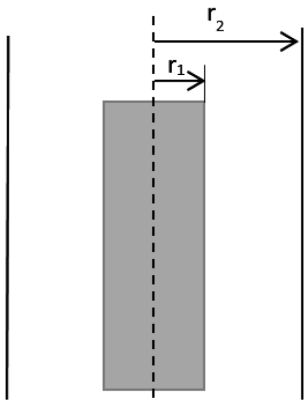


Рис. 2. Схематичне зображення положення електрода та протиелектрода

Струм який протікає по концентричним провідникам можна розрахувати використавши наступну формулу [19]:

$$I = \frac{2\pi L\sigma V_0}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (1)$$

де L – довжина оголеного електрода, см, σ – електропровідність води, См/см, V_0 – напруга, В, r_1, r_2 – радіуси електрода та протиелектрода відповідно,см

Потужність обчислюється за формулою:

$$P = UI. \quad (2)$$

Підставивши (1) в (2) можна визначити електричну потужність котла:

$$P = UI = \frac{2\pi L\sigma U^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2\pi\sigma U^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}L. \quad (3)$$

В формулі (3) можна виділити вираз для розрахунку значення, яке не залежитиме від довжини оголеного електрода L:

$$\lambda = \frac{2\pi\sigma U^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}. \quad (4)$$

Підставивши (4) в (3) формула для визначення електричної потужності набуде вигляду:

$$P = \lambda L. \quad (5)$$

Кількість теплоти віддане будь-яким джерелом (нагрівачем) розраховується за формулою:

$$Q = P\tau, \quad (6)$$

де P – потужність джерела, τ – час протягом якого джерело віддавало тепло.

Підставивши (5) в (6) отримаємо:

$$Q = \lambda L\tau. \quad (7)$$

Запишемо рівняння теплового балансу:

$$Q(t) = Q_{out}(t) - Q_{in}(t), \quad (8)$$

де $Q(t)$ – теплова енергія передана теплоносію від електродів, $Q_{in}(t)$ – кількість теплоти, яку має теплоносій на вході в котел, $Q_{out}(t)$ – кількість теплоти, яку має теплоносій на виході з котла.

Відповідно до формули визначення кількості теплоти:

$$Q_{out} = cmT_{out} = cg\tau T_{out}; \quad (9)$$

$$Q_{in} = cmT_{in} = cg\tau T_{in}, \quad (10)$$

де g – масова витрата теплоносія, кг/с, c – питома теплоємність речовини, Дж/(кг · °С); T_{in}, T_{out} – температури на вході та виході з зони нагріву, °С

Теплова енергія, що передається протягом проміжку часу $\tilde{t}$:

$$Q(t) = \lambda\int_0^{\tilde{t}} L(t - \tau(g, L))dt, \quad (11)$$

де $\tau(g, L)$ – часова затримка що залежить від масової витрати теплоносія та довжини оголеного електрода, $\tilde{t}$ – час, протягом якого теплоносій проходить оголену частину електродів L.

Кількість теплоти після зони нагріву дорівнюватиме:

$$Q_{out}(t) = cg\int_0^{\tilde{t}} T_{out}(t)dt. \qquad (12)$$

Кількість теплоти теплоносія який оминає зону нагріву, в початковій точці змішування:

$$Q_{in}(t) = cg\int_0^{\tilde{t}} T_{in}(t-\tau(g))dt, \qquad (13)$$

$\tau(g)$ – час який знадобиться холодній воді щоб пройти повз зону нагрівання.

Підставивши (11)–(13) у (8) отримаємо рівняння динаміки зміни температури на виході з зони нагріву:

$$\lambda\int_0^{\tilde{t}} L(t-\tau(g,L))dt = cg\int_0^{\tilde{t}} (T_{out}(t) - T_{in}(t-\tau(g)))dt, \qquad (14)$$

$$\frac{\lambda}{cg}L(t-\tau(g,L)) + T_{in}(t-\tau(g)) = T_{out}(t). \qquad (15)$$

Динамічна модель секції змішування

У верхній частині баку котла нагрітий теплоносій змішується з холодною водою, яка потрапляє туди оминувши зону нагрівання, наприклад через тонку ділянку між стінкою котла та протиелектодом.

Процес змішування в у зоні змішування описується наступним рівнянням [20]:

$$m\frac{dh_{сум}}{dt} = M_{гар}h_{гар} + M_{хол}h_{хол} - M_{сум}h_{сум}, \qquad (16)$$

де m – маса води в зоні змішування; $h_{хол}$, $h_{гар}$, $h_{сум}$ – ентальпії гарячого, холодного теплоносіїв і суміші відповідно; $M_{хол}$, $M_{гар}$, $M_{сум}$ – масова витрата гарячого, холодного теплоносіїв і суміші відповідно.

Згрупуємо ентальпії суміші в лівій частині диференційного рівняння:

$$m\frac{dh_{сум}}{dt} + M_{сум}h_{сум} = M_{гар}h_{гар} + M_{хол}h_{хол} \qquad (17)$$

або

$$\frac{m}{M_{сум}}\frac{dh_{сум}}{dt} + h_{сум} = \frac{M_{гар}h_{гар} + M_{хол}h_{хол}}{M_{сум}}; \qquad (18)$$

$$\frac{m}{M_{сум}} = T_{сум}; \qquad (19)$$

$$M_{сум} = M_{гар} + M_{хол}; \qquad (20)$$

$$\frac{dh_{сум}}{dt} + h_{сум} = \frac{M_{гар}h_{гар} + M_{хол}h_{хол}}{M_{гар} + M_{хол}}, \qquad (21)$$

де $T_{сум}$ – постійна часу, с;

Детальне виведення рівняння динаміки зони зміщування, перехід від ентальпій до температури теплоносія і кількісний розрахунок коефіцієнтів диференційного рівняння наведений в статті [16].

Диференційне рівняння по температурі теплоносія за зоною змішування має вигляд:

$$22\frac{dt_{сум}}{dt} + t_{сум} = 0.6t_{гар} + 0.4t_{хол}, \qquad (22)$$

де $t_{сум}$ – функція часу по температурі суміші гарячої і холодної води; $t_{гар}$ – функція часу по температурі гарячої води після зони нагрівання; $t_{хол}$ – функція часу по температурі холодної води.

Моделювання системи керування

Структурна схема системи керування температурою на виході із котла наведена на рис. 3. Моделювання роботи системи керування проводилось за допомогою програмного забезпечення Matlab. Модель складається з двох основних секцій: нагрівання і змішування. Сигнал керування $u(t)$ подається на виконавчий механізм, яким є електропривод постійної швидкості. Привод двигуна з'єднаний з тросом, який опускає або піднімає ізоляційні екрани на заданий рівень. Привод описується як функція передачі інтегратора з коефіцієнтом підсилення 1/1,8, що означає, що час відкриття на 100 % здійснюється за 180 секунд. Система

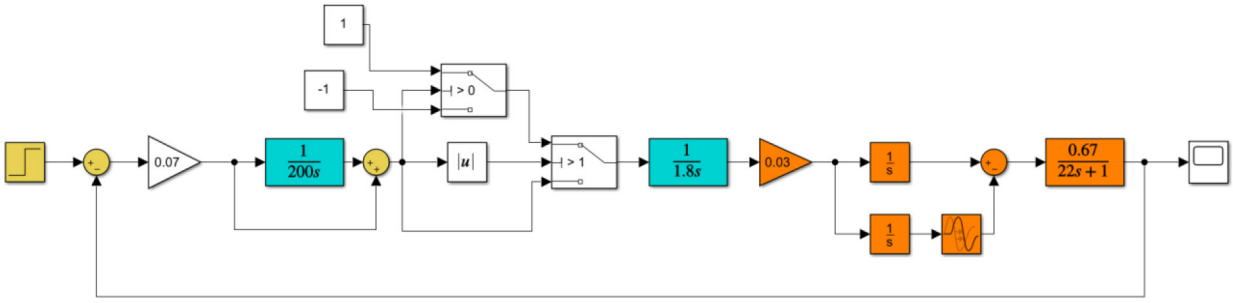


Рис. 3. Структурна схема системи керування котлом

керування на основі ПІ-регулятора з пропорційним параметром налаштування K_p = 0,07 та інтегральним параметром налаштування K_i = 1/200 = = 0,005. Коли екрани максимально закривають електрод, котел працює на мінімальній потужності, а при повністю відкритих екранах досягається максимальна потужність.

На рис. 4 показано, як змінюється температура теплоносія на виході при зміні уставки теплової води на виході на 5 °С, 10 °С, 20 °С і 30 °С:

Змінюючи задане значення, отримані результати моделювання відрізняються один від одного. Зокрема, час, коли температура охолоджуючої рідини досягає свого пікового значення, збільшується залежно від збільшення уставки.

З результатів аналізу видно, що чим більше змінюється положення екранів, тим довше триває процес нагріву теплоносія. Іншими словами, тривалість процесу нагрівання залежить від швидкості зміни положення екранів. Змінюючи задане значення, отримані результати моделювання відрізняються один від одного. Зокрема, час, коли температура охолоджуючої рідини досягає свого пікового значення, збільшується залежно від збільшення уставки. Для зміни уставки до 5 °С процес переходу триває 350 секунд, для зміни уставки до 10 °С процес переходу триває 400 секунд, для 20 °С – 500 секунд і для максимальної зміни уставки до 30 °С – 600 секунд. Тривалість розгінних характеристик для цього об'єкта залежить від його режиму роботи, тобто такий об'єкт характеризується нестаціонарністю динамічних характеристик.

Висновки. Незважаючи на швидкісні динамічні властивості з електричної частини, зокрема для котла ZVP 2840 швидкість зміни навантаження від мінімального до максимального становить 180 секунд, теплові процеси в цьому котлі є повільнішими. Для зміни уставки на 5 °С перехідний процес по температурі на виході з котла становить 350 секунд, при зміні уставки на 10 °С перехідний процес триває 400 секунд, для 20 °С – 500 секунд і для максимальної зміни уставки на 30 °С – 600 секунд. При цьому чим більше значення зміни уставки, тим більшою є динамічна похибка в процесі регулювання. При зміні уставки на 5 °С вона складає 1,5 °С, на 10 °С – 3 °С, а при зміні уставки 30 °С динамічна похибка досягає 14 °С. Результати моделювання підтверджуються технологічним регламентом експлуатації цього котла, в якому дозволяється змінювати уставку за один перехідний процес на 10 °С. Таким чином, застосування електродного котла із зануреним електродом як високоманевреного споживача-регулятора може бути ускладнене у випадку, коли до температури вихідного теплоносія висуваються жорсткі вимоги до точності підтримання температури. У випадку, коли такі вимоги відсутні, або між котлом і споживачем теплової енергії встановлена буферна ємність, то котли даного типу можуть успішно застосовуватися як споживачі-регулятори з динамічними характеристиками, які визначаються технічними засобами керування цим котлом. У випадку з котлом марки ZVP 2840 швидкість зміни електричної потужності напряму пов'язана з швидкістю

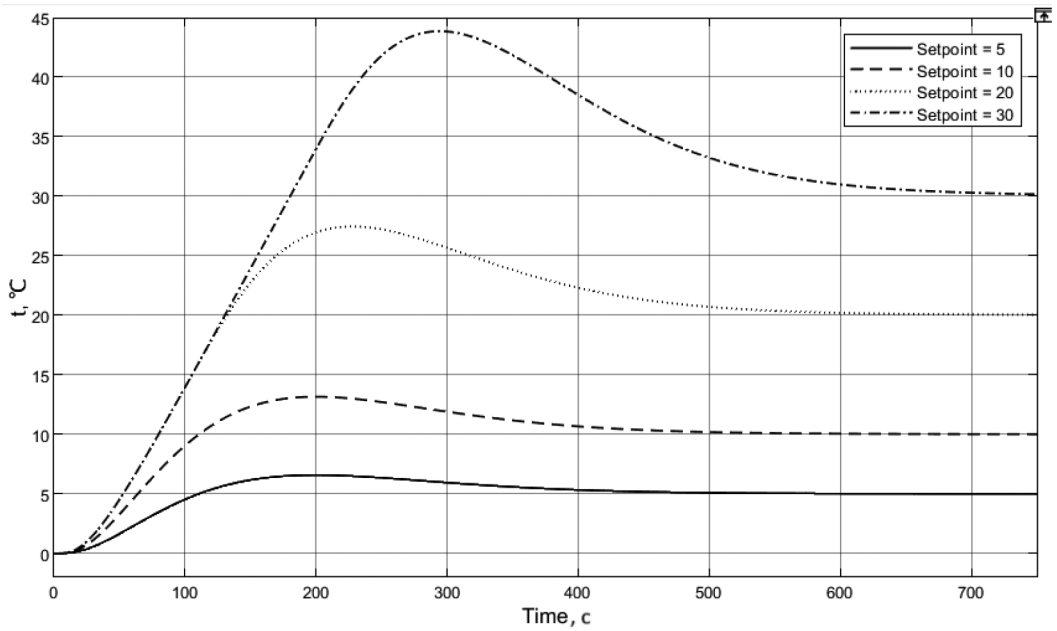


Рис. 4. Перехідні процеси в системі керування котла із зануреним електродом

ходу електропривода ізолюючих екранів електродів. Усі вище зазначені характеристики необхідно враховувати при проектуванні та налагодженні системи керування електричним котлом в режимі споживач-регулятор для балансування енергетичної системи.

Список літератури:

1. Кулик М. М. Техніко-економічні аспекти використання споживачів-регуляторів у системах автоматичного регулювання частотою і потужністю. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Том 1. № 40. С. 20–28. DOI: 10.15407/pge2015.01.020

2. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J. E., Hvelplund F., Mathiesen B. V. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*. 2014. V. 68, P. 1–11. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089

3. Revesz A., Jones P., Dunham C., Davies G., Marques C., Matabuena R., Scott J., Maidment G. Developing novel 5th generation district energy networks. *Energy*. 2020. V. 201, 117389. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117389

4. Buffa S., Cozzini M., D'Antoni M., Baratieri M., Fedrizzi R. 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. V. 104, P. 504–522. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.059

5. Wirtz M., Heleno M., Moreira A., Schreiber T., Müller D. 5th generation district heating and cooling network planning: A Dantzig–Wolfe decomposition approach. *Energy Conversion and Management*. 2023. V. 276, 116593. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116593

6. Derii V., Teslenko O., Lenchevsky E., Denisov V., Maistrenko N. Prospects and energy-economic indicators of heat energy production through direct use of electricity from renewable sources in modern heat generators. *Systems, Decision and Control in Energy IV*. 2023. V. I. P. 451–463. DOI: 10.1007/978-3-031-22464-5_27

7. Babak V., Kulyk M. Possibilities and perspectives of the consumers-regulators application in systems of frequency and power automatic regulation. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2023. № 4. P. 72-80. DOI: 10.15407/techned2023.04.072

8. Hotra O., Kulyk M., Babak V., Kovtun S., Zgurovets O., Mroczka J., Kisała P. Organisation of the Structure and Functioning of Self-Sufficient Distributed Power Generation. *Energies*. 2024. 17 (1). 27. DOI: 10.3390/en17010027

9. Пантєлєєва І. В., Шматько Н. М., Глушко А. В. Види інновацій в енергетиці, що розвиваються. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34(73). № 4. С. 129–134. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.4/21

10. Witkowski K., Haering P., Seidelt S., Pini N. Role of thermal technologies for enhancing flexibility in multi-energy systems through sector coupling: technical suitability and expected developments. *IET Energy Syst. Integr*. 2020. 2. P. 69–79. DOI: 10.1049/iet-esi.2019.0061

11. Liu D., Zhang G., Huang B., Liu W. Optimum Electric Boiler Capacity Configuration in a Regional Power Grid for a Wind Power Accommodation Scenario. *Energies*, 2016. 9(3):144. DOI: 10.3390/en9030144

12. Power-to-X / Вікіпедія: вільна енциклопедія. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Power-to-X (дата звернення 25.03.2025).

13. Дерій В. О., Левчук А. П. Реальний потенціал маневреної потужності ТЕЦ України з впровадженими електротепловими регуляторами. *Проблеми загальної енергетик*. 2016. Том 3. № 46. С. 19–27. DOI: 10.15407/pge2016.03.019

14. Electrode boilers and the energy transition. *Modern Power Systems*. URL: https://www.modernpowersystems.com/features/featureelectrode-boilers-and-the-energy-transition-6229858 (дата звернення 27.03.2025).

15. Ленчевський Є. А., Тесленко О. І. Перспективні можливості збільшення загального потенціалу маневрених потужностей об'єднаної енергетичної системи України. *Вчені записки ТНУ імені Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32(71). № 3. С. 194–202. DOI: 10.32838/2663-5941/2021.3/30

16. Новіков П. В., Тесленко О. І., Ленчевський Є. А. Еколого-енергетичні показники технології управління режимами об`єднаної енергосистеми України із використанням електричних теплогенераторів. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 1. С. 4–16. DOI: 10.33070/etars.1.2022.01

17. Novikov P., Teslenko O., Beldii V., Lenchevsky E., Bunke O. Review of Technologies of Thermal Energy Generation Using High Voltage Electrode Boilers in the Context of Their Application as Energy Load Regulator. In: Zaporozhets, A. (editor). *Systems, Decision and Control in Energy V*. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. V. 481. P. 355–370. DOI: 10.1007/978-3-031-35088-7_18

18. Introducing the world's best hot water and steam boilers. *Zander & Ingeström AB*. URL: https://www.zeta.se/siteassets/zander--ingestrom/elpannor/dokument-elpannor/hot-water-and-steam-boilers_en.pdf (дата звернення 27.03.2025).

19. Purcell E.M. Solutions Manual to Accompany Electricity and Magnetism: Berkeley Physics Course, Volume 2. First Edition. McGraw-Hill, 1966.

20. Novikov P., Teslenko O., Beldii V., Lenchevsky E., Shtifzon O. Dynamic Model of a High-Capacity Electric Boiler with an Immersed Electrode. In: Babak V., Zaporozhets A. (eds). *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. V. 552. P. 243–260. DOI: 10.1007/978-3-031-67091-6_11

Novikov P.V., Teslenko O.I., Beldii V.I., Bunke O.S. MODELING OF THE WATER TEMPERATURE AUTOMATION SYSTEM OF A HIGH-POWER ELECTRODE BOILER WITH AN IMMERSED ELECTRODE

In Ukraine, the use of electrode boilers as consumers-regulators is in practice the modern technology for regulating electrical load schedules in the power system. Industrial electrode boilers have a large capacity, measured in megawatts or tens of megawatts. They can significantly affect the level of energy consumption, even at the level of regional power systems. The reduction in the shunting capacities of thermal and hydroelectric power plants places the main share of electricity production on nuclear power plants, which cannot quickly adapt to energy consumption schedules. As a result, there are periods of electricity surplus in the power system. In modern conditions of technological development in the power industry, it has become possible to build automatic frequency and power control systems on a fundamentally different basis, which is advisable to implement in the power system of Ukraine. The scheme of such an automatic frequency and power control system is based on reducing energy consumption by a special group of consumers-regulators. Electrode boilers allow changing their electric power in a short period of time, converting electrical energy into thermal energy. At the same time, it is important to study the dynamics of changing the temperature of the output coolant of such a boiler. The article considers the dynamic processes of thermal energy production and ensuring the coolant setpoint at the boiler outlet during sharp changes in electrical energy consumption. The structure and physical process of heating water in an electrode boiler with an immersed electrode of the Swedish company Zeta model ZVP 2840 are studied in detail. Mathematical models of dynamics for the heating section and the mixing section are obtained. Transient processes are simulated with various changes in the coolant setpoint at the boiler outlet. The modeling showed that the greater the change in the coolant setpoint, the longer the transient process. In this case, the magnitude of the change in the setpoint in the control system is proportional to the dynamic deviation.

Key words: *electrode boiler, control system, consumer-regulator, dynamic model, heat exchanger, power system balancing.*

УДК 004.89
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/23

Павлов В. Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СЕМАНТИЧНІ ТА ЛЕКСИЧНІ ОЗНАКИ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО КОДУ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ

У статті розглянути проблеми, які виникають останній час у зв'язку зі масовим застосуванням штучного інтелекту (ШІ) для створення текстів, у тому числі й текстів комп'ютерних програм. Зазначено, що при загальному позитивному впливі, який насамперед зробив рутинну працю більш ефективною та швидкою, застосування штучного інтелекту створило й певні проблеми у сферах збереження авторського права та сприяння академічної доброчесності. Якщо раніше кожний випадок застосування творчих здобутків іншою людини розглядався як плагіат, який свідомо здійснив недоброчесний автор, то застосування при написанні штучного інтелекту зробило цей процес неявним та прихованим. Справа у тому, що будь-який штучний інтелект побудований на основі великої мовної моделі (LLM), яка розглядає елементи людської мови (токени), як числа, та обробляє їх за певними математичними формулами. Для цього оцифрування спочатку створюється певна множина токенів, які об'єднуються у послідовності. Таким чином відбувається генерація тексту. Але штучний інтелект передбачає постійне навчання за рахунок вивчення людських текстів. З них він бере й стали вирази, й цілі фрази, які потім застосовує при генерації. По факту відбувається створення текстів, які компілюються з багатьох джерел, але за рахунок використання чиїсь думок та здобутків.

У статті розглядаються сервіси, які виявляють застосування ШІ у звичайних текстах, робиться аналіз та порівняння їх ефективності на прикладі дослідження тестового тексту, який був згенерований ChatGPT. На підставі отриманих результатів автор визначає, що не завжди детектування дає достовірну інформацію про відсутність або наявність ознак застосування при створенні тексту генеративним ШІ.

Далі у статті описані дослідження з застосування ШІ для генерації текстів комп'ютерних програм. За результатами аналізу сервісів ШІ зроблена їх класифікація за мовами програмування та спеціалізацією сервісів. Подальші дослідження відбуваються зі застосуванням мови Assembler, яка найменше схожа з людською мовою. У статті наводяться приклади формулювання завдань для ШІ, за якими генеруються тексти програм. Далі аналізується якість та працездатність цих комп'ютерних програм, відмічаються певні ознаки, які дозволяють визначити, що текст програми був створений за допомогою ШІ. Також наведені результати детектування застосування ШІ при розробці комп'ютерних програм.

Ключові слова: *штучний інтелект, академічна доброчесність, детектування використання ШІ, Assembler, стиль тексту.*

Постановка проблеми. Сімдесят п'ять років тому відбулася подія, вплив якої зараз важко переоцінити: вийшла стаття відомого математика Алана Тюрінга [1, с. 454], у якої він розглядав можливість моделювання комп'ютером інтелектуальної діяльності людини. Там же у статті був вперше викладений славнозвісний «тест Тюрінга», у якому людині пропонувалося шляхом спілкування з іншою людиною та «розумною машиною», з'ясувати, де є спілкування з людиною, а де з її імітацією. На той час стаття була сприйнята з відомою долею гумору, бо ніхто, навіть у самих сміливих думках не міг передбачити, що імітація комп'ютерною програмою розумових дій людини колись стане реальністю. До речі, у тієї ж самої статті Тюрінг передбачив, що вдосконалення та розвиток імітаційних моделей буде відбуватися шляхом їх навчання.

Зараз ми можемо бачити, що застосування штучного інтелекту (ШІ) охопило майже усі сфери діяльності людини: медицину, транспорт, робототехніку, безпеку життєдіяльності, військову справу, офісну діяльність, бізнесову та фінансову діяльність та навіть деякі види мистецтва.

Але разом з тим виникає питання, чи спроможні ми контролювати розвиток штучного інтелекту, спрямовувати його застосування у потрібному напрямку та обмежувати там, де його безконтрольне використання може нанести шкоду у етичному сенсі. Насамперед мова йде про застосу-

вання штучного інтелекту у тих сферах, де творча діяльність людини регулюється такими категоріями, як інтелектуальна власність, авторське право, академічна доброчесність. Так, дійсно, генеративний штучний інтелект не є суб'єктом, якого можна розглядати, як дійсного автора якогось тексту, але він може вдало компілювати чиїсь твори, а тому його використання може розглядатися, як порушення авторського права тих осіб, чиї тексти він вдало переробив та застосував. Що стосується особи, яка буде користуватися цими «здобутками» генеративного ШІ, то залишимо кваліфікацію цієї дії на розсуд правників, нас буде цікавить інше питання, чи може бути виявлене застосування ШІ шляхом аналізу певних текстів? По суті це питання можна сформулювати як сучасну інтерпретацію «тесту Тюрінгу»: чи існують методи та засоби виявлення, хто дійсно є автором тексту: людина чи комп'ютерна програма. Цьому й будуть присвячені проведені дослідження.

Постановка завдання. Метою статті є викладення результатів проведених досліджень з визначення ознак застосування генеративного ШІ у звичайних текстах, а також у текстах комп'ютерних програм для перешкоджання неправомірного їх використання у якості свої здобутків не доброчесними користувачами.

Для досягнення означеної мети вирішуються наступні завдання:

– отримання примірників таких текстів для визначення можливостей генеративних ШІ;

– використання засобів детектування використання ШІ та порівняння їх ефективності;

– визначення семантичних та лексичних ознак застосування ШІ при аналізі текстів комп'ютерних програм.

Виклад основного матеріалу. Спочатку отримуємо об'єкт для дослідження. Найпростіший спосіб для цього – сформувати цей текст власноруч за допомогою якогось з сервісів штучного інтелекту. Їх достатньо багато, тому спочатку сформулюємо вимоги для, якім сервіс повинен задовольняти:

1. Спеціалізація з генерації текстів. Для цього сервіс повинен бути побудований на основі великих мовних моделей, тобто генерувати відповіді, шляхом побудови послідовності слів згідно лексичним особливостям певної людської мови. Зараз цьому критерію задовольняють більшість сервісів ШІ.

2. Підтримка української мови у запитах та відповідях. На жаль, ця вимога вельми суттєво скорочує перелік сервісів ШІ, бо, наприклад такі сервіси як **ClosersCopy** (https://www.closerscopy.com/), **AI-Writer** (https://ai-writer.com/) або **Writesonic** (https://writesonic.com/) не «розуміють» запитів українською та, відповідно, не генерують текстів українською мовою.

3. Безкоштовність або умовна безкоштовність. Ця вимога теж обмежила список сервісів, бо їх розробники у більшості розглядають їх як комерційні.

Після цього у залишку серед найвідоміших сервісів ШІ залишаються чат-боти **Gemini** від Google (***https://gemini.google.com/app***), **Claude** (***https://claude.ai***),**Copymate**(***https://copymate.app/***), **Copilot** (***https://www.copy.ai/***) та **ChatGPT** (***https://chatgpt.com***). Цікаво, що й **Copymate**, й **Copilot** базуються саме на **ChatGPT-4**, тому я майже без вагань обрав у якості полігона для досліджень саме **ChatGPT**. Після реєстрації та декількох тестових питань, на які я отримав досить розумну відповідь, я зробив запит до GhatGPT щодо можливості виявлення застосування ШІ при створенні текстового документу, на що отримав відповідь у вигляді тексту довжиной 295 слів, яка складалась зі 7 нумерованих пунктів та висновку.

За браком місця та тому, щ це – не мій текст, я приведу лише невеликий його фрагмент, у якому ChatGPT визначає ознаки застосування ШІ:

• *Проблеми із розумінням контексту. ШІ може створювати текст із правильними словами, але з помилковим або нерелевантним контекстом.*

• *Недостатня глибина аналізу. Алгоритми часто надають загальну інформацію без глибокого занурення у тему.*

Як бачимо, він надає цілком слушні поради та визначає деякі ознаки застосування самого себе, або схожих програм при створенні тексту. Як кажуть, йому, тобто **ChatGPT**, це краще знати зсередини цього процесу.

На другому етапі цей текст, який ПОВНІСТЮ був згенерований ШІ, досліджувався на декількох Інтернет-сервісах, які позначені, як детектори використання ШІ.

Усього було досліджено 5 сервісів, за допомогою яких виявляється застосування генеративного ШІ при формуванні документів. ТРИ з цих сервісів були запропоновані **ChatGPT** у відповіді на мій запит (**GPTZero, Originality.AI, Turnitin**. Ще ДВА сервіса (**zerogp, HIX.AI**) були знайдені мною самостійно під час виконання досліджень.

ДВА сервіси (**GPTZero, zerogp**) виявилися платними, але з можливістю використовувати їх безкоштовну версію, звичайно, з певними обмеженнями. У одному сервісі (**Originality.AI** –

https://originality.ai/) можливість працювати безкоштовно не була мною знайдена. Один сервіс (**Turnitin** – ***https://www.turnitin.com/***) потребував ліцензії, а один (**HIX.AI**) працює ЦІЛКОМ БЕЗКОШТОВНО.

Тому фактично вдалося протестувати лише ТРИ сервіси. При цьому:

• сервіс **zerogp** (***https://www.zerogpt.com/***) надав дуже НЕТОЧНУ інформацію (**32,4 %**) при тестуванні документа, який був ПОВНІСТЮ створений за допомогою ChatGPT;

• сервіс **GPTZero** (***https://gptzero.me/***) надав значну кращу оцінку (**97 %**), причому з поясненнями щодо цього, які до того ж надані у вигляді звіту у форматі PDF-файлу (доданий до модулю);

• сервіс **HIX.AI** (***https://bypass.hix.ai/ru/originality-ai***) не зробив висновку у вигляді цифр, але текстово повідомив, що наданий текст скоріше за все був згенерований за допомогою ШІ. Також цей сервіс надав можливість перевірити ще один документ. В якості нього був наданий фрагмент тексту з цього модулю, який я написав самостійно. Цей фрагмент був перевірений з результатом, текст на 100 % написаний людиною, що відповідає дійсності.

Таким чином, перший етап досліджень показав, що не усі сервіси, які декларують себе, як таки, що виявляють наявність у тексті ознак використання ШІ, насправді можуть це робити з достатньою точністю. Більш-менш впорались з цим завданням **GPTZero** та **HIX.AI**.

Наступним етапом досліджень була перевірка спроможності ШІ генерувати тексти комп'ютерних програм та також виявляти цей факт. Згадаємо, що ще Алан Тюринг передбачав, що це стане колись можливим [1, с. 455].

Дійсно, зараз існую досить велика кількість ШІ-сервісів, які декларують про свої спроможності у цьому напрямку. І це не дивно, якщо згадати, що будь-яка мова програмування побудована за принципами формальної граматики, коли при побудові ланцюжки слів (команд у програмі) рівень передбачення наступного слова (команди) є набагато більшим, чим у природній людський мові. Дійсно, у кожній мові програмування існують стали синтаксичні ланцюжки як всередині складних команд, так й між ними. Інша справа у тому, що на відміну від висловлювань на людський мові, де не завжди присутня конкретика, мова програмування призначена для вирішення у межах програми певної задачі. Тобто, якщо програма цю задачу не вирішує та не надає вірну відповідь, то вона ні до чого.

Знову ж таки для визначення кола безкоштовних сервісів, які генерують тексти комп'ютерних

Таблиця 1

Сервіси ШІ, які генерують тексти комп'ютерних програм

	Python	**JavaScript**	**C++**	**Java**	**Assembler**
Онлайн-асистенти штучного інтелекту	ChatGPT Google Gemini Phind Hugging Face CodeGen	ChatGPT Google Gemini Phind Hugging Face CodeGen	ChatGPT Google Gemini Phind Codeium	ChatGPT Google Gemini Phind Codeium	ChatGPT Google Gemini Phind DeepAI
Інструменти автогенерації коду	Codeium Replit Ghostwriter AWS CodeWhisperer	Codeium Replit Ghostwriter Tabnine	Replit Ghostwriter Tabnine AWS CodeWhisperer	Replit Ghostwriter Tabnine AWS CodeWhisperer	Replit Ghostwriter Tabnine AWS CodeWhisperer
No-Code та Low-Code платформи	Anvil Google Colab Streamlit	Bubble Glide OutSystems	Snap! Blockly	OutSystems AppSheet	–
Відкриті AI-інструменти та моделі	GPT4All StarCoder Codex	GPT4All StarCoder Codex	GPT4All StarCoder Hugging Face CodeGen	GPT4All StarCoder Hugging Face CodeGen	GPT4All StarCoder Hugging Face CodeGen
Автоматизація робочих процесів	Zapier AI Make	Zapier AI Make	Zapier AI Make	Zapier AI Make	Zapier AI Make
Онлайн-редактори з AI-допомогою	–	JSFiddle CodePen StackBlitz	–	–	–
Онлайн-компілятори з AI-допомогою	–	–	OnlineGDB JDoodle CodeChef IDE	OnlineGDB JDoodle OneCompiler	ASM80 Online Assembler IDE ASy68K (емулятор для Motorola 68000

програм вдамося до допомоги ChatGPT. Спочатку був зроблений запит відносно переліку таких сервісів, але їх виявилось чимало, тому потім запит було кореговано у бік позначення мов програмування, на яких «спеціалізуються» сервіси ШІ. За підсумками була складена таблиця зі розбивками за мовами програмування та призначенням сервісів (Табл. 1).

З переліку мов, які були у попередньому списку виберемо **Python, JavaScript, C++** та **Java**. Оскільки мене цікавить спроможність штучного інтелекту створювати програми на мовах низького рівня, то додаємо у цей перелік також **Assembler**.

При цьому ChatGPT сформулював за моїм запитом, як саме треба надавати завдання сервісу ШІ щодо написання тексту програми:

Щоб отримати найкращий результат, слід чітко вказати:

• ***Призначення програми:*** *Наприклад, «створити калькулятор витрат».*

• ***Основні функції:*** *«Користувач вводить дані, зберігає їх у базі, виводить графік».*

• ***Бажана мова програмування:*** *«Python + Flask», «JavaScript + React», тощо.*

• ***Цільова платформа:*** *«Мобільний додаток», «Веб-сайт», «Десктоп-додаток».*

Як бачимо, нічого складного, щоб отримати готовий текст програми, немає, але спробуємо поставити більш конкретну задачу, у якої буде присутній розрахунок за певною формулою. Спочатку задамо таке формулювання умов задачі:

> Напиши програму на мові Assembler x86 (32-біт, NASM), яка обчислює площу прямокутника за формулою: $S = a * b$
>
> Значення a та b вводяться користувачем, результат виводиться у консоль

На це ШІ відповів згенерованою програмою довжиною у 39 рядків та ще декількома рядками коментарів. Але програма була не дуже зручною для користування, хоча й мала вигляд робочої. Тоді завдання було пере-формульовано таким чином:

> Напиши програму на мові Assembler x86 (MASM32), яка обчислює площу прямокутника за формулою: $S = a * b$ Значення a та b задаються користувачем, результат виводиться у вікно за допомогою функції MessageBox.

На цей раз у відповіді ШІ був програмний код довжиною у 31 рядка та ще майже стільки же рядків з коментарями у тексті програми. Також окремо після тексту програми були надані рекомендації щодо компіляції цієї програми та її виконання у середовищі Assembler.

Загальна структура програми була також вірною:

• директиви компілятору щодо створення середовища;

• підключення зовнішніх файлів з бібліотеками та макросами;

• початкова ініціалізація змінних у секції ***.data***;

• рядки з командами у секції ***.code***;

• початкова мітка та завершуючи команда ***end <мітка>***;

• вірне застосування функції ***MessageBox***() та ***ExitProcess***() з усіма необхідними параметрами.

Але були певні ознаки, які можна віднести до тих, які можуть позначати застосування ШІ при генерації цього коду. До таких можна віднести:

• наявність надмірно великої кількості коментарів, що впадає у очі;

• підключення зовнішніх файлів без вказування відносного шляху до них, що вірно, якщо програмний файл створюється безпосередньо у теки з файлами Assembler, але вважається не дуже добрим, бо використовувати для зберігання своїх файлів теку програми не вважається коректним;

• застосування для попереднього перетворення числових значень у текст та навпаки достатньо «екзотичних» функції ***atodw*()** та ***dwtoa*()** замість більш вживаної функції ***wsprintf*()**, яка використовує один буфер замість декількох. До того ж опис функції ***StdIn*()**, ***atodw*()** та ***dwtoa*()** не міститься у вказаних спочатку файлів імпортованих макросів та бібліотек **windows.inc**, **user32.inc**, **kernel32.inc**, **user32.lib** та **kernel32.lib**, тому при компіляції виникла помилка, пов'язана з неможливістю компілятора розпізнати вказані функції. Тому треба було ДОДАТКОВО підключати необхідні файли **masm32.inc** та **masm32.lib**, після чого програма коректно СКОМПІЛЮВАЛАСЯ та ВИКОНАЛАСЯ;

• для введення значень використовувалася функція ***StdIn*()**.

Можна констатувати, що в цілому програма була складена достатньо грамотно та могла бути використана при потребі, як свій «здобуток», звичайно з умовою виправлення усіх наведених помилок.

Але ця програма призначена для консольного вводу, тому при зчитуванні з консолі треба ще отримати дескриптор стандартного вводу. Щоб уникнути цього спробуємо вказати у запиті

Таблиця 2

Вірогідність застосування ШІ у розробці текстів комп'ютерних програм

	Програма-1	Програма-2	Програма-3	Програма-4	Програма-5
zerogpt (https://www.zerogpt.com/)	0 %	0 %	0 %	0 %	37,89 %
GPTZero (https://gptzero.me/)	87 %	4 %	4 %	91 %	4 %

до **ChatGPT**, що значення змінних **a** та **b** повинні задаватися безпосередньо у програмі, як константи:

> Напиши програму на мові Assembler x86 (MASM32), яка обчислює площу прямокутника за формулою: S = a * b Значення a та b задаються у програм, як константи, результат виводиться у вікно за допомогою функції MessageBox

На цей раз у якості відповіді отримаємо нову версію програми, де, дійсно, значення змінних ***a*** та ***b*** вже не потрібно вводити з клавіатури, оскільки вони задаються безпосередньо у програмі.

Ця версія програми містить ті ж недоліки з не зовсім коректним підключенням бібліотек, імпортованих зі зовнішніх файлів та відсутністю певних бібліотек, що й приклад вище, але вже відсутня необхідність виклику консольного вікна, що добре.

Як бачимо, навіть без застосування програмних детекторів, програми, які згенеровані ШІ, мають деякі ознаки стилю, як у наборі використаних функції, так й в оформленні самої програми, тобто ознаки, які відносяться до семантики та синтаксису тексту програми, який згенерував ШІ.

На завершенні досліджень для детектування використання ШІ у текстах комп'ютерних програм були застосовані ті ж сервіси, що були успішно застосовані для аналізу фрагменту звичайного тексту у попередньому дослідженні, а саме: **zerogpt** (https://www.zerogpt.com/), **GPTZero** (https://gptzero.me/) та **HIX.AI** (https://bypass.hix.ai/ru/originality-ai).

Для тестування був сформований пакет з 5 текстів комп'ютерних програм, серед яких були як програми, які були написані людиною (програми за номерами 2, 3 та 5), так й тексти, які були згенеровані за допомогою штучного інтелекту у вигляді чат-боту ChatGPT (https://chatgpt.com).

На жаль, для одного зі сервісів, а саме **HIX.AI** попередньо була доступна перевірка невеликих (до 125 слів) фрагментів, але, мабуть ліміт вже виявився вичерпаним, тому доступна тільки його використання на **платній** основі.

Результати перевірки за допомогою решти сервісів зведені у таблицю.

За підсумками перевірки ефективності детектування текстів коп'ютерних програм можна констатувати, що сервіс **GPTZero** впорався з детектуванням на «відмінно», бо виявив високу вірогідність застосування ШІ при розробці текстів комп'ютерних програм саме там, де він був присутній, а решта контрольних прикладів була детектована, як така, що найбільш ймовірно створена людиною, що також **абсолютно вірно**. Сервіс **zerogpt**, на жаль продемонстрував недостатню ефективність у детектуванні, тому його подальше використання у мене викликало багато питань.

Висновки. За підсумками проведених досліджень з використання ШІ для генерації звичайних текстів та текстів комп'ютерних програм з їх наступним детектуванням можна констатувати наступне:

Штучний інтелект, а саме **ChatGPT**, цілком спроможні генерувати правдоподібні звичайні тексти та тексти комп'ютерних програм на різних мовах програмування, зокрема на мові **Assembler**, яка найменш схожа з людською мовою.

На підставі аналізу згенерованих текстів програм на мові Assembler виявлені певні семантичні та синтаксичні ознаки використання для їх створення штучного інтелекту.

Використання низки сервісів для детектування застосування ШІ для генерації як звичайних текстів, так й текстів комп'ютерних програм показало, що не усі вони надають достовірні результати, але деяким можна довіряти більше.

Список літератури:

1. Turing A. M. Computing Machinery and Intelligence. *Mind. Oxford University Press*, 1950. Vol. 59, No. 236. P. 433–460. DOI: https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433

Pavlov V. G. SEMANTIC AND LEXICAL FEATURES OF PROGRAM CODE DEVELOPMENT BY ARTIFICAL INTELLIGENCE

The article discusses the problems that have arisen recently in connection with the massive use of artificial intelligence (AI) for creating texts, including texts of computer programs. It is noted that despite the overall positive impact, which primarily made routine work more efficient and faster, the use of artificial intelligence also created certain problems in the areas of copyright preservation and promotion of academic integrity. If earlier each case of the use of creative achievements by another person was considered as plagiarism, which was deliberately committed by a dishonest author, then the use of artificial intelligence in writing made this process implicit and hidden. It is the fact that any artificial intelligence is built on the basis of a large language model (LLM) that considers the elements of human speech (tokens) as numbers and processes them according to certain mathematical formulas. For this digitization, at first, a certain set of tokens is created, which are combined in sequences. In this way, text generation occurs. But artificial intelligence involves continuous learning through the study of human texts. From them, it takes both permanent expressions and whole phrases, which it then uses when generating. In fact, texts are created that are compiled from many sources, but at the expense of the use of someone's opinions and achievements.

The article discusses services that detect the use of AI in plain texts, analyzes and compares their effectiveness using the example of a test text study, that was generated by ChatGPT. Based on the results obtained, the author determines that detection does not always provide reliable information about the absence or presence of signs of use in text creation by generative AI.

The article further describes research on the use of AI to generate computer program texts. Based on the results of the analysis of AI services, they are classified by programming languages and specialization of services. Further research takes place using the Assembler language, which is the least similar to human language. The article provides examples of the formulation of tasks for AI, according to which program texts are generated. Further, the quality and performance of these computer programs are analyzed, certain signs are noted that make it possible to determine that the text of the program was created using AI. The results of detecting the use of AI in the development of computer programs are also presented.

Key words: *artificial intelligence, academic integrity, detection of AI using, Assembler, writing style.*

УДК 004.051
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/24

Павловський О. М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Платов І. М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ КОДОГЕНЕРАЦІЇ C/C++ КОМПІЛЯТОРА ДЛЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ОБЧИСЛЕНЬ В МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ

Стаття присвячена дослідженню кодогенерації C/C++ компілятора високопродуктивних обчислень. У роботі розглядається проблема оптимізації програмного коду підвищення ефективності обчислень в умовах зростаючих вимог до обробки великих обсягів даних. Актуальність теми обумовлена тим, що, попри розвиток обчислювальної техніки, оптимізація коду залишається важливим інструментом досягнення високої продуктивності.

У статті проводиться аналіз можливостей компілятора GCC версії 4.9.2 64-bit на персональному комп'ютері з операційною системою Windows 10 та процесором AMD Ryzen 5600x. Дослідження включає аналіз асемблерних лістингів, згенерованих компілятором, для оцінки якості кодогенерації і оптимізації. Розглядаються різні підходи до оптимізації, включаючи використання параметрів компіляції, що задають різні рівні оптимізації, а також оптимізацію з використанням intrinsic-функцій.

В якості тестової програми використовується проста симуляція руху 1000 тіл під дією сили тяжіння мовою програмування C. Цей приклад дозволяє проаналізувати базовий набір команд, які генерує оптимізуючий компілятор, для оцінки оптимізації коду.

Аналіз асемблерних лістингів демонструє, що компілятор без використання оптимізації генерує код, в якому не використовуються векторні інструкції для обробки даних, а також є надмірне обчислення адрес елементів масиву. Застосування параметрів оптимізації за швидкістю (--Ofast) призводить до використання векторних інструкцій та розгортання циклів, що підвищує продуктивність. Однак, при цьому спостерігається збільшення кількості інструкцій та наявність ділянок коду, що обробляють скалярні дані, що може призвести до неефективного використання кеш-пам'яті.

Для подальшої оптимізації використовуються intrinsic-функції, що дозволяють використовувати розширені асемблерні інструкції (AVX, FMA) та примусове вирівнювання даних. Аналіз асемблерного лістингу модифікованої програми показує значне зменшення кількості інструкцій та ефективнішу роботу з даними.

Зроблено висновок про те, що незважаючи на наявність потужних алгоритмів оптимізації в сучасних компіляторах, ручна оптимізація з використанням intrinsic-функцій може бути більш ефективною. Це наголошує на важливості компетенції програміста в області низькорівневої оптимізації для досягнення максимальної ефективності.

Ключові слова: *компілятор, оптимізація, AVX, FMA, програмування, GCC, асемблер.*

Постановка проблеми. Останнє десятиліття виділяється стрімким зростанням попиту на обробку великої кількості даних. Це пов'язано з мініатюризацією потужної обчислювальної техніки та її інтеграцією в усі галузі людського життя. Поява та розповсюдження рішень на базі штучного інтелекту сприяли експоненційному росту оброблюваної інформації, що в свою чергу викликало потреби в розробках ефективних алгоритмів обробки даних [1, 2].

Наочним прикладом таких рішень можуть бути автоматизовані робототехнічні комплекси, які оснащені великою кількістю різноманітних датчиків, наприклад, датчики дотику, камери, лідари, акустичні сенсори тощо [3].

При розробці таких комплексів користуються комп'ютерним моделюванням [4, 5]. Для аналізу роботи системи в умовах, наближених до реального середовища, використовують складні фізичні моделі, в яких враховується велика кількість різ-

номанітних факторів. Відповідно, зі збільшенням складності систем зростає навантаження на обчислювальні ядра.

Переважна більшість програмного забезпечення для моделювання роботизованих та робототехнічних систем розроблена для операційних систем, які працюють на 32 або 64 розрядних процесорах Intel або AMD. Також доступні рішення для процесорів ARM, однак в даній роботі вони розглядатися не будуть. За останні роки 32 бітна архітектура була витіснена з ринку на користь 64 розрядної. Як було зазначено вище, це пов'язано із зростанням об'єму оброблюваних даних, а як відомо, за один такт роботи процесора 64 розрядна архітектура дозволяє обробити більшу їх кількість [6].

Однак навіть перехід на 64 розрядну архітектуру не вирішив проблему високопродуктивних обчислень. Постійне масштабування та ускладнення систем відбувається швидше, ніж з'являються нові високопродуктивні обчислювачі. Тому важливою та актуальною задачею була і залишається оптимізація програмного коду, оскільки, залежно від навичок програміста, вона дозволяє підвищити ефективність обчислень без заміни обчислювального ядра. Умовно можна розділити оптимізацію на два окремі напрямки: вибір алгоритмів обробки даних та низькорівневу оптимізацію [7]. В першому випадку проблема може бути вирішена розробкою або застосуванням більш ефективних та швидких алгоритмів обробки даних. В другому випадку аналізують згенерований компілятором код на наявність так званого «bottleneck» – це код, який виконується найменш ефективно (повільно), порівняно з усією іншою частиною [8]. Причому це може бути викликано як фізичними обмеженнями архітектури (наприклад, запис/зчитування з диску відбувається повільніше, ніж ті ж операції з оперативною пам'яттю), так і через особливості кодогенератора певного компілятора. Останній фактор пов'язаний зі складністю архітектури, а також з алгоритмами оптимізації, які транслюють код програми високого рівня в машинний код.

Тому важливу роль в ефективності високопродуктивних обчислень грає не лише компетенція програміста, а й інструмент, котрий надає всі можливості для розробки якісних програмних продуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З даної тематики існує декілька досліджень, які розглядають різні аспекти кодогенерації компіляторів та оптимізації програмного коду.

У статті [9] порівнювалися компілятори Microsoft Visual Studio 2017, Embarcadero C++ Builder 10.2 та Open Watcom 1.9 щодо якості кодогенерації для архітектури Intel x86 та підтримки SSE інструкцій. Згідно з результатами, Microsoft Visual Studio 2017 є найкращим вибором для Intel x86, оскільки підтримує SSE інструкції (автоматично та через асемблерні вставки) та обчислює вирази на етапі компіляції. Для багатоплатформної розробки Open Watcom є прийнятним варіантом (за умови відсутності системозалежного коду), оскільки дозволяє створювати виконувані файли для Linux і підтримує SSE через асемблерні вставки, хоча й не автоматично. Компілятор Embarcadero C++ Builder 10.2 не рекомендується для ефективної обробки даних через відсутність автоматичної підтримки SSE та неможливість використання SSE в асемблерних вставках (зокрема через відсутність вирівнювання даних).

При порівнянні компіляторів у роботі [10] автори дослідили, що різні компілятори C++ (GCC, Clang, MSVC) мають різну продуктивність залежно від архітектури процесора та оптимізацій. GCC і Clang показали найкращі результати швидкості виконання з певними прапорами оптимізації. Вибір компілятора та параметрів оптимізації значно впливає на підсумкову продуктивність програм.

У дослідженні [11] були розглянуті компілятори GCC і ICC, а також їхній вплив на продуктивність програм на C++. Аналізувалися різні рівні оптимізації: «-O1», «-O2» і «-O3». Окрім цього, робота охоплювала багатопотокові API, зокрема Pthreads, C++11, OpenMP, Cilk Plus і TBB, з метою визначення найбільш ефективних рішень для паралельного виконання. Порівняння продуктивності показало, що ICC випереджає GCC за швидкістю виконання майже у всіх тестах. Найбільша різниця спостерігалася на процесорі Intel Xeon (Medusa), де ICC демонстрував значно кращі результати. Водночас на AMD Opteron (Hydra) відмінність між GCC та ICC була менш вираженою, що свідчить про меншу ступінь оптимізації ICC під архітектуру AMD. Оптимізація «-O2» виявилася найбільш ефективною для більшості тестів, забезпечуючи оптимальний баланс між швидкістю виконання та розміром коду. Водночас «-O3» не завжди покращувала продуктивність, особливо у випадку GCC. Однак для ICC на Intel Xeon («Medusa») використання «-O3» дало помітне покращення продуктивності, тоді як на AMD («Hydra») різниця між «-O2» і «-O3» була мінімальною. Для перевірки значущості від-

мінностей використовувався t-тест, який показав, що різниця між «-O2» і «-O3» у більшості випадків є статистично незначною. При цьому, на Intel Xeon («Medusa») GCC показав найбільшу різницю у результатах при використанні «-O1», «-O2» та «-O3». Загалом, вибір API впливає на продуктивність більше, ніж рівень оптимізації, що підтверджує важливість правильного підбору багатопотокових технологій.

Аналіз літератури демонструє, що оптимізація коду – це багатогранний процес, який залежить від апаратної архітектури та структури коду. Універсальних рішень не існує – ефективність оптимізації змінюється залежно від платформи та типу обчислень. Крім того, не кожне покращення продуктивності є статистично значущим, тому важливо ретельно аналізувати результати. Оптимізація завжди передбачає пошук балансу між швидкістю, ефективністю використання ресурсів і стабільністю програми.

Постановка завдання. Для 64 бітної архітектури існує велика кількість різноманітних C/C++ компіляторів. Кожен з яких має свої переваги та недоліки. Вибір того чи іншого компілятора залежить перш за все від операційної системи, під яку розроблюється програмне забезпечення, а також від поставлених задач. Найбільш популярним компілятором є GCC, який доступний на багатьох операційних системах (Linux, macOS, Windows, *BSD, Solaris та ін.) та підтримує велику кількість архітектур (x86, x86-64, ARM, PowerPC, MIPS, RISC-V та ін.) [12].

Постає питання якості кодогенерації даного компілятора для високопродуктивних обчислень. Для цього, зазвичай досліджуються асемблерні лістинги, генеровані компілятором, на наявність нераціонального використання машинних інструкцій та наявність «bottleneck».

Отже метою даної роботи є дослідження асемблерних лістингів компілятора GCC для оцінки якості кодогенерації та оптимізації на прикладі вирішення задачі симуляції руху об’єктів.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження використовувався компілятор GCC версії 4.9.2 64-bit та операційна система Windows 10 та комп’ютер з процесором AMD Ryzen 5600x з підтримкою інструкцій MMX(+), SSE, SSE2, SSE3, SSSE3, SSE4.1, SSE4.2, SSE4A, x86-64, AES, AVX, AVX2, FMA3, SHA [13]. Для оптимізації машинного коду застосуємо стандартний підхід – параметри компіляції, які задають різні рівні оптимізації, а також оптимізацію із використанням intrinsic-функцій [14]. Ці функції дозволяють легко використовувати розширені асемблерні інструкції (SSE, SSE2, SSE3, SSSE3, SSE4, AVX, AVX2, AVX512, FMA), і на відміну від стандартних функцій, транслюються в одну або декілька машинних кодів.

Варто зауважити, що порівняно з безпосереднім використанням асемблерного коду в програмі на мовах C/C++, яке досліджувалось в роботі [9], intrinsic-функції абстрагують деякі операції, що сприяє легшій переносимості програми між різними платформами, а також пришвидшують розробку в цілому. З іншого боку таке рішення обмежує програміста від безпосереднього контролю над операціями, оскільки intrinsic-функції оброблюються компілятором в автоматичному режимі.

В якості тестової програми була реалізована проста симуляція руху 1000 тіл під дією сили тяжіння мовою програмування C. Такий приклад є досить простим для аналізу, але водночас реалізує типову задачу високопродуктивних обчислень, оскільки містить базовий набір команд, що необхідний для аналізу оптимізації коду компілятором. Код програми наведений на рис. 1.

```
#include <math.h>

#define N 1000
#define STEPS 1000
#define DT 0.01

void simulate(double *x, double *v, double *a) {
        int step, i;
    for (step = 0; step < STEPS; step++) {
        for (i = 0; i < N; i++) {
            v[i] += a[i] * DT;
            x[i] += v[i] * DT;
        }
    }
}

int main() {
    double x[N], v[N], a[N];
    int i;
    for (i = 0; i < N; i++) {
        x[i] = 0.0;
        v[i] = 1.0;
        a[i] = -9.81;
    }

    simulate(x, v, a);

    return 0;
}
```

Рис. 1. Код програми симуляції падіння 1000 тіл під дією сили тяжіння

Для початку проаналізуємо кодогенерацію компілятора без використання оптимізацій. Компіляцію програми будемо здійснювати, використовуючи командну строку з відповідними параметрами, а саме:./gcc -march=native -S -masm=intel -o «1000_obj_model_optimiz.s» «1000_obj_model_optimiz.c», де параметр -march=native задає використання усіх можливих інструкцій конкретного процесора. -S вказує компілятору генерувати асемблерний лістинг. -masm=intel асемблерний

лістниг у діалекті Intel. Для стислості, у статті будуть наведені лише ключові фрагменти лістингів. Результат компіляції показаний на рис. 2.

```
simulate:
        push    rbp
        .seh_pushreg    rbp
        mov     rbp, rsp
        .seh_setframe   rbp, 0
        sub     rsp, 16
        .seh_stackalloc 16
        .seh_endprologue
        mov     QWORD PTR 16[rbp], rcx
        mov     QWORD PTR 24[rbp], rdx
        mov     QWORD PTR 32[rbp], r8
        mov     DWORD PTR -4[rbp], 0
        jmp     .L2
.L5:
        mov     DWORD PTR -8[rbp], 0
        jmp     .L3
.L4:
        mov     eax, DWORD PTR -8[rbp]
        cdqe
        lea     rdx, 0[0+rax*8]
        mov     rax, QWORD PTR 24[rbp]
        add     rax, rdx
        mov     edx, DWORD PTR -8[rbp]
        movsx   rdx, edx
        lea     rcx, 0[0+rdx*8]
        mov     rdx, QWORD PTR 24[rbp]
        add     rdx, rcx
        vmovsd  xmm1, QWORD PTR [rdx]
        mov     edx, DWORD PTR -8[rbp]
        movsx   rdx, edx
        lea     rcx, 0[0+rdx*8]
        mov     rdx, QWORD PTR 32[rbp]
        add     rdx, rcx
        vmovsd  xmm2, QWORD PTR [rdx]
        vmovsd  xmm0, QWORD PTR .LC0[rip]
        vmulsd  xmm0, xmm2, xmm0
        vaddsd  xmm0, xmm1, xmm0
        vmovsd  QWORD PTR [rax], xmm0
        mov     eax, DWORD PTR -8[rbp]
        cdqe
        lea     rdx, 0[0+rax*8]
        mov     rax, QWORD PTR 16[rbp]
        add     rax, rdx
        mov     edx, DWORD PTR -8[rbp]
        movsx   rdx, edx
        lea     rcx, 0[0+rdx*8]
        mov     rdx, QWORD PTR 16[rbp]
        add     rdx, rcx
        vmovsd  xmm1, QWORD PTR [rdx]
        mov     edx, DWORD PTR -8[rbp]
        movsx   rdx, edx
        lea     rcx, 0[0+rdx*8]
        mov     rdx, QWORD PTR 24[rbp]
        add     rdx, rcx
        vmovsd  xmm2, QWORD PTR [rdx]
        vmovsd  xmm0, QWORD PTR .LC0[rip]
        vmulsd  xmm0, xmm2, xmm0
        vaddsd  xmm0, xmm1, xmm0
        vmovsd  QWORD PTR [rax], xmm0
        inc     DWORD PTR -8[rbp]
.L3:
        cmp     DWORD PTR -8[rbp], 999
        jle     .L4
        inc     DWORD PTR -4[rbp]
.L2:
        cmp     DWORD PTR -4[rbp], 999
        jle     .L5
        add     rsp, 16
        pop     rbp
        ret
        .seh_endproc
```

Рис. 2. Результат компіляції програми без оптимізацій

Аналіз асемблерного лістингу демонструє декілька ключових моментів, на які варто звернути увагу. Перш за все – використання інструкцій «vmovsd», «vmulsd» та «vaddsd». В даному випадку при кожній ітерації циклу оброблюється лише одне значення типу double. Хоча в сучасних процесорах наявні спеціальні інструкції для операцій з векторними інструкціями, так звані SIMD операції, які дозволяють оброблювати одразу декілька значень за одну ітерацію.

Використання інструкції «cdqe» свідчить про приведення типів даних, що збільшує кількість перетворень, тобто збільшує час виконання програми.

Всередині головного циклу для кожної ітерації обрахунок адреси елементу масива виконується декілька разів: зчитування значення індексу зі змінної (інструкція «mov eax, DWORD PTR -8[rbp]»), яка потім приводиться до 64 біт за допомогою інструкції «cdqe». За допомогою інструкції «lea rdx, 0[0+rax*8]» обраховується зміщення, що дорівнює індексу, помноженому на 8 (розмір типу double). Зміщення додається до базової адреси масива («mov rax, QWORD PTR 24[rbp]» та «add rax, rdx»).

Тобто для кожного елементу в циклі адреса обраховується заново, що створює додаткове навантаження, не пов'язане з основними обрахунками. Суттєвий вплив на продуктивність вносить відсутність розгортання циклів. Зовнішній цикл та внутрішній сумарно створюють 10^6 ітерацій.

Тепер дослідимо кодогенерацію із використанням параметрів оптимізації по швидкості. Для цього в GCC є параметр «–Ofast». Повна команда компіляції виглядає наступним чином: cc -march=native -Ofast -S -masm=intel -o « 1000_obj_model_optimiz.s» « 1000_obj_model_optimiz.c». Асемблерний лістинг наведений на рис. 3.

У даному випадку компілятор згенерував код із використанням додаткових інструкцій «vmovups», «vfmadd213pd» та «vfmadd213sd» які призначені для операцій з дробовими числами. Такі інструкції оброблюють одразу декілька елементів за одну ітерацію, що значно скорочує кількість арифметичних операцій.

Застосування інструкцій «prefetcht0» та «prefetchw» зменшує затримки при роботі з пам'яттю, завантажуючи дані в кеш.

Також помітно, що компілятор застосував розгортання циклів, тим самим зменшивши кількість переходів та перевірок умов. Це значно підвищує продуктивність виконання коду на сучасних процесорах.

Але, незважаючи на це, в асемблерному коді спостерігаються недоліки такої оптимізації, а саме: кількість інструкцій значно збільши-

```
simulate:
        push    rbp
        .seh_pushreg    rbp
        mov     rbp, rsp
        .seh_setframe   rbp, 0
        sub     rsp, 16
        mov     DWORD PTR 24[rsp], eax
        lea     eax, [rbx+rbx]
        mov     DWORD PTR 28[rsp], eax
        mov     eax, r15d
        sal     rax, 3
        lea     rsi, [rdi+rax]
        mov     QWORD PTR 32[rsp], rsi
        lea     rsi, [r14+rax]
        add     rax, rbp
        mov     QWORD PTR 40[rsp], rsi
        mov     QWORD PTR 16[rsp], rax
        .p2align 4,,10
.L2:
        cmp     BYTE PTR 15[rsp], 0
        je      .L28
        test    r15d, r15d
        je      .L15
        vmovsd  xmm0, QWORD PTR [r14]
        mov     esi, 1
        vfmadd213sd     xmm0, xmm3, QWORD PTR [rdi]
        vmovsd  QWORD PTR [rdi], xmm0
        vfmadd213sd     xmm0, xmm3, QWORD PTR 0[rbp]
        vmovsd  QWORD PTR 0[rbp], xmm0
.L8:
        mov     r10, QWORD PTR 16[rsp]
        mov     rcx, QWORD PTR 32[rsp]
        xor     edx, edx
        mov     r8, QWORD PTR 40[rsp]
        mov     r11, r10
        mov     r9, rcx
        .p2align 4,,10
.L9:
        vmovups xmm0, XMMWORD PTR [r8]
        prefetcht0      192[rcx]
        prefetcht0      192[r8]
        prefetcht0      192[r10]
        prefetchw       192[r9]
        prefetchw       192[r11]
        add     edx, 4
        add     rcx, 64
        add     r8, 64
        add     r9, 64
        add     r10, 64
        add     r11, 64
        vfmadd213pd     xmm0, xmm2, XMMWORD PTR -64[rcx]
        vmovaps XMMWORD PTR -64[r9], xmm0
        vfmadd213pd     xmm0, xmm2, XMMWORD PTR -64[r10]
        vmovups XMMWORD PTR -64[r11], xmm0
        vmovups xmm0, XMMWORD PTR -48[r8]
        vfmadd213pd     xmm0, xmm2, XMMWORD PTR -48[rcx]
        vmovaps XMMWORD PTR -48[r9], xmm0
        vfmadd213pd     xmm0, xmm2, XMMWORD PTR -48[r10]
        vmovups XMMWORD PTR -48[r11], xmm0
        vmovups xmm0, XMMWORD PTR -32[r8]
        vfmadd213pd     xmm0, xmm2, XMMWORD PTR -32[rcx]
        vmovaps XMMWORD PTR -32[r9], xmm0
        vfmadd213pd     xmm0, xmm2, XMMWORD PTR -32[r10]
        vmovups XMMWORD PTR -32[r11], xmm0
        vmovups xmm0, XMMWORD PTR -16[r8]
        vfmadd213pd     xmm0, xmm2, XMMWORD PTR -16[rcx]
        vmovaps XMMWORD PTR -16[r9], xmm0
        vfmadd213pd     xmm0, xmm2, XMMWORD PTR -16[r10]
        vmovups XMMWORD PTR -16[r11], xmm0
        cmp     edx, 496
        jne     .L9
```

Рис. 3. Асемблерний лістинг, згенерований із використанням оптимізації по швидкості (наведена лише ключова частина функції «simulate»)

лася – це може привести до неефективного використання кеш пам'яті; у лістингу спостерігаються окремі ділянки коду, що обробляють скалярні дані, наприклад, у мітці «.L9» дані оброблюються пакетами, однак, коли залишається невелика кількість елементів, обробка здійснюється скалярно. Інструкція «vmovsd» завантажує один елемент double у xmm-регістр, а «vfmadd213sd» виконує операцію множення та додавання для цього елементу. Така обробка даних може спричиняти додаткові затримки.

Тому далі ми дослідимо роботу компілятора, реалізувавши обчислення за допомогою intrinsic-функцій. Модифікована програма мовою C наведена на рис. 4.

Порівняно з попереднім варіантом, можна помітити зміни як у головній функції main, так і в функції simulate. Для початку розглянемо головну функцію: задавши параметр «__attribute__((aligned(32)))» ми вказуємо компілятору примусово вирівняти дані. Робота з вирівняними даними завжди відбувається швидше, оскільки компілятор генерує код, в якому відсутні додаткові операції читання/запису в пам'ять. Окрім цього вирівнювання сприяє ефективній роботі з кеш пам'яттю – дані потрапляють в кеш блоками і відбувається менше «промахів», коли дані можуть розділятися на декілька блоків, замість одного. Також варто зазначити, що деякі розширені інструкції (наприклад, AVX) потребують обов'язкового вирівнювання даних – це буде розглянуто далі. Стосовно функції simulate, в даному випадку обчислення відбуваються із використанням AVX та FMA інструкцій, а також вони розділені на групи. Цифрою 1 позначені інструкції, котрі обробляють першу групу з чотирьох елементів, 2 – обробка другої групи.

Останні два блока 3 та 4 оновлюють координати для першої та другої групи, відповідно. Також акцентуємо вашу увагу на список параметрів функції simulate, для оптимізації роботи з пам'яттю була використана команда «restrict» (введена в стандарті мови C99), яка сповіщає компілятор про те, що вказівник, що оголошується, адресує область пам'яті, на яку не посилається ніякий інший вказівник. Якщо виразити це простими словами, то компілятор може перевпорядковувати операції читання та запису, використовувати векторні інструкції або виконувати інші перетворення, що базуються на припущенні, що дані не змінюються іншими вказівниками.

Функції «_mm256_load_pd» та «_mm256_store_pd» мінімізують кількість звернень до пам'яті, т. я. працюють з вирівняними даними. Функція «_mm256_fmadd_pd» поєднує множення та додавання в одну операцію, що знижує затримки та підвищує «обчислювальну щільність».

Тепер проаналізуємо асемблерний лістинг, скомпілювавши вищенаведену модифіковану програму наступним чином: gcc -march=native -std=c99 -mavx2 -mfma -S -masm=intel -o «1000_obj_model_optimiz1.s» «1000_obj_model_optimiz1.c». Можна помітити появу нових параметрів компіляції, а саме: «-std=c99» – вказує компілятору, що використовується стандарт мови C99. Це необхідно для використання ключового слова

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <immintrin.h>

#define N 1000
#define STEPS 1000
#define DT 0.01

void simulate(double *restrict x, double *restrict v, const double *restrict a) {
    int step, i;
        __m256d dt_vec = _mm256_set1_pd(DT);
    for (step = 0; step < STEPS; step++) {
        for (i = 0; i < N; i += 8) {
            __m256d v0 = _mm256_load_pd(&v[i]);
            __m256d a0 = _mm256_load_pd(&a[i]);
  1         v0 = _mm256_fmadd_pd(a0, dt_vec, v0); // v0 += a0 * dt_vec
            _mm256_store_pd(&v[i], v0);

            __m256d v1 = _mm256_load_pd(&v[i+4]);
            __m256d a1 = _mm256_load_pd(&a[i+4]);
  2         v1 = _mm256_fmadd_pd(a1, dt_vec, v1); // v1 += a1 * dt_vec
            _mm256_store_pd(&v[i+4], v1);

            __m256d x0 = _mm256_load_pd(&x[i]);
  3         x0 = _mm256_fmadd_pd(v0, dt_vec, x0); // x0 += v0 * dt_vec
            _mm256_store_pd(&x[i], x0);

            __m256d x1 = _mm256_load_pd(&x[i+4]);
  4         x1 = _mm256_fmadd_pd(v1, dt_vec, x1); // x1 += v1 * dt_vec
            _mm256_store_pd(&x[i+4], x1);
        }
    }
}

int main() {
    double x[N] __attribute__((aligned(32)));
    double v[N] __attribute__((aligned(32)));
    double a[N] __attribute__((aligned(32)));
    int i;

    for (i = 0; i < N; i++) {
        x[i] = 0.0;
        v[i] = 1.0;
        a[i] = -9.81;
    }

    simulate(x, v, a);

    return 0;
}
```

Рис. 4. Модифікована програма мовою C із використанням intrinsic-функцій

«restrict». «-mavx2» та «-mfma» вказують компілятору, що в програмі використовуються розширені інструкції (AVX2 та FMA).

Асемблерний лістинг наведено на рис. 5.

```
simulate:
        push    rbx
        .seh_pushreg    rbx
        .seh_endprologue
        vmovaps ymm2, YMMWORD PTR .LC0[rip]
        mov     r9d, 1000
        lea     r11, 416[r8]
        lea     rbx, 416[rdx]
        lea     r10, 416[rcx]
        lea     r8, 8416[rdx]
        .p2align 4,,10
.L2:
        mov     rax, rbx
        mov     rcx, r11
        mov     rdx, r10
        .p2align 4,,10
.L3:
        vmovaps ymm1, YMMWORD PTR -416[rcx]
        vmovaps ymm0, YMMWORD PTR -384[rcx]
        prefetcht0      [rcx]
        prefetcht0      [rax]
        add     rax, 64
        prefetcht0      [rdx]
        add     rcx, 64
        add     rdx, 64
        vfmadd213pd     ymm1, ymm2, YMMWORD PTR -480[rax]
        vfmadd213pd     ymm0, ymm2, YMMWORD PTR -448[rax]
        vmovaps YMMWORD PTR -480[rax], ymm1
        vfmadd213pd     ymm1, ymm2, YMMWORD PTR -480[rdx]
        vmovaps YMMWORD PTR -448[rax], ymm0
        vfmadd213pd     ymm0, ymm2, YMMWORD PTR -448[rdx]
        vmovaps YMMWORD PTR -480[rdx], ymm1
        vmovaps YMMWORD PTR -448[rdx], ymm0
        cmp     rax, r8
        jne     .L3
        dec     r9d
        jne     .L2
        vzeroupper
        pop     rbx
        ret
        .seh_endproc
```

Рис. 5. Асемблерний лістинг модифікованої програми із використанням intrinsic-функцій

Порівнюючи отриманий результат з попередніми лістингами, можна помітити, що кількість інструкцій значно зменшилася. Це говорить про вищезазначену «обчислювальну щільність». В даному випадку робота з даними відбувається більш ефективно, за рахунок завантажень векторів «ymm^0» та «ymm^1», які оновлюються за допомогою команди «vfmadd213pd» (що є прямим наслідком використання «_mm256_fmadd_pd» в C коді). Наявність команди «prefetcht0» свідчить про завантаження даних в кеш, перед їх обробкою – це значно підвищує швидкодію при зверненні до пам'яті. Команди «cmp» + «jne.L3» свідчать про розгортання циклу, тобто зменшена кількість інструкцій для перевірки виходу за межі циклу.

Таким чином, незважаючи на використання тих самих інструкцій AVX/FMA, оптимізована версія забезпечує більш високу продуктивність за рахунок додаткових оптимізацій. Це говорить про те, що хоча сучасні компілятори мають досить потужні оптимізуючі алгоритми, вони не враховують усіх можливих випадків роботи з даними. В деяких випадках, як і у нашому прикладі, ручна оптимізація виявилася більш ефективною, порівняно з результатом оптимізуючого компілятора.

Висновки. Оптимізація програмного коду є важливим завданням для досягнення високої продуктивності в умовах зростаючих вимог до обробки даних. Потреба в ефективних алгоритмах та оптимізованому коді стає критично важливою. Оптимізація дозволяє не лише прискорити виконання програм, а й знизити споживання ресурсів, таких як процесорний час та пам'ять, що особливо важливо для ресурсообмежених систем.

Компілятор GCC надає різні можливості для оптимізації коду, включаючи параметри компіляції та intrinsic-функції. GCC як один з найбільш популярних і широко використовуваних компіляторів пропонує широкий спектр інструментів і технік для оптимізації. Параметри компіляції дозволяють швидко і легко застосовувати різні рівні оптимізації, в той час як intrinsic-функції надають програмісту більш тонкий контроль над машинним кодом, що генерується, дозволяючи використовувати специфічні інструкції процесора.

Аналіз асемблерних лістингів дозволяє оцінити якість кодогенерації та виявити потенційні «вузькі місця» у коді. Асемблерні лістинги, що генеруються компілятором, є низькорівневим уявленням програми, яке дозволяє програмісту побачити, як саме його код буде виконуватися процесором. Аналіз цих лістингів дозволяє виявити неефективні конструкції, надлишкові операції та інші проблеми, які можуть знижувати продуктивність програми.

Використання векторних інструкцій, розгортання циклів та вирівнювання даних є ефективними методами оптимізації. Векторні інструкції дозволяють процесору виконувати ту саму операцію над кількома елементами даних одночасно, що значно прискорює обробку масивів та інших структур даних. Розгортання циклів зменшує накладні витрати управління циклом, виконуючи кілька ітерацій циклу за один прохід. Вирівнювання даних забезпечує більш ефективний доступ до пам'яті, оскільки процесор може завантажувати та зберігати дані блоками, що відповідають розміру його кеш-лінії.

Ручна оптимізація з використанням intrinsic-функцій може забезпечити більшу продуктивність, ніж автоматична оптимізація компілятором. Незважаючи на те, що сучасні компілятори мають потужні алгоритми оптимізації, вони не завжди можуть врахувати всі особливості конкретного завдання або архітектури процесора. Ручна оптимізація, що виконується досвідченим програмістом із використанням intrinsic-функцій, дозволяє досягти максимальної продуктивності, використовуючи специфічні інструкції процесора та застосовуючи техніки оптимізації, які не завжди доступні компілятору.

Список літератури:

1. AI market to grow 39.4 % annually over forecast period. *Zion Market Research*. URL: https://www.zionmarketresearch.com/news/global-artificial-intelligence-market (дата звернення: 19.03.2025).

2. Bubeck S. et al. Sparks of artificial general intelligence: Early experiments with gpt-4 / *ArxivX*. URL: https://arxiv.org/abs/2303.12712 (дата звернення: 20.03.2025).

3. Artificial intelligence and robotics in the manufacturing industry / *Open Innovation Hub for Companies, Startups, and Experts*. URL: https://www.ennomotive.com/artificial-intelligence-robotics/ (дата звернення: 19.03.2025).

4. Robot simulator CoppeliaSim: create, compose, simulate, any robot. *Coppelia Robotics*. URL: https://www.coppeliarobotics.com/ (дата звернення: 19.03.2025).

5. Robotics simulation with Webots. *Cyberbotics*. URL: https://cyberbotics.com/ (дата звернення: 19.03.2025).

6. AMD64 Architecture Programmer's Manual Volume 3: General-Purpose and System Instructions. URL: https://www.amd.com/content/dam/amd/en/documents/processor-tech-docs/programmer-references/24594.pdf (дата звернення: 19.03.2025).

7. Antoniou A., Lu W.-S. Practical optimization. *Springer* US, New York, NY 2021. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0843-2 (дата звернення: 20.03.2025).

8. What Is Bottlenecking My PC?. URL: https://www.intel.com/content /www/us/en/gaming/resources/what-is-bottlenecking-my-pc.html (дата звернення: 20.03.2025).

9. Платов І. М., Павловський О. М. Порівняння можливостей C/C++ компіляторів для вирішення інженерних. *Вісник інженерної академії України*. 2018. № 4. С. 65–69.

10. Bukie P. T., Udeze C. L., Obono L. O., Edim E. B. Comparative Analysis of Compiler Performances and Program Efficiency. 2019. *Pre prints.org* URL: https://www.preprints.org/manuscript/201909.0322/v1 (дата звернення: 20.03.2025).

11. Machado, R. S., Almeida, R. B., Jardim, A. D. at al. Comparing Performance of C Compilers Optimizations on Different Multicore Architectures. *International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing Workshops (SBAC-PADW)*. Campinas, Brazil, 2017. pp. 25-30 doi:10.1109/sbac-padw.2017.13

12. GCC, the GNU compiler collection. GNU project. URL: https://gcc.gnu.org/ (дата звернення: 19.03.2025).
13. Processor Specifications. URL:https://www.amd.com/en/products /specifications/processors. (дата звернення: 25.03.2025).
14. Intel® C++ Compiler Classic Developer Guide and Reference. URL: https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/cpp-compiler/developer-guide-reference/2021-8/intrinsics.html (дата звернення: 20.03.2025).

Pavlovskiy O. M., Platov I. M. RESEARCH ON CODE GENERATION OF C/C++ COMPILER FOR HIGH-PERFORMANCE COMPUTING IN MICROPROCESSOR SYSTEMS

The article is devoted to the study of code generation of a C/C++ compiler for high-performance computing. The paper considers the problem of optimizing program code to increase computing efficiency in conditions of growing requirements for processing large amounts of data. The relevance of the topic is due to the fact that, despite the development of computing technology, code optimization remains an important tool for achieving high performance.

The article analyzes the capabilities of the GCC compiler version 4.9.2 64-bit on a personal computer with the Windows 10 operating system and an AMD Ryzen 5600x processor. The study includes an analysis of the assembler listings generated by the compiler to assess the quality of code generation and optimization. Various approaches to optimization are considered, including the use of compilation parameters that specify different levels of optimization, as well as optimization using intrinsic functions.

A simple simulation of the motion of 1000 objects under the influence of gravity in the C programming language is used as a test program. This example allows us to analyze the basic set of instructions generated by the optimizing compiler to evaluate the optimization of the code.

Analysis of the assembly listings demonstrates that the compiler without using optimization generates code that does not use vector instructions for data processing, and there is also excessive calculation of array element addresses. The use of speed optimization parameters (--Ofast) leads to the use of vector instructions and loop unrolling, which increases performance. However, this increases the number of instructions and the presence of code sections that process scalar data, which can lead to inefficient use of cache memory.

For further optimization, intrinsic functions are used that allow the use of extended assembly instructions (AVX, FMA) and forced data alignment. Analysis of the assembly listing of the modified program shows a significant reduction in the number of instructions and more efficient data handling.

Finally, the article concludes that, despite the availability of powerful optimization algorithms in modern compilers, manual optimization using intrinsic functions can be more effective in some cases. This emphasizes the importance of the programmer's competence in low-level optimization to achieve maximum performance in high-performance computing.

Key words: *compiler, optimization, AVX, FMA, programming, GCC, assembler.*

УДК 550.832:681.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/25

Петришин Р. І.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Шекета В. І.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Павлів А. І.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Касянчук І. П.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБРОБКИ КАРОТАЖНИХ ДАНИХ ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СВЕРДЛОВИН

У статті розглянуто проблему моделювання процесу автоматизації обробки каротажних даних геофізичних досліджень свердловин на основі предметного аналізу інформаційних процесів, пов'язаних з обробкою геофізичних даних, зокрема паперових каротажів, у контексті діяльності ПАТ «УКРНАФТА». Запропоноване аналітичне дослідження спрямоване на ідентифікацію та усунення проблем, що виникають у процесі обробки цих даних, з метою підвищення ефективності та точності аналізу геологічних утворень, а також забезпечення більш точного та оперативного прийняття стратегічних рішень у сфері видобування нафти та газу. Окрім того, запропоноване дослідження ставить перед собою завдання запропонувати можливі рішення на основі методів та засобів автоматизації з метою опрацювання інформації в існуючій системі підтримки прийняття рішень.

Можливість реалізації зазначеної мети дослідження відбувається через інтерпретацію та імплементацію засобів та моделі автоматизації процесу оцифрування інформації з ГДС ПАТ «УКРНАФТА» шляхом обробки даних каротажів, що є перевагою порівняно зі звичайними відомим методами обробки зображень в контексті розвитку новітніх засобів та методів опрацювання каротажних даних геофізичних досліджень свердловин.

В руслі дослідження проблеми здійснено аналіз процесів отримання та первинної обробка даних ГДС, деякі особливості оцифрування комплексів каротажних діаграм з наведеними прикладами, виокремлено засоби автоматизації процесу оцифрування каротажних діаграм та запропоновано процесну модель вилучення інформації із каротажу свердловини.

Для реалізації запропонованої задачі проаналізовано та виокремлено переваги й недоліки використання різних засобів та методів опрацювання геофізичних та каротажних даних, представлено процесну модель вилучення інформації із каротажу свердловини в контексті автоматизації зазначених процесів, що дозволить забезпечити швидку та точну обробку даних, зменшуючи час та ризик помилок. Подальше вдосконалення та впровадження цього рішення допоможе ПАТ «УКРНАФТА» підвищити продуктивність та ефективність своєї діяльності, сприяючи зростанню доходів підприємства. Тому на основі запропонованого дослідження аналізоване рішення дозволить ПАТ «УКРНАФТА» автоматизувати та оптимізувати процес обробки даних каротажів з використанням засобів автоматизації.

Ключові слова: *модель, метод, процес, автоматизація, оптимізація, каротажні дані, геофізичні дані, оцифрування, зображення, фреймворк.*

Постановка проблеми. У сучасному світі, де нафтогазова промисловість переживає постійне зростання вимог до ефективності та точності в процесах пов'язаних з обробкою даних, питання автоматизації процесів в системах підтримки прийняття рішень стає одним з ключових у досягненні високих показників ефективності в процесі видобутку нафти. Прийняття рішень та вибір технологій направлених на більш ефективне освоєння і розробку родовищ нафти чи газу можливе завдяки інформаційному забезпеченню щодо стану, умови залягання та параметри гірських порід.

Дані каротажу є важливою частиною технологій буріння, закінчування, випробування, капі-

тального ремонту свердловин, геологічного картування, моніторингу резервуарів і т. п., особливо в питаннях пов'язаних з прийняттям рішень. Адже від повноти та точності інформації отриманої у процесі каротажу залежатимуть обрана стратегія і методи освоєння вуглеводневих ресурсів. Дані каротажу в базах даних розвідки і видобування можуть допомогти правильно спланувати майбутні операції по каротажу свердловин та забезпечити ефективний моніторинг існуючих резервуарів чи програми повторної розробки.

Відомо, що витрати на каротаж, які можуть становити 4–7 % від вартості завершеної свердловини для отримання даних про формації, флюїди і стан свердловини можуть бути значними і оцифрування аналогових джерел для подальшого опрацювання (інтерпретації, візуалізації результатів і ін.) є важливим з точки зору економії фінансів. Проте суттєвою причиною оцифрування аналогових даних, що записані в журналах чи відскановані і зберігаються в форматі растрових зображень на різних носіях – це цінність інформації. Очевидно, що цінність інформації отриманої в тому чи іншому вигляді, в той чи інший момент часу буде залежати від мети і способу використання. Так не залежно від мети, причин та обставин збору каротажних даних, існує вірогідність, що їх жодним чином не використовують, чи використовують не повною мірою. Зазвичай так відбувається тоді, коли є підстави вважати їх ненадійними, чи вони підтверджують уже відомі здогадки чи висновки. Навіть помилкові дані не повинні відкидатися просто так, адже їх аналіз може дати цінний результат – виявити системні проблеми із справністю/несправністю каротажного обладнання. Таким чином цінність даних не завжди може бути оцінена у повній мірі в момент збору.

Як результат сьогодні великі об'єми таких цінних каротажних даних в Україні і світі акумульована в архівах в аналоговому вигляді. Нажаль досить часто оцифрування комплексу каротажних діаграм проводиться в ручному, чи напівавтоматичному режимі. Комплекс каротажних діаграм свердловин відскановується, а прив'язка кожної каротажної діаграми по глибині відбувається вручну з використанням типових програмних продуктів для створення векторної графіки, таких як «Corel DRAW». Напівручні (такі, що потребують значної участі оператора) перетворювачі дозволяють з достатньою точністю оцифровувати криві як криві, які не перетинаються, так і криві, що перетинаються, у тому числі осцилограми та криві записані в різних масштабах.

Зважаючи на велику кількість історичних даних, що не були оцифровані, таке ручне чи напівручне оцифрування займе невиправдано багато часу і людських ресурсів, адже швидкість руху візира у залежності від складності геофізичних кривих у такому випадку не перевищує 2 до 14 м/год. Тому в умовах цифрового сьогодення особливо актуальним є впровадження автоматизованих рішень для оцифрування, обробки, передачі та накопичення даних свердловинного каротажу. Тому великі обсяги даних призводить до складнощів у їхній обробці та інтерпретації. Аналіз бізнес-логіки обробки геофізичних даних ГДС ПАТ «УКРНАФТА» відкриває широкий спектр проблем, що ускладнюють ефективність цього процесу та утруднюють прийняття стратегічних рішень. Перші автоматичні рішення перетворювачів аналогових даних в цифровий формат мали ряд недоліків і обмежень, наприклад лінія діаграми повинна була бути простою і не переривчастою з рівномірною товщиною тощо.

Все частіше в нафтогазовій галузі доводиться працювати з великими масивами даних типу «Big Data», особливістю яких є велика кількість класів різнорозмірних даних, що часто є взаємозалежними та випадковими. Тому задача ефективного зберігання і вилучення інформації з цих масивів для певних конкретних цілей є актуальним питанням. Як результат для обробки постійно зростаючих об'ємів інформації нафтогазові компанії використовують відповідні інструменти управління даними, такі як «LogDB» тощо. Саме тому аналіз бізнес-логіки та рівня автоматизації процесу обробки даних ГДС ПАТ «УКРНАФТА» з імплементацією засобів автоматизації процесу оцифрування каротажних діаграм для автоматизації процесу оцифрування даних ГДС ПАТ «УКРНАФТА» є досить актуальним та необхідним в умовах розвитку новітніх засобів та методів опрацювання каротажних даних геофізичних досліджень свердловин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізом питань дослідження в руслі отримання та первинної обробки ГДС, що є передумовою та базовим контентом для бізнес-логіки в контексті автоматизації процесу обробки каротажних даних геофізичних досліджень свердловин, займались такі дослідники, як Junqiang Zhang (Джунцян Чжан), Yi Zhang (І Чжан), Gang Liu (Ганг Лю), Lirui Xu (Ліруй Сюй) та Yong Hu (Юн Ху), які у своєму дослідженні «Швидкий метод вилучення інформації з каротажних зображень свердловин» [5] стверджують, що каротаж свердловин дуже важ-

ливий для геологічного аналізу та застосування. Вилучення структурованої інформації з каротажу свердловин у форматі зображення є ключем до будь-якого аналізу та застосування на основі даних свердловин. Зазначений авторами існуючий метод має недоліки у вирішенні проблеми бороди на каротажі свердловини та ідентифікації спеціальних геологічних символів. Тому у своїй статті автори запропонували метод автоматичного вилучення інформації з каротажу свердловин шляхом поєднання структурного аналізу на основі кутової мітки, а також структурного розуміння на основі глибокого навчання, де детально описано принципи та ключові технології методу. Результати показують, що метод може не тільки ефективно вирішити проблему невідповідності між товщиною та інформацією опису в каротажі свердловини, але також може вирішити проблему низької ефективності розпізнавання професійної лексики, що може підвищити ефективність вилучення та точність інформації каротажу свердловини.

Інші науковці Purohit Pankaj (Пурохіт Панкадж), Nuaimi Fatema Al (Нуаймі Фатема Аль), Kumar Pranav (Кумар Пранав) та Kumar Amit (Кумар Аміт) у науковому дослідженні «Збереження та захист даних каротажу свердловин» [6] також займались аналізом процесів реєстрації різних петрофізичних властивостей гірських порід/пластів, які проникають через бурові інструменти. Зі слів авторів реакції каротажу залежать від літології, пористості, вмісту флюїдів та текстурних змін у пласті. Ця інформація в поєднанні з характеристиками осадових структур, отриманими за допомогою нахиломірів високої роздільної здатності, дає детальне уявлення про осадове середовище і дозволяє оцінити геометрію та орієнтацію покладів.

Дослідник М. С. Сторі (Storey M. C.) у своїй науковій праці «Контроль якості журналі демістифікації [2] досліджує діяльність підрядних компаній, що купують каротажні діаграми, мають системи управління якістю, що забезпечують відповідність та узгодженість з їхніми власними специфікаціями. Таким чином, отримані дані проходять певний контроль якості перед передачею компаніям-операторам, хоча він має загальний характер і зосереджений на отриманих даних, а не на їхньому майбутньому використанні. Запропонований автором кращий спосіб забезпечить якість каротажних даних та їхню готовність до використання в контексті делегованої ним запропонованої структуру для формалізації та спрощення контролю якості каротажних даних у видобувних компаніях та інших організаціях-користувачах даних.

Питаннями вимірювання різноманітних геофізичних параметрів породи займались дослідники, як Річард М. Бейтман (Richard M. Bateman) у праці «Аналіз каротажу обсаджених свердловин та моніторинг продуктивності пласта» (розглядаються життєво важливі питання, такі як оцінка покладів сланцевого газу та його видобуток. Серед тем – умови проведення каротажу в обсаджених свердловинах, властивості пластового флюїду, режими припливу, температура, шум, цементний зв'язок та імпульсний нейтронний каротаж, а також інспекція обсадних колон) [7] та у науковому дослідженні «Аналіз каротажу свердловин та оцінка пластів» (розглядається низка тем, пов'язаних з оцінкою пластів, зокрема, методи збору даних для оцінки пластів, методи аналізу та застосування результатів, каротажні вимірювання у відкритих свердловинах, аналіз каротажних діаграм і керна та випробування пластів) [8].

Питаннями оцифрування комплексів каротажних діаграм займались такі дослідники, як М. К. Насім (M. Q. Nasim) у науковій праці «Digitizer: синтетичний набір даних для аналізу каротажу свердловин» [9], П. Панкай (P. Pankaj) дослідження «Збереження та захист даних каротажу застарілих свердловин» [6], Н. С. Тапліял (H. C. Thapliyal) наукова праця «Управління даними каротажу свердловин (LogDB) – його роль та застосування у видобувному бізнесі» [1].

Аналізом питань оцифрування каротажних кривих з з використанням різних методів займались дослідники Т. Майті (T. Maiti) наукова праця «Оцифрування растрових журналів: додаток для глибокого навчання» [10], М. К. Насім (M. Q. Nasim) у науковому дослідженні «Оцифрування растрових журналів: підхід до глибокого навчання» [11], К. Бюргль (K. Bürgl) наукова праця «Оцифрування каротажних діаграм – виклики машинописних форм» [12], О. А. Гуне (Gune O. A.), А. Р. Локханде (Lokhande A. R.) та П. Р. Мангсулі (Mangsuli P. R.) у спільній науковій праці «Про сегментацію растрових зображень, виявлення екземплярів каротажних діаграм та вилучення інформації про глибину з растрів за допомогою моделей глибинного навчання» [13].

Постановка завдання. Метою статті є предметний аналіз інформаційних процесів, пов'язаних з обробкою геофізичних даних, зокрема паперових каротажів, у контексті діяльності ПАТ «УКРНАФТА». Зазначена аналітична робота спрямована на ідентифікацію та усунення

проблем, що виникають у процесі обробки цих даних, з метою підвищення ефективності та точності аналізу геологічних утворень, а також забезпечення більш точного та оперативного прийняття стратегічних рішень у сфері видобування нафти та газу. Окрім того, наше дослідження ставить перед собою завдання запропонувати автоматизовані засоби з метою опрацювання інформації в існуючій системі підтримки прийняття рішень. Можливість реалізації зазначеної мети дослідження відбувається через інтерпретацію та імплементацію засобів автоматизації процесу оцифрування даних ГДС ПАТ «УКРНАФТА» шляхом обробки даних каротажів, що є перевагою порівняно зі звичайними відомим методами обробки зображень в контексті розвитку новітніх засобів та методів опрацювання каротажних даних геофізичних досліджень свердловин.

Виклад основного матеріалу. Запропоноване у статті дослідження присвячене особливостям імплементації засобів автоматизації процесу обробки каротажних даних геофізичних досліджень свердловин. При бурінні нафтових свердловин за допомогою спеціальних приладів відбувається вимірювання різноманітних геофізичних параметрів породи, таких як: електрична провідність, рівень радіації, температура породи, акустичні властивості та інші [18, 19]. Станом на сьогодні існує багато типів каротажів, кожен з них використовується для визначення конкретної інформації про надра. Різні інструменти, такі як електричні, радіоактивні або акустичні, використовуються для проведення свердловинних вимірювань, коли електричний кабель і лебідка опускаються в свердловину, а сигнал від інструменту передається, приймається та обробляється шляхом відображення графіків на комп'ютері, які геологи та інженери можуть інтерпретувати для визначення глибини і товщини формацій, що потребують вивчення, побудови контурної карти формації і т. д. [7].

Дані геофізичних досліджень у свердловинах (ГДС) є важливим матеріалом для складання геологічного розрізу свердловини і для співставлення між собою розрізів декількох свердловин [19]. В багатьох випадках розрізи свердловин, що побудовані за даними ГДС є єдиним джерелом інформації про послідовність напластувань і властивості гірських порід, що є частиною цих напластувань [7, 20, 8, 21].

Ці дані мають ключовий вплив у процесі підтримки прийняття рішень щодо перфорації свердловини (контрольованого підриву на певній глибині), важливого процесу без якого видобування нафти є неможливим. Окрім цього, комбінування даних отриманих на кількох свердловинах може допомогти в визначення обсягу та площі покладів нафти що відповідно є важливим для визначення місця пробивання нових свердловин та розробки нових родовищ на основі зібраних систематизованих знань щодо родовищ існуючих. Матеріали ГДС можна використати також для стратиграфічної ідентифікації відкладів, оцінки петрофізичних параметрів формацій тощо [8, 21, 19].

Якісна інтерпретація даних промислової геофізики дозволяє [7, 18, 21]: зменшити кількість зразків керну, що відбирається при бурінні, отримати інформацію у свердловинах, де відбір керну не проводився, збільшити швидкість буріння, зменшити вартість буріння. Загальна ціль реєстрації каротажних діаграм полягає в тому, щоб допомогти знайти і вилучити якомога більше вуглеводів економічно найдоцільнішим способом [6, 1]. Каротажні діаграми є основним засобом визначення глибини пласта і запасів нафти, адже містять інформацію як про літологію, властивості гірських порід і флюїдів, що насичують розкриті пласти, а також надають дані, що необхідні для кількісної оцінки вуглеводнів [9, 1]. По суті відклики, що фіксуються на каротажних діаграмах, являють собою функції літології, пористості, вмісту рідин і текстурних змін формації [11, 6, 1].

Ці дані записуються на паперові каротажі які передаються зі свердловини дослідницькому центру ПАТ «УКРНАФТА» для їхнього подальшого аналізу та обробки з використанням сучасних мето-

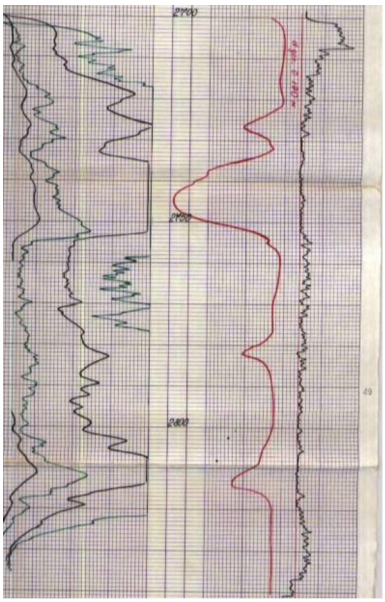


Рис. 1. Приклад паперового каротажу який описує параметри ГДС

дів аналізу даних, що в свою чергу дасть змогу самому підприємству отримати необхідну оброблену інформацію яка ляже в основу нафтовидобувного процесу (приклад паперового каротажу який описує параметри ГДС наведено на рисунку 1).

Рутинний процес обробки даних каротажів в ПАТ «Укрнафта» містить в собі наступні етапи:

1. Сканування каротажу на спеціальному сканері та збереження скан-копії в форматі «JPEG», після чого відбувається завантаження даної скан-копії на загальний сервер підприємства. Поступове оцифрування каротажу спеціалістом з використанням пакета програм «Геопошук», що полягає в фактичному перенесенні кожної точки з каротажу в додаток (рисунок 2).

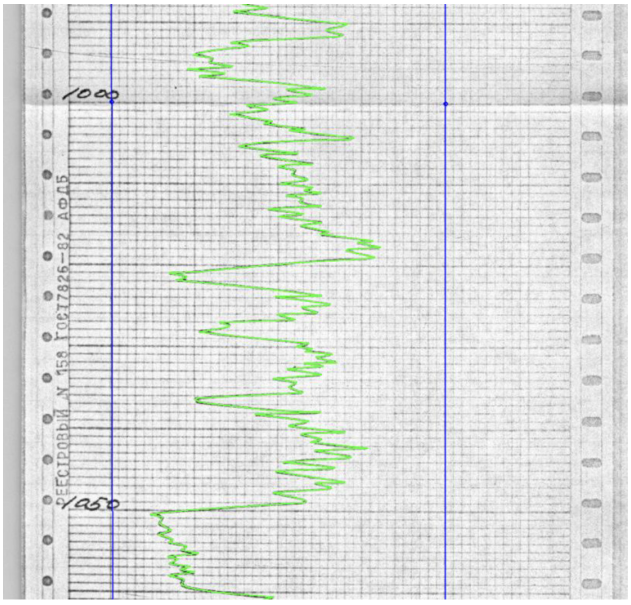


Рис. 2. Приклад цифрового представлення каротажу з використанням пакету програм «Геопошук»

Зелена лінія вказує на перенесений лінійний опис параметру. Експортування оцифрованого графіка в текстовий файл спеціального формату «LAS» для роботи з пакетом подальшого представлення в пакеті програм «Геопошук». «LAS» (Log ASCII Standard) – це стандартний формат файлу, який використовується для збереження та обміну геофізичних даних, зазвичай отриманих в результаті вимірювань у свердловинах.

2. Даний формат широко використовується у геофізичній галузі як один з основних форматів представлення даних в цифровому вигляді, що в свою чергу забезпечує зручність обміну даними між різними програмними засобами та організаціями, що працюють з геологічною та нафтогазовою індустріями.

```
~Version Information
#-------------------------
WRAP.                NO: O
~Well Information
#-------------------------
#MNEM.UNIT              DA
#---------     ----------
STRT.M
STOP.M
STEP.M
NULL.
COMP.
WELL.
FLD  .
CNTY.
STAT.
DATE.
SRVC.
UWI  .
LOC  .
~Curve Information
#-------------------------
#MNEM.UNIT                A
#---------     ----------
DEPT.M
GK   .
~Other Information
#-------------------------



#-------------------------
#  Depth        GK
~ASCII Log Data
 679.80000     2.23031
 679.90000     2.41179
 680.00000     2.59326
 680.10000     2.77474
 680.20000     2.95621
 680.30000     3.13769
 680.40000     3.13479
 680.50000     3.07591
 680.60000     3.01703
 680.70000     2.95814
 680.80000     2.89926
 680.90000     2.93561
 681.00000     3.02445
 681.10000     3.11329
```

Рис. 3. Приклад представлення каротажу в форматі «LAS»

3. Об'єднання відомостей з усіх каротажів з метою загального аналізу комбінації геофізичних властивостей породи спеціалістами з петрофізики та представлення даних у вигляді цифрового графіка в пакеті програм «Геопошук» (рисунок 4). Даний етап є ключовим саме в процесі підтримки прийняття рішень оскільки на ньому відбувається представлення інформації в зрозумілому для людини візуальному форматі.

Усі ці кроки забезпечують ПАТ «УКРНАФТА» необхідною інформацією для підтримки ефективного нафтовидобутку та стратегічного розвитку компанії в цілому.

Що стосується питань оцифрування комплексів каротажних діаграм, то сучасні каротажні дослідження передбачають реєстрацію, передачу і зберігання даних в цифровому вигляді. Традиційно такі растрові набори даних формувалися та зберігалися у паперовому форматі [9, 12, 13], у вигляді кальок, оптичних плівок [2, 1], термоплівок [6], пізніше у форматах аудіокасет (DAT) і оптичних дисках (EOD) [2].

Проте сформовані протягом десятиліть бібліотеки таких копій даних володіють рядом недоліків [6], таких як громіздкість, непрактичність, неможливість одночасного доступу до даних більше ніж

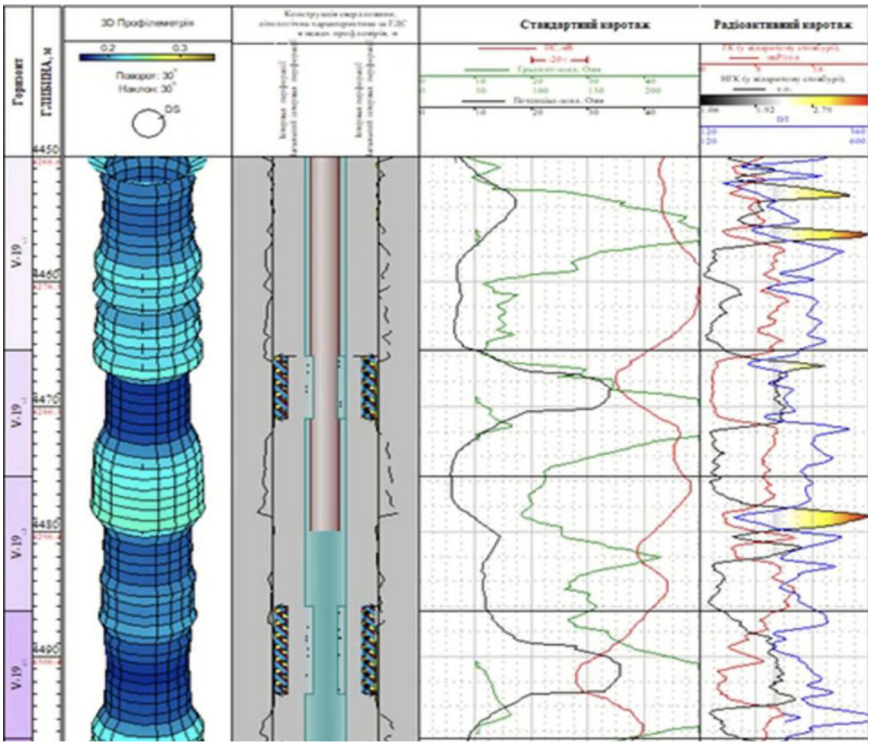


Рис. 4. Приклад представлення каротажу в форматі графіка побудованого пакетом програм «Геопошук»

одного користувача, ризики пошкодження даних при тривалому зберіганні і активному використанні.

З розвитком комп'ютерної техніки, такі набори даних було відскановано і переведено в формати *.pdf, *.jpeg, *.bmp, *.png, *.tiff тощо [13, 1], чи конвертовано у формати векторної графіки [9] для зберігання в цифровому вигляді. До того ж заповнення таких журналів могло проводитися машинописними засобами і від руки (вручну) [12], що відіграє важливу роль при розпізнаванні через необхідність застосування різних підходів, алгоритмів аналізу чи класів моделей оптичного розпізнавання символів (OCR).

Обробка каротажних даних та каротажних діаграм, що збережені в аналоговому форматі сучасними спеціалізованими системами такими як «Schlumberger Techlog», «Paradigm Geolog», «OpenWorks» і «Petrel», «Roxar RMS2 та ін. для подальшої інтерпретації та візуалізації результатів можлива тільки після якісного оцифрування [2]. До того ж для проведення коректної інтерпретації каротажних даних важливою умовою є якість каротажних даних, що підлягають аналізу, що у свою чергу отримані із каротажних кривих. Тому оцифрування каротажних діаграм є одним із способів підвищення повноти, якості та релевантності уже наявних даних. Важливо, щоб автоматизований процес оцифрування каротажних діаграм окрім значної оптимізації затрат часу забезпечував точність і якість отриманого результату, яка перевершує «ручні» способи.

Такий аналіз растрових зображень свердловинних каротажних діаграм дозволяє покращити розуміння характеристик резервуарів, визначення потенційних місць буріння і прийняття обґрунтованих рішень. Для отримання релевантних результатів інтерпретації даних ГДС потрібно, щоб каротажні криві якомога повніше відповідали реальній зміні параметрів гірських порід, що реєструються в процесі каротажу [9].

Для будь-якої компанії, яка займається розвідкою і видобуванням вуглеводнів стратегічно важливо акумулювати такий тип каротажних даних у спеціалізовані бази даних [6]. Також широкого поширення сьогодні набувають системи та платформи для обміну інформації щодо каротажу свердловин [22] отриманої із гетерогенних середовищ (операційних систем) та інтеграції з спеціалізованими програмними продуктами.

Більшість програмних продуктів, що використовуються з такою метою, наприклад «LogDB» [1] можуть зчитувати і оперувати даними каротажу свердловин, що записані у форматах «LIS», «LAS» чи «DLIS» (API RP66) [18, 2]. Тому растрові зображення чи скановані документи PDF потрібно перетворювати в файли «Comma Separated Values (csv)/LASer» (LAS).

Таким чином оцифрування растрових даних є важливим етапом забезпечення одночасного

доступу до обширних, старих, проте цінних даних різних зацікавлених сторін.

Одним із варіантів формалізації процесу оцифрування аналогових даних є побудова математичної моделі (інформаційної), яка міститиме покроковий опис всіх операцій перетворення аналогових даних в цифрові. Оцифрування каротажних кривих може бути виконане з використанням двох підходів [11]: піксельних методів і непіксельних методів. В піксельних методах білі пікселі представлені нулями, а чорні – одиницею [10].

Піксельні методи [11] включають процес проріджування і метод глобальної векторизації кривої (GCV). Метод проріджування зменшує ширину лінії до одного пікселя, залишаючи тільки скелет, що характеризує її особливості [11]. Недоліком цього процесу є втрата інформації про ширину лінії, неправильним відгалуженням при перетині ліній, низькій точності при роботі з точковими лініями і затратності по часі виконання [11].

Методи, що не засновані на пік селях, в основному, розділяють на дві категорії [11]: засновані на контурах і засновані на графах суміжності. Підхід заснований на контурах, полягає у виділенні контуру зображення і наступному пошуку пари контурів. Метод графу суміжності спочатку кодує довжини серій до графів суміжності, а потім аналізує сегменти і генерує різні структури графа суміжності (ліній, блоки).

Типовий растровий файл містить різноманітні каротажні діаграми [5] записані з прив'язкою до глибини чи траєкторії свердловини (треку). При оцифруванні каротажів і перевірці валідності отриманих результатів слід також враховувати, що растри з різних джерел (клієнт/користувач) можуть мати різну структуру [1]. Існують великі відмінності в способах створення растрових зображень. Растрові зображення можуть бути створені із різною роздільною здатністю та з використанням різних систем передачі кольору (RGB, CMYK, Bitmap, Grayscale, LAB, Indexed Color тощо), що прямо впливає на: кількість і глибину кольорів в отриманому зображенні; кількість та інтенсивність виникнення артефактів; можливість якісного оцифрування.

Також слід виокремити і проблеми, що виникають при аналізі зображень каротажних кривих [5, 18, 2]:

– велике різноманіття значень роздільної здатності і якості каротажів та їхнє зображення на різних фонових підкладках, що в свою чергу може виникати через різні умови зйомки каротажів у різних свердловинах, різні часові періоди зйомки каротажів та різноманітні підходи під час цього процесу на кожній свердловині;

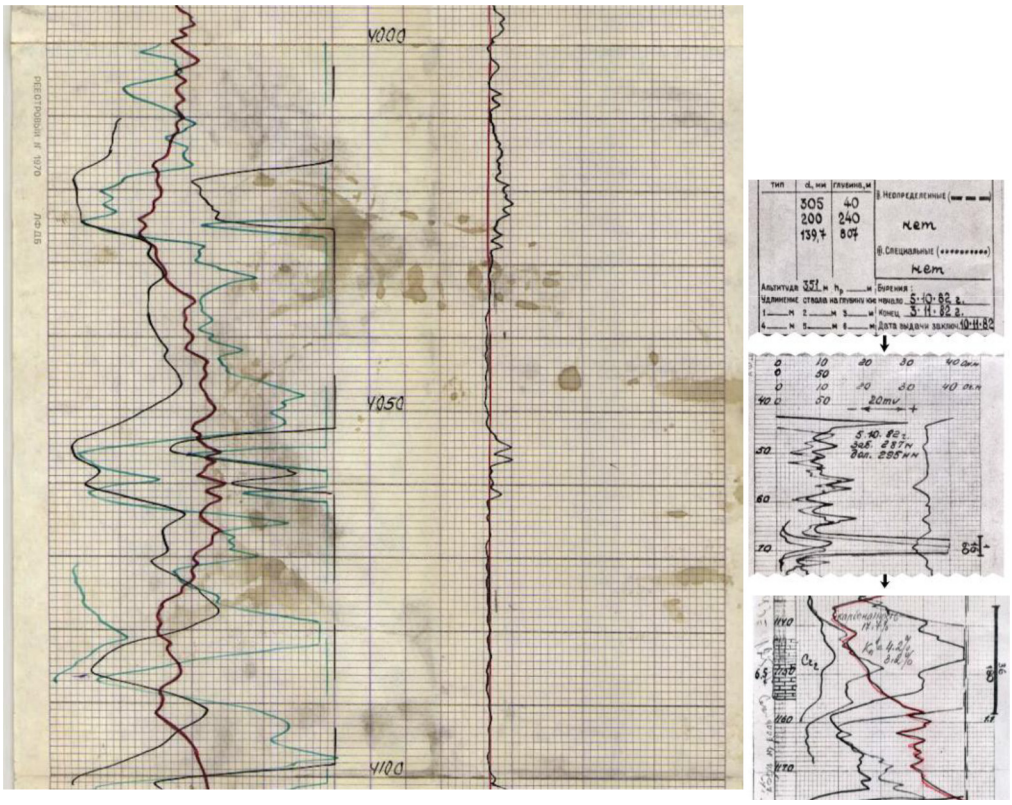


Рис. 5. Приклад каротажів низької якості

– наявність сітки з лініями різної товщини та яскравості утруднює аналіз кривих та вносить значний відсоток шумової складової;

– існує проблема масштабування кривих, оскільки не для кожної точки даних кривої записано відповідну глибину;

– наявність дефектів, затертостей і шумової складової у вигляді областей із розмиттям, зміною різкості чи кольоровим джиттером, які можуть виникати внаслідок технічних проблем під час запису інформації на каротаж або недотримання правил їх зберігання;

– раптові і нетипові перекоси кривих чи треку;

– можлива наявність нерегулярних таблиць, що з'єднані полілініями;

– можливе склеювання каротажів, що виникає внаслідок технічних або людських помилок у процесі обробки або збереження даних та подальших спроб виправлення проблеми;

– різна мнемоніка каротажних діаграм, що залежить від компаній, які проводили каротаж.

Відскановані документи демонструють артефакти сканування і можуть мати погане співвідношення сигнал/шум. Враховуючи всі ці аспекти, оцифрування растрів є нетривіальною задачею. Для вирішення кінцевої мети ефективного автоматичного оцифрування растрів використовують фреймворки на основі глибокого навчання. Слід зазначити, що більшість програмного забезпечення призначеного для оцифрування каротажів потребує постійного ручного втручання у процесі роботи. Таке втручання відбувається як на початку роботи з растровим зображенням, коли в ручному режимі оператором вказуються зони заголовків, маркуються треки чи відбраковуються артефакти сканування.

Отримані растрові зображення містять різноманітні інформаційні області, такі як заголовок журналу, підзаголовки, трек глибини, інформаційні сегменти та графіка, колонтитул, метадані та ін. [9, 13]. Заголовок місить конкретну інформацію про свердловину [5, 9, 12], таку як країна, компанія-оператор, компанія-замовник, назва та місцезнаходження свердловини, виконавець, час проведення робіт, тип журналу, метод каротажу, масштаб і одиниці вимірювання властивостей каротажу, стиль ліній (штрихова, точкова) з допомогою яких записана каротажна діаграма [13] та ін.

Для досягнення кінцевої мети оцифрування растру необхідно точно визначити області графіку/треку з заголовками, каротажними кривими чи робочими записами (коментарями). Автоматичне виокремлення таких областей є першим кроком для вилучення інформації при оцифруванні аналогових каротажних кривих. Підхід сегментації растру дозволяє виокремити ці важливі області [5].

Причому в одному растрі може бути записано декілька каротажних кривих, які слід ідентифікувати і відокремити для подальшого аналізу [1]. Через це одним з важливих етапів оцифрування растру це – ідентифікація окремих екземплярів різних каротажних діаграм, що записані в сегменті графіку. Для цього вихідними даними слу-

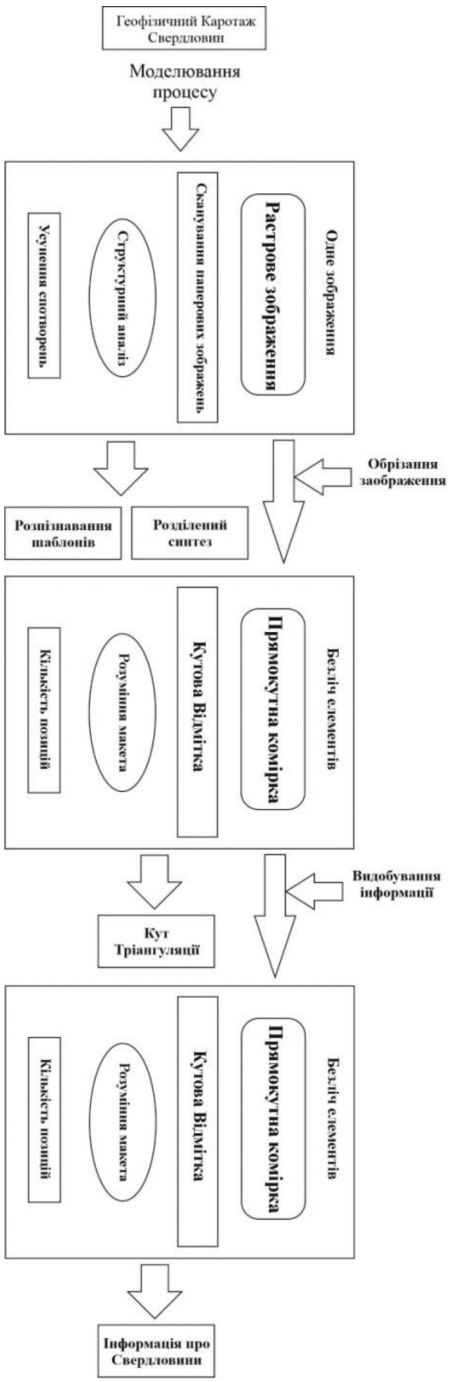


Рис. 6. Процесна модель вилучення інформації із каротажу свердловини

гують попередньо розпізнані області заголовку і підзаголовків що відповідають досліджуваному сегменту графіка (треку) [1].

Для вирішення проблем оцифрування каротажних діаграм широко використовуються [5, 14, 9, 13, 15, 16, 17] методи комп'ютерного зору, нейромережі (ANN,CNN,RNN, fast-RCNN), моделі глибокого машинного навчання (DL), як з використанням генеративно-змагальних нейромереж (c-GAN), так і з застосуванням машин опорних векторів (SVM) та ін. Швидкий технічний розвиток алгоритмів глибокого навчання дозволяє також реалізовувати цифрову побудову відсутніх ділянок каротажних кривих свердловин з достатньо високою точністю в автоматичному режимі [16].

Висновки. Інформація про криві каротажних діаграм, що міститься в базах даних у аналоговому форматі і не включена в цифрові моделі часто може мати вирішальне значення при бурінні та розробці родовищ. Для збільшення повноти бази даних цифрових моделей може бути рекомендований процес оцифрування каротажних кривих, при чому на основі результаті аналізу бізнес-логіки та поточного рівня автоматизації процесу обробки даних ГДС на ПАТ «УКРНАФТА» можна стверджувати про необхідність впровадження автоматизованого підходу до обробки каротажів. В подальших дослідженнях слід звернути увагу на застосування технології генеративного штучного інтелекту та машинного навчання з використанням спеціалізованих фреймворків, що можуть реалізувати та забезпечити швидку й точнішу обробку даних, зменшуючи час та ризик помилок.

Подальше вдосконалення та впровадження цих рішень допоможе ПАТ «УКРНАФТА» підвищити продуктивність та ефективність своєї діяльності, сприяючи зростанню доходів підприємства. Тому на основі запропонованого дослідження аналізоване рішення у вигляді процесної моделі вилучення інформації із каротажу свердловини в руслі змодельованого процесу автоматизації обробки каротажних даних геофізичних досліджень свердловин дозволить ПАТ «УКРНАФТА» автоматизувати та оптимізувати процес обробки даних каротажів з використанням сучасних засобів автоматизації та в подальшому перейти до технологій генеративного штучного інтелекту як інноваційного case-засобу методів та інструментів предметної галузі.

Список літератури:

1. Well log data management (LogDB) – its role and application in E&P busiess / H. C. Thapliyal et al. *6th International conference and exposition on petroleum geophysics "Kolkata 2006"*, Baroda. P. 1234–1238.

2. Storey M. C. Demystifying log quality control. *SPE asia pacific oil & gas conference and exhibition*, Perth, Australia. 2016. URL: https://doi.org/10.2118/182313-ms (date of access: 10.01.2025).

3. T. Well logging and formation evaluation. Gulf Professional Publishing, 2005. 326 p.

4. Cornel S., Vazquez G. Use of big data and machine learning to optimise operational performance and drill bit design. *SPE Asia pacific oil & gas conference and exhibition*, Virtual. 2020. URL: https://doi.org/10.2118/202243-ms (date of access: 10.01.2025).

5. A rapid method for information extraction from borehole log images / J. Zhang et al. *Applied sciences*. 2020. Vol. 10, no. 16. P. 5520. URL: https://doi.org/10.3390/app10165520 (date of access: 11.01.2025).

6. Preserving and securing legacy well log data / P. Pankaj et al. *Abu dhabi international petroleum exhibition & conference*, Abu Dhabi, UAE. 2017. URL: https://doi.org/10.2118/188475-ms (date of access: 10.01.2025).

7. Bateman R. M. Cased-Hole log analysis and reservoir performance monitoring. New York, NY : Springer New York, 2015. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2068-6 (date of access: 11.01.2025).

8. Bateman R. M. Openhole log analysis and formation evaluation. Society of Petroleum Engineers, 2012. 653 p.

9. Digitizer: a synthetic dataset for well-log analysis / M. Q. Nasim et al. *Image analysis and processing – ICIAP 2023 workshops*. Cham, 2024. P. 97–105. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-51023-6_9 (date of access: 10.01.2025).

10. Digitization of raster logs: a deep learning application / T. Maiti et al. *GeoConvetion*, Calgary, 20 June 2022.

11. Digitization of raster logs: a deep learning approach / M. Q. Nasim et al. *ArXiv*. 2022. Abs/2210.05597. P. 1–18. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.05597

12. Digitizing drilling logs – challenges of typewritten forms / K. Bürgl et al. INFORMATIK 2021, 2021. URL: https://doi.org/10.18420/informatik2021-059

13. Gune O. A., Lokhande A. R., Mangsuli P. R. On raster image segmentation, well log instance detection, and depth information extraction from rasters using deep learning models. *Adipec*, Abu Dhabi, UAE, 2–5 October 2023. 2023. URL: https://doi.org/10.2118/216206-ms (date of access: 11.01.2025).

14. Bartosik S., Amirlatifi A. Machine learning assisted geosteering. *54th US rock mechanics/geomechanics symposium*, Golden, Colorado, 28 June 2020. 2020. P. 1–7. URL: https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA20/ARMA20/ARMA-2020-1662/447628

15. Igulu K. T., Piah Z. P., Singh T. P. IT technologies impacting the petroleum sector. *Understanding data analytics and predictive modelling in the oil and gas industry*. Boca Raton, 2023. P. 21–42. URL: https://doi.org/10.1201/9781003357872-2 (date of access: 11.01.2025).

16. Li J., Gao G. Digital construction of geophysical well logging curves using the LSTM deep-learning network. *Frontiers in earth science*. 2023. Vol. 10. URL: https://doi.org/10.3389/feart.2022.1041807 (date of access: 11.01.2025).

17. Rahmati M., Zargar G., Ayati Zadeh Tanha A. Predicting density log from well log using machine learning techniques and heuristic optimization algorithm: a comparative study. *Petroleum research*. 2024. URL: https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.01.008 (date of access: 11.01.2025).

18. Old and modern well log data and its reliability through A novel certification process. / R. Camacho et al. *International oil conference and exhibition in mexico*, Cancun, Mexico. 2006. URL: https://doi.org/10.2118/103902-ms (date of access: 10.01.2025).

19. Petrophysical analysis of well logs data for identification and characterization of the main reservoir of Al Baraka Oil Field, Komombo Basin, Upper Egypt / A. H. Senosy et al. *SN applied sciences*. 2020. Vol. 2, no. 7. URL: https://doi.org/10.1007/s42452-020-3100-x (date of access: 11.01.2025).

20. Bateman R. M. Formation evaluation with pre-digital well logs. Elsevier, 2011. 271 p.

21. Liu H. Principles and applications of well logging. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-54977-3 (date of access: 11.01.2025).

22. Li C., Cheng D., Zhang C. A platform to integrate well-log information applications on heterogeneous environments. *Proceedings of the 2nd international conference on information technology for application (ICITA 2004)*. P. 265–270.

23. LogDigi, LLC. LogDigi – digitizing service. URL: https://www.logdigi.com/Digitizing%20Service.htm

24. Wellcad-Borehole data display and interpretation solutions. *https://wellcad.com/*. URL: https://wellcad.com/

25. Well log digitizing software-Neuralog. https://www.neuralog.com/well-log-digitizing-software-neuralog/

26. VeerNet: using deep neural networks for curve classification and digitization of raster well-log images / M. Q. Nasim et al. *Journal of imaging*. 2023. Vol. 9, no. 7. P. 136. URL: https://doi.org/10.3390/jimaging9070136 (date of access: 11.01.2025).

Petryshyn R. I., Sheketa V. I., Pavliv A. I., Kasianchuk I. P. MODELING OF THE AUTOMATED PROCESSING OF LOGGING DATA FOR GEOPHYSICAL SURVEYS OF WELLS

The article considers the problem of automatization process modeling for well logging data processing of geophysical surveys based on a substantive analysis of information processes related to the geophysical data processing, in particular, paper logs, in the context of PJSC «Ukrnafta». The proposed analytical study is targeted at identifying and eliminating problems occurring in the process of analyzing these data in order to increase the efficiency and accuracy of geological formations analysis, as well as to ensure more precise and prompt strategic decision-making in the area of oil and gas production. In addition, the proposed research attempts to propose possible solutions based on automatization methods and tools to process information in the existing decision support system.

The possibility of realizing this research goal is achieved through the interpretation and implementation of tools and models for automating the process of digitizing information from the GSW (geophysical surveys of wells) of PJSC "Ukrnafta" by processing well logs, which is an advantage over conventional known image processing methods in the context of the development of the latest tools and methods for processing well logs of geophysical surveys.

In the context of the research of the problem, the author analyzes the processes of obtaining and primary processing of logging data, some features of digitizing complexes of logging diagrams with examples, identifies means of automating the process of digitizing logging diagrams, and proposes a process model for extracting information from well logs.

For the implementation of the proposed task, the advantages and disadvantages of using various tools and methods for processing geophysical and well-logging data are analyzed and highlighted, and a process model for extracting information from well logs in the context of automating these processes is presented, which will ensure fast and accurate data processing, reducing time and the risk of errors. Further improvement and implementation of this solution will help PJSC «Ukrnafta» to increase the productivity and efficiency of its operations, contributing to the growth of the company's revenues. Therefore, based on the proposed study, the analyzed solution will allow PJSC «Ukrnafta» to modernize and optimize the process of logging data processing using automated tools.

Key words: *model, method, process, automation, optimization, logging data, geophysical data, digitization, image, framework.*

УДК 004.8:681.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/26

Пшеничний О. Ю.
Національний університет «Запорізька політехніка»

РОЗВИТОК АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Стаття зосереджена на створенні системи, яка інтегрує глибокі штучні нейронні мережі (ШНМ) із жорсткою логікою для точної класифікації чотирьох станів роботи обладнання: нормального функціонування, перегріву, механічної несправності та електричної несправності. Розробка базується на синтетичному наборі даних, що відображає ключові параметри роботи електромеханічного обладнання, такі як температура, вібрація, струм і напруга, з метою забезпечення високої точності та надійності в автоматизованих системах керування для промислового застосування.

Мета статті. *Метою дослідження є розробка та моделювання гібридної моделі для автоматизованого моніторингу й діагностики стану електромеханічних систем із використанням штучного інтелекту.*

Наукова новизна. *Пропонований підхід вирізняється інноваційним поєднанням адаптивних можливостей ШНМ із детермінованою точністю жорсткої логіки, що дозволяє подолати обмеження традиційних систем керування, які є недостатньо гнучкими, та чистих нейронних моделей, які можуть бути непередбачуваними в критичних ситуаціях. На відміну від аналогів, таких як моделі на основі SVM чи Random Forest, що менш ефективні для нелінійних залежностей, або чистих ШНМ, які не гарантують безпеки, гібридна модель орієнтована на специфіку електромеханіки та готова до інтеграції з реальними датчиками. Використання синтетичних даних із контрольованим шумом як етапу доказу концепції додає наукової цінності, забезпечуючи регульоване тестування перед практичним впровадженням.*

Результати. *Розроблена модель демонструє високу точність класифікації (до 99 %) на синтетичному наборі даних із 2000 зразків, що включають чотири класи станів із доданим шумом для імітації реальних умов. Глибока нейронна мережа з п'ятьма прихованими шарами (64-48-32-16-8 нейронів) у поєднанні з детермінованими правилами жорсткої логіки забезпечує стабільне розпізнавання станів навіть у прикордонних випадках. Застосування Dropout (0.3, 0.2) і нормалізації даних через StandardScaler сприяє узагальненню, а оптимізатор Adam і функція втрат categorical_crossentropy гарантують ефективне навчання протягом 30 епох. Результати підтверджуються графіками точності та втрат, що свідчать про низький рівень помилок (0.11–0.13).*

Висновки. *Гібридна модель є перспективною для автоматизованих систем керування в електромеханіці завдяки унікальному поєднанню гнучкості ШНМ і надійності жорсткої логіки. Синтетичні дані, що відображають фізичні характеристики обладнання, слугують контрольованим етапом розробки, наближаючи модель до практичного використання. Висока точність і стабільність результатів підкреслюють її потенціал для інтеграції в промислові системи реального часу за умови адаптації до реальних даних і апаратного забезпечення. Подальші дослідження можуть охопити аналіз часових рядів і тестування з реальними датчиками для повного переходу від теоретичної моделі до прикладного рішення.*

Ключові слова: *електромеханіка, автоматизація, штучні мережі, жорстка логіка, системи керування.*

Постановка проблеми. Сучасні електромеханічні системи, такі як двигуни, насоси чи конвеєри, потребують ефективного моніторингу для запобігання збоям і забезпечення безперебійної роботи. До того ж традиційні системи керування спираються на жорстку логіку (наприклад, порогові правила), яка є надійною, але неадаптивною до складних умов експлуатації. З іншого боку, штучні нейронні мережі пропонують гнучкість і здатність до узагальнення, але можуть бути менш передбачуваними в критичних ситуаціях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ліао Х. (Liao X.), Ву Л. (Wu L.) досліджують проектування та інтеграцію автоматичних систем керування на основі штучного інтелекту, зосереджуючись на покращенні ефективності та надійності промислових процесів [1]. Вонг К. (Wang Q.) аналізує вплив штучного інтелекту на інструментальні системи автоматичного моніторингу та контролю, підкреслюючи покращення точності та швидкості обробки даних [2]. Фенг С. (Feng S.) досліджує автоматизації систем

керування за допомогою технологій штучного інтелекту, демонструючи підвищення гнучкості та адаптивності автоматизованих процесів [3]. Фарах С. (Farah S.) займається дослідженням оптимізації електричної автоматизації керування за допомогою штучного інтелекту, зосереджуючись на покращенні ефективності та надійності [4]. Кіяо Л. (Qiyao L.) розглядає застосування штучного інтелекту в промислових системах автоматизації, підкреслюючи покращення процесів керування та моніторингу [5]. Антонюк В. (Antonyuk V.), Сидорова М. (Sydorova M.) сконцентровані на дослідженні інтеграції штучного інтелекту для автоматичного створення макросів, зосереджуючись на підвищенні продуктивності та зниженні помилок [6]. Вонг Х. (Wang H.), Хао Л. (Hao L.), Шарма А. (Sharma A.), Кукар А. (Kukkar A.) описують автоматичне керування обробкою даних комп'ютерних додатків на основі штучного інтелекту, підкреслюючи покращення ефективності та швидкості обробки [7]. Лістровий С. В., Мірошник М. А., Клименко Л. А. зосереджуються на практичному застосуванні з теорії автоматичного керування, штучного інтелекту та автоматизації процесу прийняття рішень [8]. Паламар М. І. зосереджується на практичних аспектах прецизійного управління за допомогою штучного інтелекту [9]. Стасенко Д. В., Островка Д. В., Теслюк В. М. описують розроблення автономної системи керування мобільною робототехнікою за допомогою моделей на основі штучних нейронних мереж, підкреслюючи покращення автономності та ефективності [10]. Враховуючи наявні публікації за останні 5 років наразі немає аналогів які б демонстрували роботу автоматизованих систем керування враховуючи стан їх навченості і натренованості за допомогою штучного інтелекту.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та моделювання гібридної моделі для автоматизованого моніторингу та діагностики стану електромеханічних систем на основі штучного інтелекту.

Виклад основного матеріалу. Синтетичний набір даних генерується для імітації роботи електромеханічної системи. Він включає чотири класи. По-перше, нормальний стан який коливається в діапазоні температур 20–50 °C, вібрації 0–8 мм/с, струму 5–15 А, напруги 220–240 В. По-друге, стан перегріву що фіксується на температурі 60–80 °C, нормальній вібрації та напрузі, підвищеному струму (10–20 А). По-третє, стан механічної несправності що визначається температурами 40–60 °C, високою вібрацією (10–20 мм/с), струмом 15–25 А, зниженою напругою (200–230 В). По-четверте, електрична несправність яка фіксується температурами 30–55 °C, широким діапазоном струму (5–30 А через стрибки), низькою напругою (180–210 В). Дані включають шум (нормальний розподіл), що відображає реальні умови роботи обладнання.

Набір даних моделює типові фізичні величини електромеханічних систем, такі як температура, вібрація, струм і напруга, які вимірюються датчиками в автоматизованих системах, відображаючи реальні умови роботи двигунів чи приводів. Температура вважається нормальною до 50 °C, а перегрів виникає при показниках понад 60 °C. Підвищена вібрація (понад 10 мм/с) свідчить про механічні проблеми, тоді як стрибки струму (від 5 до 30 А) вказують на електричні несправності. Падіння напруги (нижче 210 В) слугує ознакою електричних збоїв. Додатково, шум додано для імітації похибок датчиків і природних коливань.

Синтетичні дані дозволяють контролювати розподіл класів і тестувати модель у регульованих умовах, що є типовим для початкових етапів розробки в електромеханіці. Синтетичний набір даних слугує контрольованою основою для розробки моделі, дозволяючи точно моделювати типові стани електромеханічних систем і тестувати її межі в регульованих умовах. Водночас грань між синтетикою та практичними реаліями полягає в спрощенні складних явищ, таких як поступове зношування чи систематичні похибки датчиків, що потребуватиме подальшої адаптації до реальних даних. Такий підхід є науково виправданим на етапі доказу концепції, забезпечуючи перехід від теорії до впровадження.

Для створення моделі використано штучні мережі а саме глибоку нейронну мережу (Sequential) із шарами 64-48-32-16-8 нейронів, Dropout (0.3 і 0.2) для узагальнення, і вихідним шаром із 4 нейронами (softmax) для багатокласової класифікації. Для жорсткої логіки застосовуються детерміновані правила (наприклад, temp > > 65 → Перегрів) які доповнюють ШНМ, забезпечуючи безпеку в критичних станах. Для навчання застосовано оптимізатор Adam, функцію втрат categorical_crossentropy, 30 епох.

Код використовує бібліотеки Python: numpy для генерації та обробки масивів даних, sklearn для підготовки даних, включаючи розділення на тренувальні та тестові набори та нормалізацію, tensorflow.keras для побудови глибоких нейронних мереж, і matplotlib для візуалізації результа-

тів. Numpy забезпечує швидку роботу з числовими операціями, тоді як sklearn.model_selection. train_test_split розділяє дані на тренувальні та тестові набори, а sklearn.preprocessing.StandardScaler нормалізує дані для підвищення якості навчання. Tensorflow.keras, провідна бібліотека для створення нейронних мереж, підтримує гнучкість і оптимізацію, наприклад, за допомогою Adam, тоді як tensorflow.keras.utils.to_categorical перетворює мітки в one-hot encoding для багатокласової класифікації. Matplotlib.pyplot дозволяє візуалізувати результати, такі як точність і втрати, що є ключовим для аналізу в наукових роботах. Ці бібліотеки є стандартом де-факто в машинному навчанні, забезпечуючи ефективність, надійність і відтворюваність результатів.

Компоненти схеми навчання і набору даних включають генерацію даних, попередню обробку, модель штучної нейронної мережі (ШНМ), жорстку логіку, навчання, оцінку та прогноз. Функція generate_data створює синтетичний набір із 2000 зразків, розподілених по 4 класах по 500 зразків кожен. Попередня обробка включає розділення даних на тренувальні та тестові набори за допомогою train_test_split і нормалізацію даних за допомогою StandardScaler. Модель ШНМ складається з глибокої мережі з 7 шарів: вхідного, 5 прихованих і вихідного. Жорстка логіка реалізована функцією hard_logic_check для застосування детермінованих правил. Навчання моделі проводиться протягом 30 епох з використанням оптимізатора Adam і функції втрат categorical_crossentropy. Оцінка моделі здійснюється за точністю на тестових даних. Прогноз виконується шляхом комбінації результатів ШНМ і жорсткої логіки для остаточної класифікації. А для візуалізації створюються графіки на яких проілюстровано точність та втрати, Рис. 1.

Як продемонстровано на Рис. 2 код на мові програмування Python моделює систему моніторингу стану електромеханічного обладнання з метою забезпечення автоматизованої діагностики з високою точністю та безпекою для систем керування, генерує синтетичні дані для 4 станів, тренує глибоку нейронну мережу для багатокласової класифікації, використовує жорстку логіку для корекції прогнозів, оцінює точність і візуалізує результати.

Результати Рис. 3 демонструють точність досягає 99 %, а втрати знижуються до 0.11–0.13, що свідчить про успішне навчання. Використання Dropout (0.3, 0.2) запобігає перенавчанню, а нормалізація даних через StandardScaler забезпечує стабільність. Глибина моделі (5 прихованих

Рис. 1. Схема навчання і набору даних
Джерело: авторська розробка

шарів) дозволяє складні взаємозв'язки між параметрами. Жорстка логіка додає детерміновану перевірку, підвищуючи надійність у критичних умовах.

Модель досягла точності 99 % на тестових даних, демонструючи здатність розрізняти стани з високою впевненістю. Жорстка логіка коректно уточнює прогнози ШНМ, особливо в прикордонних випадках. Висока точність моделі (99 %) та стабільність навчання обґрунтовані не лише глибиною архітектури чи нормалізацією даних, а й унікальним поєднанням адаптивності ШНМ із детермінованою надійністю жорсткої логіки. Порівняно з альтернативними підходами, такими як чисто нейронні моделі (CNN, LSTM) чи традиційні методи (SVM, Random Forest), гібридна система краще справляється з нелінійними залежностями та критичними прикордонними станами, де потрібна гарантія безпеки. Використання синтетичних даних на цьому етапі забезпечує контрольований експеримент, що є стандартною практикою для доказу концепції (proof of concept), дозволяючи моделювати реальні умови з додаванням шуму, але без неконтрольованих зовнішніх факторів.

Варто звернути увагу на суттєві відмінності запропонованого підходу від аналогів. По-перше, поєднання ШНМ із жорсткою логікою відрізняє

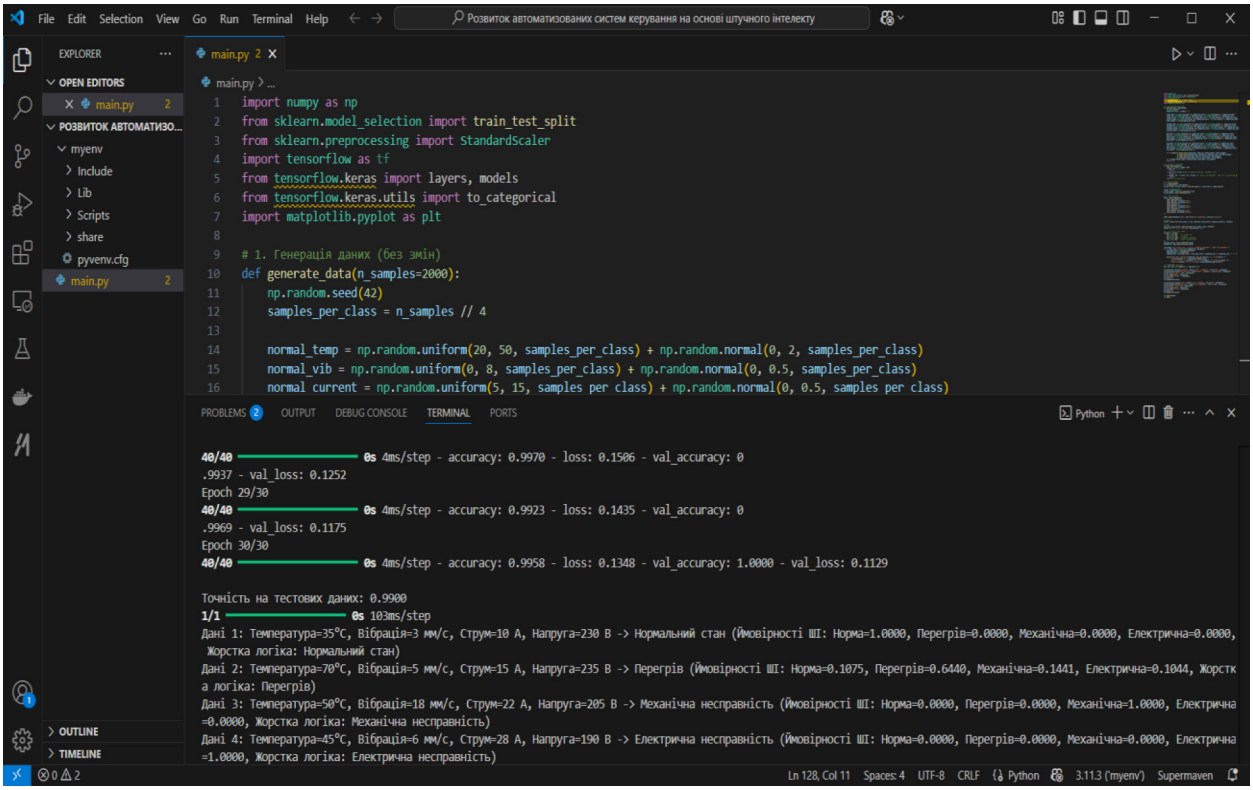


Рис. 2. Результат навчання гібридного підходу до діагностики стану електромеханічних систем на основі штучних нейронних мереж та жорсткої логіки для автоматизованих систем керування у Visual Studio Code

Джерело: авторська розробка

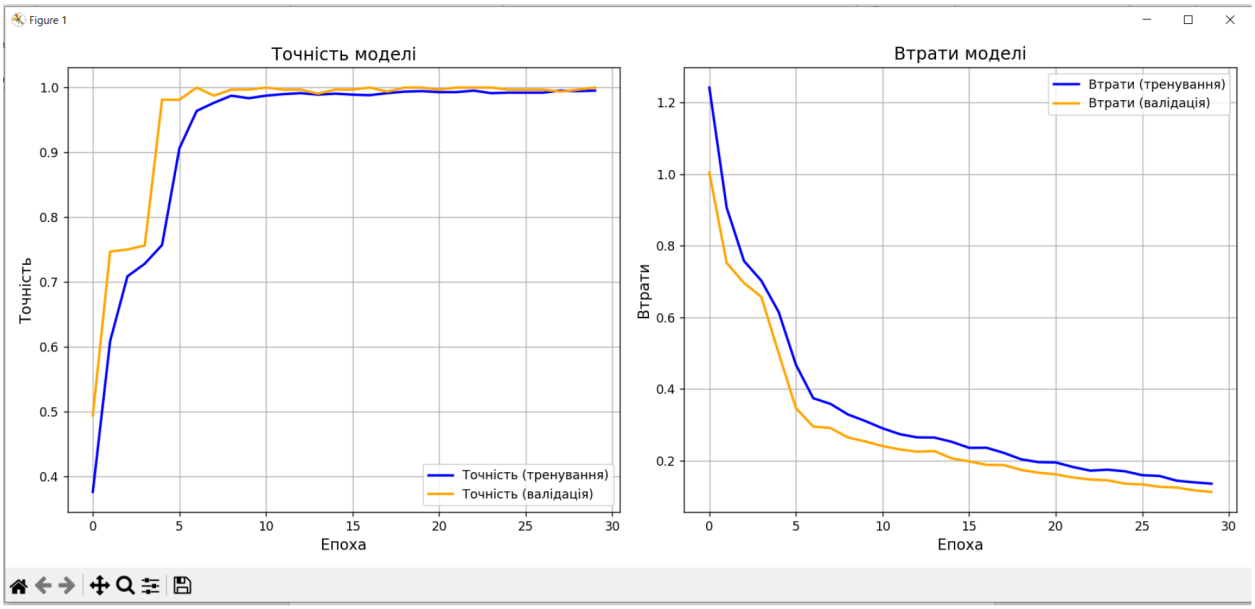


Рис. 3. Графік з результатами навчання

Джерело: авторська розробка

його від чисто нейронних (зокрема, CNN, LSTM) чи чисто логічних систем (PLC). По-друге, набір даних і класи (перегрів, механічна/електрична несправність) орієнтовані на специфіку електромеханічних систем, на відміну від загальних моделей класифікації. По-третє, код готовий до інтеграції з датчиками (наприклад, через Modbus), що рідко враховується в академічних аналогах. По-четверте, моделі на основі SVM чи Random Forest менш адаптивні до складних нелінійних залежностей, а чисті ШНМ не гарантують детермінованої безпеки.

Висновки. Запропонований код є новаторським завдяки інтеграції штучних мереж із жорсткою логікою, що відповідає потребам електромеханіки та автоматизації. Він може слугувати основою для систем реального часу за умови адаптації його до реальних даних і апаратного забезпечення. Запропонований гібридний підхід вирізняється поєднанням гнучкості штучних мереж із надійністю жорсткої логіки, що робить його перспективним не лише в теорії, а й у практичних системах керування. Синтетичні дані, використані для розробки, відображають реальні фізичні характеристики електромеханічних систем і слугують контрольованим етапом перед переходом до реальних умов. Цей баланс між ідеалізованим моделюванням і наближенням до практики підкреслює наукову цінність моделі, відкриваючи шлях до її адаптації в реальному часі. При цьому подальшими перспективами дослідженнями є інтеграція з реальними датчиками та аналіз часових рядів.

Список літератури:

1. Liao X., Wu L. Design and Integration of Automatic Control System Based on Artificial Intelligence. In: Hung, J.C., Yen, N., Chang, JW. (eds) Frontier Computing on Industrial Applications. Volume 2. FC 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1132. Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-9538-7_22 URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-9538-7_22

2. Wang Q. The Analysis of Instrument Automatic Monitoring and Control Systems Under Artificial Intelligence. *International Journal of Information Technologies and Systems Approach (IJITSA), 2024. 17*(1), 1–13. DOI: https://doi.org/10.4018/IJITSA.336844 URL: https://www.igi-global.com/article/the-analysis-of-instrument-automatic-monitoring-and-control-systems-under-artificial-intelligence/336844

3. Feng S. Automation Control System Based on Artificial Intelligence Technology. In: Hung, J.C., Chang, JW., Pei, Y., Wu, WC. (eds) Innovative Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2022. vol 791. Springer, Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4258-6_96 URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-4258-6_96

4. Farah S. Optimize electric automation control using artificial intelligence (AI), Optik, Volume 271, 2022, 170085, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170085 URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402622013432

5. Qiyao L. Application of Artificial Intelligence in Industrial Automation Control System. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. 647. 012043. DOI: 10.1088/1755-1315/647/1/012043 URL: https://surl.li/oxmzgy

6. Antonyuk V., Sydorova M. Integration and use of artificial intelligence for automated macros creation. System technologies. 2024. № 5(154). P. 16-23. DOI: 10.34185/1562-9945-5-154-2024-02 URL: https://surl.li/tmtkfm

7. Wang H., Hao L., Sharma A. & Kukkar A. Automatic control of computer application data processing system based on artificial intelligence. *Journal of Intelligent Systems*, 2022. *31*(1), 177–192. DOI: https://doi.org/10.1515/jisys-2022-0007 URL: https://surl.li/aieqft

8. Лістровий С.В., Мірошник М.А., Клименко Л.А. Теорія автоматичного керування, штучний інтелект і автоматизація процесу прийняття рішення: Навч. посібник. Харків: УкрДУЗТ, 2019. 20 с. URL: https://surl.li/efjode

9. Паламар М.І. Комп'ютерні технології штучного інтелекту для прецизійного управління у мехатронних системах : навч. посіб. / Михайло Паламар, Михайло Стрембіцький ; Тернопіл. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. Тернопіль : Тернопіл. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя, 2018. 127 с.

10. Стасенко Д.В., Островка Д.В., Теслюк В.М. Розроблення автономної системи керування мобільною робототехнічною системою з використанням моделей на підставі штучних нейромереж. Науковий вісник НЛТУ України. 2021, т. 31, № 6. С. 112–117. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2021/31_6/19.pdf

Pshenychnyi O.Yu. DEVELOPMENT OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The paper focuses on the creation of a system that integrates deep artificial neural networks (ANNs) with hard logic to accurately classify four equipment operating states: normal operation, overheating, mechanical fault, and electrical fault. The development is based on a synthetic dataset that reflects key parameters of electromechanical equipment, such as temperature, vibration, current, and voltage, to ensure high accuracy and reliability in automated control systems for industrial applications.

The purpose of the article. The aim of the study is to develop and simulate a hybrid model for automated monitoring and diagnostics of electromechanical systems using artificial intelligence.

Scientific novelty. The proposed approach is distinguished by an innovative combination of adaptive capabilities of ANNs with the deterministic accuracy of hard logic, which overcomes the limitations of traditional

control systems, which are not flexible enough, and pure neural models, which can be unpredictable in critical situations. Unlike analogs such as SVM or Random Forest-based models, which are less effective for nonlinear dependencies, or pure ANNs, which do not guarantee safety, the hybrid model is focused on the specifics of electromechanics and is ready to be integrated with real sensors. The use of synthetic noise-controlled data as a proof-of-concept step adds scientific value by providing regulated testing before practical implementation.

Results. The developed model demonstrates high classification accuracy (up to 99 %) on a synthetic dataset of 2000 samples, including four classes of states with added noise to simulate real-world conditions. A deep neural network with five hidden layers (64-48-32-16-8 neurons) combined with deterministic hard logic rules ensures stable state recognition even in borderline cases. The use of Dropout (0.3, 0.2) and data normalization via StandardScaler facilitates generalization, while the Adam optimizer and the categorical_crossentropy loss function guarantee efficient training over 30 epochs. The results are confirmed by the accuracy and loss plots, which show a low error rate (0.11–0.13).

Conclusions. The hybrid model is promising for automated control systems in electromechanics due to the unique combination of the flexibility of ANNs and the reliability of hard logic. Synthetic data reflecting the physical characteristics of the equipment serve as a controlled stage of development, bringing the model closer to practical use. The high accuracy and stability of the results emphasize its potential for integration into real-time industrial systems, provided it is adapted to real data and hardware. Further research could include time series analysis and testing with real sensors to fully transition from a theoretical model to an applied solution.

Key words: *electromechanics, automation, artificial networks, hard logic, control systems.*

УДК 519.713:517:338
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/27

Савченко І. О.
Національний університет харчових технологій

Мацько П. І.
Національний університет оборони України

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ЗАГРОЗ КРИТИЧНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ

У даній роботі розглядається проблема оцінки загроз критичній інфраструктурі в умовах війни та їх вплив на національну безпеку. Важливість прийняття рішень у умовах невизначеності підкреслюється як ключовий аспект управління ризиками для критичної інфраструктури.

Також автори провели аналіз раніше опублікованих наукових матеріалів, що стосуються застосування різноманітних експертних методів для оцінювання небезпек та потенційних негативних наслідків надзвичайних ситуацій, що можуть виникнути на об'єктах критичної інфраструктури України в умовах триваючої збройної агресії з боку Російської Федерації.

Для аналітичного зважування потенційних небезпек для критичної інфраструктури в контексті сучасної російсько-української війни, розглянуто перспективу застосування методів експертного оцінювання. Сформульовано необхідні рекомендації та висновки щодо його ефективності та доцільності в цьому випадку. З використанням власного програмного забезпечення, розробленого авторами на Python, проведено практичні розрахунки, підкріплені науковими обґрунтуванням висновків щодо потенційних загроз. Завдяки цій програмі було реалізовано процедуру підтримки прийняття рішень щодо визначення пріоритетності загроз для об'єктів критичної інфраструктури, зважаючи на ступінь ризиків, ймовірність та можливі збитки від пошкодження.

На підставі даних, отриманих внаслідок функціонування програмного забезпечення, стає очевидним, що використання методів експертного оцінювання забезпечує можливість дослідження ризиків для критичної інфраструктури в умовах апріорної невизначеності, враховуючи ймовірнісний характер воєнних дій та стохастичність ракетно-дронових атак.

Програма надає можливість створити ранжований список потенційних загроз, провести процеуру відсіювання тих загроз, що не мають першочергового значення. Це робиться задля ефективного розподілу обмежених сил та ресурсів для зменшення ймовірного негативного впливу надзвичайних ситуацій природного, техногенного та воєнно-техногенного характеру.

Ключові слова: *критична інфраструктура, загрози, ракетно-дронові удари, експертна оцінка, Python, процедура оцінювання, мінімізація ризиків, надзвичайні ситуації, цивільний захист.*

Постановка проблеми. У воєнний час, критична інфраструктура є фундаментальною складовою національної безпеки держави. Порушення її роботи, або ж повне знищення, призводить до важких наслідків, які відчуватимуться на місцевому або загальнодержавному рівні. Саме об'єкти критичної інфраструктури (ОКІ) стають ціллю для ракетних та дронових атак ворога. Основна мета цих ударів – досягти рівня руйнувань, здатного спричинити екологічну, техногенну та гуманітарну катастрофу, враховуючи обмежене використання ядерної зброї та застосування звичайної.

Відтак, сьогодні надзвичайно важливим є всебічний аналіз та оцінка загроз, яким піддається критична інфраструктура. Це потрібно для превентивного реагування, уникнення надзвичайних ситуацій, як воєнного, так і техногенного характеру. У випадку їх виникнення, першочерговим завданням стає мінімізація наслідків та швидке реагування для їх ліквідації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведемо аналіз низки наукових публікацій щодо систем підтримки прийняття рішень (СППР), що застосовуються для підвищення рівня еколого-техногенної безпеки.

У статті Якуба Л., Хана Н. А., Субхана Ф. [9] (2024) «Огляд існуючих систем підтримки рішень для управління лихами» проаналізовано існуючі СППР для управління надзвичайними ситуаціями. Автори аналізують різні підходи до використання інформаційних технологій у кризових ситуаціях та визначають їхню ефективність у зниженні ризиків

та підвищенні ефективності реагування. У статті Попова А. (2024) [10] «Архітектура регіонального моніторингу навколишнього середовища» проаналізовано регіональні архітектури екологічного моніторингу на основі Інтернету речей та хмарних обчислень. Проаналізовано рівень інтегрованих інформаційних систем, які дозволяють збирати, обробляти та управляти екологічними даними для підвищення ефективності моніторингу та управління природними ресурсами.

Робота Пеанковського С. [11] (2023) «Інформаційне забезпечення прийняття рішень система в надзвичайних ситуаціях» присвячена інформаційній підтримці систем прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій. Автор аналізує шляхи оптимізації процесів управління, скорочення часу реагування та використання інформаційних технологій для підвищення ефективності прийняття рішень у кризових ситуаціях. У статті Ванґа, В.-Ц. [12] (2020) «Багатофункціональна система підтримки прийняття рішень у разі лиха на основі динамічних даних із багатьох джерел» обговорюється розробка багатоджерельної СППР з управління катастрофами на основі інтеграції декількох джерел інформації. Автор підтримує важливість ефективної комунікації та швидкого доступу до актуальних даних для оптимізації процесу реагування на катастрофи, включаючи готовність, реагування та відновлення.

У статті Лавала Б. Н. Дж., О. Дж.-Й., Гікса Д., Кумар В. [13] (2024) «Система підтримки прийняття рішень для відновлення після катастроф» обговорюється розробка СППР для управління надзвичайними ситуаціями на основі інтеграції динамічних даних з різних джерел. Автори підтримують важливість ефективної комунікації та швидкого доступу до актуальних даних для оптимізації процесу реагування на катастрофи, включаючи готовність, швидке реагування та відновлення. Система включає функції моделювання та навчання для різних сценаріїв катастроф, які можуть підвищити ефективність готовності та реагування.

Раніше згадані дослідження акцентують увагу на існуванні численних загроз (збройні конфлікти, катастрофи, кібернетичні атаки) та небезпек (екологічні, техногенні, гуманітарні) для критичної інфраструктури, зокрема, в умовах військових конфліктів. Для ефективного контролю над цими загрозами та ризиками необхідно не тільки збирати й аналізувати інформацію, але й ухвалювати обґрунтовані рішення, що, своєю чергою, базуються на результатах прогнозних методів.

Постановка завдання. У світовій практиці оцінювання небезпек для життя людей та функціонування критичної інфраструктури традиційно використовуються терміни «загроза» та «ризик». Загроза визначається як природне або техногенне явище, яке потенційно може призвести до виникнення подій чи процесів, здатних завдати шкоди здоров'ю людей, спричинити матеріальні збитки та негативно вплинути на навколишнє середовище.

Проте, стосовно умов бойових дій в Україні, пристосований термін «загроза» окреслює ймовірність появи певних обставин воєнно-техногенного плану, за яких можуть виникнути негативні екологічні процеси, зумовлені воєнно-техногенними чинниками ураження компонентів навколишнього природного середовища.

За визначенням В. Маршалла, «ризик – це частота реалізації загрози», а загроза – природне чи техногенне явище, що може призвести до виникнення подій або процесів, здатних нашкодити людям, завдати матеріальних збитків, знищити довкілля. Саме таке трактування ризику одержало найбільше розповсюдження у науково-технічній літературі з промислової безпеки. Небезпека виникнення аварій на об'єктах підвищеної небезпеки обумовлена можливістю руйнування будівель або технічних пристроїв, вибухами та викидами небезпечних речовин з ураженням людей, спричиненням майнових втрат і забрудненням навколишнього природного середовища.

Зазвичай, у теоретичному плані термін «ризик» інтерпретують по-різному, проте в кожному з пояснень присутній елемент «невідомості»: чи станеться щось небажане, чи ні; чи виникне через це небажаний (небезпечний) стан, чи ні. Така обмеженість інформації при вивченні явищ, процесів та ситуацій зближує концепцію «ризику» з процесом «прийняття рішень» за наявності недетермінованих чинників.

Виклад основного матеріалу. На теперішній час існує декілька математичних концепцій для фахової оцінки потенційних небезпек і ризиків у контексті критичної інфраструктури. У державах Європейського Союзу активно впроваджується систематичний підхід, котрий базується на оцінюванні загроз і ризиків з використанням низки критеріїв [1–5].

Встановлено, що методи експертного оцінювання спираються на акумуляцію професійного досвіду та інтуїції експертів. Ці методи оцінювання небезпек та ризиків застосовують формальну теорію ухвалення рішень в умовах неви-

значеності. У випадку виникнення надзвичайної ситуації (НС) ключовою постаттю та суб'єктом прийняття рішень є особа, що приймає рішення (ОПР). Це може бути як індивідуальна особа, так і група людей, які формують колективне рішення, зазвичай, ОПР – це керівник або керуючий орган, котрий формулює проблему, відіграє вирішальну роль у виборі рішення проблеми та несе відповідальність за прийняте рішення. При цьому експерти та консультанти відповідають за обґрунтованість рекомендацій, які вони готують для ОПР. Остаточне рішення завжди приймається ОПР, відповідно до власної системи пріоритетів, а також несе повну відповідальність за свій вибір та його наслідки [6, 7].

Існують різні підходи до оцінювання загроз критичній інфраструктурі:

1. Метод експертної оцінювання: Цей підхід передбачає залучення кількох спеціалістів, які на основі своїх знань та досвіду оцінюють потенційні загрози та їхню ймовірність.

2. Методи аналізу ризиків: включають такі методи, як аналіз потенційних втрат, аналіз вірогідності та наслідків, а також метод Монте-Карло та інші.

3. Методи математичного моделювання: За допомогою математичних моделей можна оцінювати загрози та аналізувати ризики.

4. Методи машинного навчання: Використання штучного інтелекту, глибокого навчання, а також машинного навчання, заснованого на даних.

Застосування комбінації різних методів також може бути корисним у процесі оцінювання загроз для критичної інфраструктури.

Враховуючи невизначеність, складність і різноманітність систем критичної інфраструктури, особливо актуальним є метод експертного оцінювання. Провідні наукові інститути, що спеціалізуються на питаннях енергетичної безпеки, також активно застосовують цей метод.

Переваги:

– Використання напрацювань: Фахівці здатні здійснювати оцінку небезпек з більшою точністю, спираючись на свій багатий досвід та глибокі знання.

– Поглиблений аналіз загроз: Експерти можуть ефективніше аналізувати складні, багатогранні загрози, які важко піддаються оцінці за допомогою автоматизованих систем.

Недоліки:

– Людський фактор: Експерти можуть припускатися помилок при оцінюванні небезпек, що може вплинути на достовірність результатів.

– Суб'єктивність: Експерти можуть бути під впливом конфлікту інтересів або мати обмежені знання та досвід у конкретній галузі.

Застосування експертного оцінювання загроз є доцільним сьогодні, з огляду на те, що:

1. Інформація, необхідна для аналізу та прийняття рішень, є неповна, частина даних відсутня.

2. Значна частина інформації має якісний, а не кількісний характер.

3. Складність поставленого завдання та обмежені ресурси не дозволяють зібрати та узагальнити всю необхідну інформацію.

4. Недостатність математичного інструментарію для оцінювання та оперування даними.

5. Обмежений розгляд кількох варіантів усунення ризиків через брак ресурсів та технічні складнощі.

6. Фактори різної природи, що вислизають з-під контролю прогнозування, але зумовлюють відчутний вплив на захищеність критичної інфраструктури.

Експертне оцінювання загроз для критичної інфраструктури полягає у встановленні їхнього рейтингу з огляду на рівень ризику (від можливих наслідків та кумулятивних руйнівних ефектів), щоб визначити найнебезпечніші та відрізнити ті, що спричинять незначні або прийнятні руйнівні наслідки. Основна мета такого пріоритезування – це ефективне застосування ресурсів для захисту об'єктів критичної інфраструктури, а також для усунення найбільш серйозних та ймовірних загроз.

Окремі загрози та їх кумулятивні руйнівні наслідки можуть мати незначний вплив при високій імовірності, або ж бути значними, але малоймовірними.

Експертна оцінка, що базується на якісному методі, передбачає встановлення рівня кожної визначеної загрози шляхом оцінювання сукупності наслідків та імовірності їхнього виникнення, з урахуванням їхньої значущості.

Для цілей даного аналізу зазвичай припускається, що кожна складова система, яка потенційно може постраждати від небезпеки h, взятої із переліку виявлених загроз $h = 1, \ldots, k$, демонструє найвищий рівень уразливості, що виражається у формулі:

$$\sum_{jj=1}^{mm} VV_{jj} LL_{jj} = 1, \qquad (1)$$

VV_{jj} – вразливість j зі списку вразливостей об'єкта управління $j = 1, \ldots, m$; LL_{jj} – ймовірність реалізації вразливості j.

Руйнівний наслідок реалізації загрози є

$$CC_{tt} = \sum_{ii=1}^{mm} CC_{ii} LL_{ii}. \quad (2)$$

CC_{ii} – негативний наслідок реалізації загрози з множини можливих наслідків $i = 1, \ldots, n$; LL_{ii} – ймовірність настання наслідку та реалізації загрози.

Зважаючи на вищесказане, процес розстановки пріоритетів для загроз Rt базується на спрощеній процедурі. Він передбачає порівняння добутків усереднених оцінок експертів щодо загальної ймовірності Lt та сукупних негативних наслідків Ct, які виникають у разі реалізації кожної загрози з наперед визначеного переліку, пронумерованого від $t = 1$ до k.

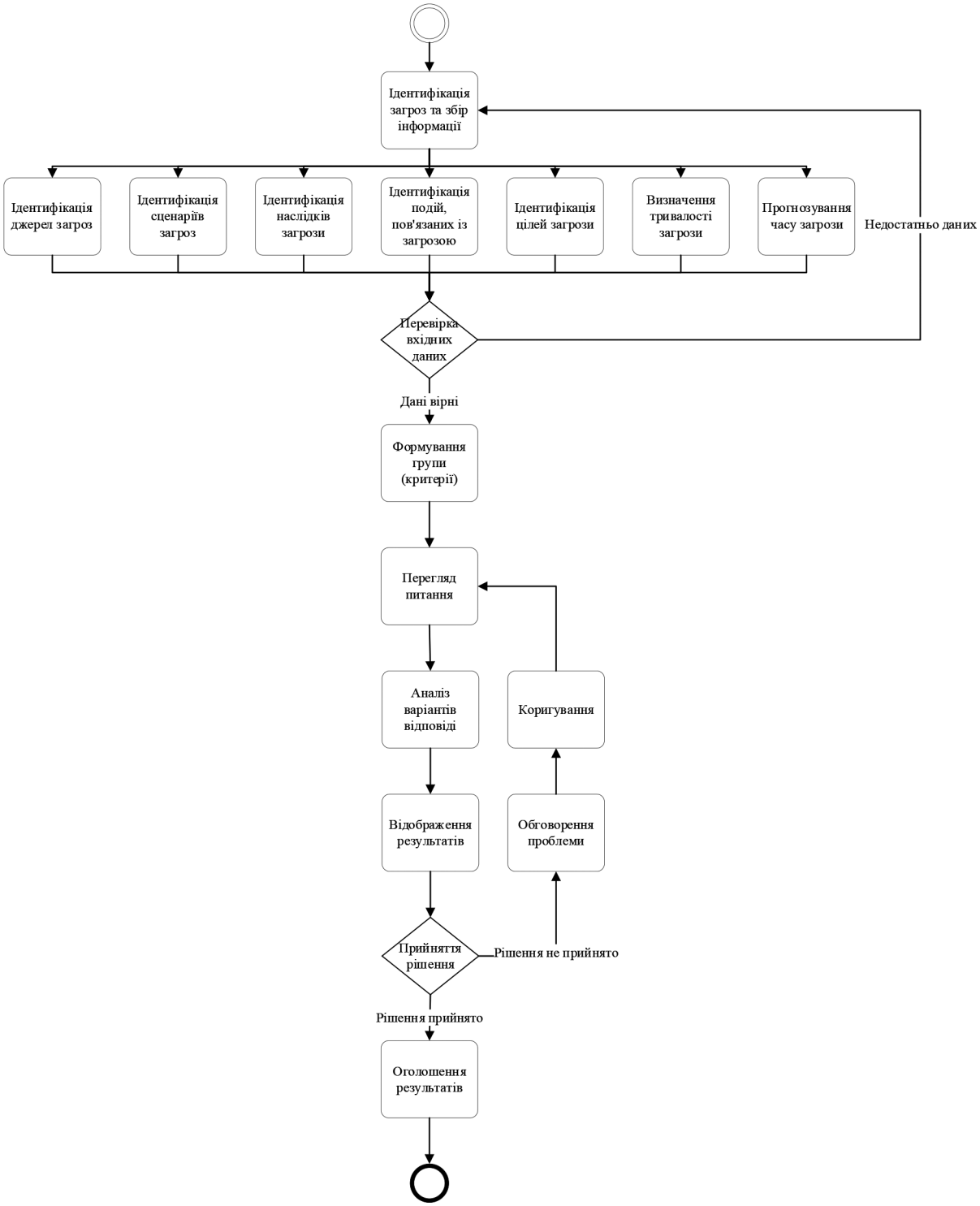


Рис. 1. Блок-схема виявлення загрози методом експертної оцінювання

$$RR_{tt} = LL_{tt}CC_{tt}. \quad (3)$$

Рекомендовано встановити такі дефініції шкали значущості та градації оцінювання значимості (у балах):

– для загальної ймовірності: «низька» (1), «відносно низька» (2), «середня» (3), «відносно висока» (4), «висока» (5);

– для сукупних негативних наслідків: «незначні» (1), «несуттєві» (2), «помірні» (3), «значні» (4), «катастрофічні» (5).

Схожі шкали застосовуються в матрицях впливу (Відносний Вплив) для оцінювання ризиків (Національна Оцінка Ризиків) у країнах-членах ЄС. Особлива увага приділяється загрозам, щодо яких спостерігається найбільший розкид експертних оцінок наслідків та/або ймовірностей (суперечливі оцінки). У таких випадках формулювання загрози та/або її опис потребують уточнення та/або додаткового роз'яснення координатором (модератором).

Загроза виключається з реєстру, якщо середньоарифметичне значення оцінки сукупних негативних наслідків або загальної ймовірності перевищує 2 бали. Для забезпечення об'єктивності, експерти не повинні мати доступу до відомостей про оцінки, зроблені іншими учасниками оцінювання.

Прикладом першочергового визначення важливості загроз для критичної інфраструктури може бути перелік, складений за допомогою методу Дельфі, до якого залучили 10 експертів.

Пріоритезація відбувалася згідно з рівнем небезпеки, що визначався як результат множення оцінок експертів сукупних негативних наслідків та загальної вірогідності втілення загрози. Виключення загрози зі списку відбувалося, якщо середнє арифметичне оцінок експертів наслідків та ймовірності було понад 2 бали. Оцінка небезпек, які постають перед критичною інфраструктурою, наведена у таблиці 1.

Підсумки оцінювання загроз критичної інфраструктури були отримані завдяки роботі програмного забезпечення, що діє за конкретним сценарієм. Спочатку визначаються рамки параметрів об'єкта дослідження. Після цього створюються вхідні дані, які детально описують кожну потенційну загрозу критичній інфраструктурі. Вони заносяться до реєстру, представляючи собою опис загрози разом з набором експертних оцінок. Далі зі списку вилучаються ті загрози, що мають мінімальний сукупний негативний вплив або характеризуються як малоймовірні, після чого відбувається ранжування загроз за значимістю їхніх наслідків та імовірності виникнення. Виходячи з отриманих даних, система формулює висновки, які дають можливість корегувати експертні оцінки, тобто формуються домінуючі висновки, а оцінки – зменшуються. Процес корекції реєстру, ранжування, формування висновків та уточнення

Таблиця 1

Оцінка загроз критичній інфраструктурі

№	Загроза критичній інфраструктурі	Рівень	Ймовірність	Наслідки
1	Ракетні та дронові удари	**20,5**	5	4,1
2	Втрата контрольованого споживання енергії	**17,6**	4,4	4
3	Кібератаки	**15**	5	3
4	Технічна несправність	**14,35**	4,1	3,5
5	Аварії на прилеглих об'єктах	**13,86**	3,3	4,2
6	Стихійні лиха	**13,2**	3	4,4
7	Терористичні атаки	**12,3**	3	4,1
8	Наявність резервування критичних об'єктів	**12,3**	3	4,1
9	Відсутність системи стратегічного планування та координації	**12**	3	4
10	Недостатнє енергопостачання	**10**	4	2,5
11	Відсутність запасів палива	**10**	2	5
12	Захист потенційно небезпечних об'єктів критичної інфраструктури	**10**	2	5
13	Зношення основних засобів, збільшення аварійності	**9**	3	3
14	Брак енергетичних резервів	**9**	2	4,5
15	Штучні стихійні лиха	**8,8**	2,2	4
16	Технічне перевантаження об'єктів	**8**	4	2
17	Нечітке розмежування повноважень та відповідальності	**6**	2	3
18	Втрата кваліфікованого технічного персоналу	**5**	1	5
19	Нездатність реагувати на кризу	**5**	1	5
20	Блокування необхідних поставок	**5**	1	5

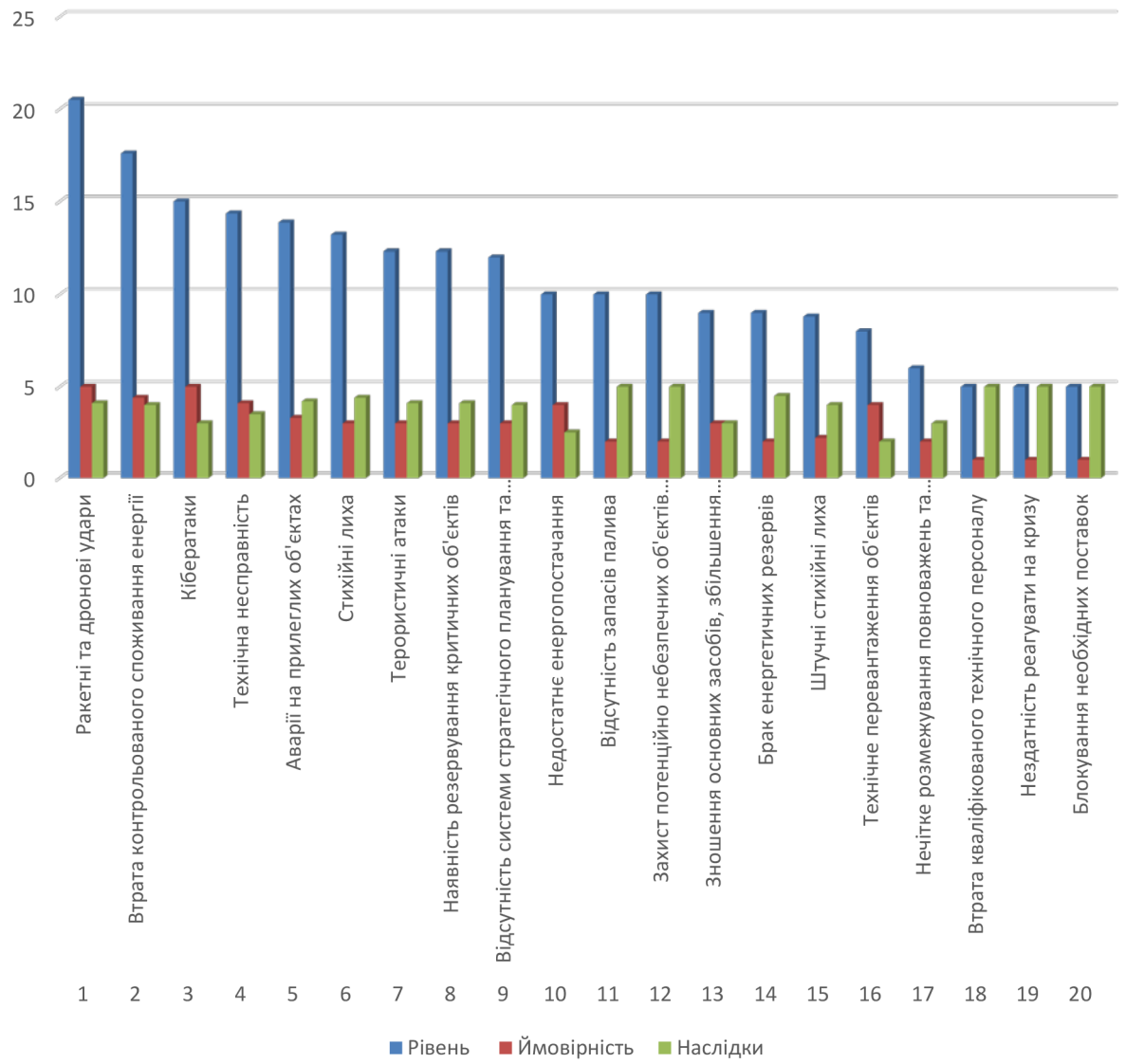


Рис. 1. Результати експертного оцінювання загроз критичній інфраструктурі

оцінок триває до досягнення одностайності думок між експертами щодо загроз, або до моменту, коли корекція оцінок припиняє змінювати пріоритетність. Після ухвалення остаточного рішення відбувається процедура оприлюднення результатів, що свідчить про завершення процесу оцінювання загроз методом експертного аналізу.

Результати аналізу загроз для критичної інфраструктури свідчать про таке.

Жодна з попередньо визначених загроз для енергетичної безпеки не отримала середнього арифметичного показника кумулятивних негативних наслідків чи загальної вірогідності нижче 2 балів. З цієї причини жодна з загроз не була виключена зі списку.

До п'ятірки найбільших викликів належать: атаки ракетами та безпілотниками, перебої з енергопостачанням, кібернетичні атаки, технічні збої та інциденти на суміжних підприємствах. Відповідно до зібраних даних, зосередження зусиль та ресурсів на протидії цим ризикам є найперспективнішим підходом для їхнього уникнення.

Висновки. Не варто перебільшувати значення отриманих результатів, або приписувати їм точність, більшу, ніж вимагають дані та використані підходи.

Отже, через застосування методу експертного оцінювання проведено практичний аналіз загроз для критичної інфраструктури з ранжуванням їх за важливістю. Це дозволяє спрямувати зусилля на найбільш серйозні загрози та мінімізувати можливі збитки для критично важливих об'єктів. Доведено, що використання експертних оцінок дає змогу здійснювати аналіз загроз у складних системах за умов невизначеності, що сприяє знаходженню оптимальних рішень для окреслених категорій. Ця робота буде корисною для експер-

тів з цивільного захисту, а також спеціалістів, що займаються профілактикою, локалізацією надзвичайних ситуацій та з'ясуванням їх причин на об'єктах критичної інфраструктури.

Список літератури:

1. Оцінювання загроз енергетичній безпеці / О. М. Суходоля та ін. Нац. ін-т стратег. дослідж., 2022. URL: https://doi.org/10.53679/niss-analytrep.2022.11

2. Risk assessment methodologies for critical infrastructure protection. Part II: A new approach. 2015. URL: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC96623/lbna27332enn.pdf

3. Качинський А. Б. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи. Київ, 2004. 472 с.

4. Novel methodologies for analysing critical infrastructure resilience / K. Storesund et al. Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World. 2018. P. 1221–1229. URL: https://doi.org/10.1201/9781351174664-154

5. Моделювання загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури з використанням методу системної динаміки / А. І. Невольніченко та ін. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2022. № 3. С. 88–99. URL: https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.3.10

6. Шаповалова О. О., Бурменський Р. В. Розробка програмного додатка для реалізації методу аналізу ієрархій. Системи обробки інформації. 2017. № 3(149). С. 45–48. URL: https://doi.org/10.30748/soi.2017.149.09

7. Куртсеітов Т., Мурасов Р., Мельник Я. Імовірнісний метод прогнозування надзвичайних подій на потенційно-небезпечних об'єктах критичної інфраструктури. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2022. Т. 44, № 2. С. 60–63. URL: https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-44-2-60-63

8. Маршалл В. Основные опасности химических производств. М., 1989. 671 с.

9. Yaqoob L., Khan N. A., Subhan F. An overview of existing decision support systems for disasters management. Science International. 2014. URL: https://surl.li/klkmbz

10. Popov A. Architecture of regional environmental monitoring. Scientific-practical conference dedicated to World Meteorological Day «At the Frontline of Climate Action» and World Water Day "Water for a Peaceful and Sustainable Future". 2024. P. 211–212. URL: https://doi.org/10.15407/conf_uhmi_cgo_2024.073

11. Peancovschii S. Information support of the decision-making system in emergency situations. 2023. URL: https://surl.li/vwkjab

12. Wang W.-C. A Multi-Function Disaster Decision Support System Based on Multi-Source Dynamic Data. Environment and Natural Resources Research. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 1. URL: https://doi.org/10.5539/enrr.v10n1p1

13. Decision support system for post-disaster resilience. Issues In Information Systems. 2024. URL: https://doi.org/10.48009/2_iis_2024_117.

Savchenko I. O., Matsko P. I. A SYSTEMATIC APPROACH TO SUPPORTING DECISION-MAKING ON THREATS TO THE CRITICAL INFRASTRUCTURE USING EXPERT ASSESSMENT METHODS

This work addresses the problem of assessing threats to critical infrastructure during wartime and their impact on national security. The importance of decision-making under uncertainty is emphasized as a key aspect of risk management for critical infrastructure.

The authors have also analyzed previously published scientific materials related to the application of various expert methods for evaluating hazards and potential negative consequences of emergency situations that may arise at critical infrastructure facilities in Ukraine during the ongoing armed aggression by the Russian Federation.

For analytical assessment of potential hazards to critical infrastructure in the context of the ongoing Russian-Ukrainian war, the perspective of applying expert evaluation methods is considered. Necessary recommendations and conclusions regarding their effectiveness and feasibility in this case are formulated. Using custom software developed by the authors in Python, practical calculations were performed, supported by scientific justification of conclusions regarding potential threats. This program implemented a decision-support procedure for determining the priority of threats to critical infrastructure objects, considering the degree of risk, probability, and potential damage from damage.

Based on the data obtained from the operation of the software, it becomes clear that the use of expert evaluation methods provides the opportunity to study risks to critical infrastructure under conditions of a priori uncertainty, taking into account the probabilistic nature of military actions and the stochasticity of missile-drone attacks.

The program allows creating a ranked list of potential threats, conducting a procedure for filtering out threats that are not of primary importance. This is done to effectively allocate limited forces and resources to reduce the likely negative impact of emergency situations of natural, technological, and military-technological nature.

Key words: *critical infrastructure, threats, missile-drone strikes, expert assessment, Python, evaluation procedure, risk minimization, emergency situations, civil defense.*

УДК 005.8:331.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/28

Федорович В. І.
Західноукраїнський національний університет

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ВІЗУАЛЬНИХ АНОМАЛІЙ У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Виявлення аномалій є важливою характеристикою штучного інтелекту в автоматизованому тестуванні. Штучний інтелект, зокрема методи машинного навчання та нейронних мереж, достатньо широко використовуються для автоматизації процесу тестування та покращення ефективності виявлення помилок. Наприклад, інтелектуальні алгоритми можуть застосовуватись для визначення оптимальних шляхів проведення тестування програми, а також для прогнозування можливих проблеми в роботі програми, що дозволяє зменшити кількість помилок та скоротити час, необхідний для тестування програмного забезпечення. У цьому контексті дослідження методів штучного інтелекту для виявлення візуальних аномалій у програмному забезпеченні може допомогти у пошуку можливих шляхів покращення якості тестування. Інструменти штучного інтелекту використовують алгоритми машинного навчання для виявлення аномалій та патернів, які можуть бути непоміченими вручну або стандартними методами тестування. Раннє виявлення проблеми забезпечує більш ефективну обробку. Виявлення аномалій може служити індикатором можливих виробничих проблем або ситуацій, які можуть виникнути в життєвому циклі програмного забезпечення. Тому важливим є методи підвищення точності виявлення візуальних аномалій. У цій статті досліджуються методи побудови та навчання нейронних мереж з використанням глибокого навчання та технологій комп'ютерного зору для розпізнавання зображень. Розглядаються теоретичні основи глибокого навчання та комп'ютерного зору, проводиться аналіз існуючих підходів та архітектур нейронних мереж, застосовуваних у цій галузі. Описується методологія підготовки даних, вибору архітектури мережі та навчання моделі. Наведено результати практичної реалізації, включаючи аналіз точності та ефективності розробленої моделі. Проводиться порівняльний аналіз двох підходів до вирішення задачі розпізнавання зображень: детектування з використанням моделі YOLOv8 та семантичної сегментації із застосуванням архітектури U-Net. Наприкінці обговорюються висновки та перспективи подальших досліджень у галузі розпізнавання зображень.

Ключові слова: *алгоритми машинного навчання, візуальні елементи, виявлення аномалій, штучний інтелект, нейромережі, збої рендерингу.*

Постановка проблеми. Використання алгоритмів штучного інтелекту (ШІ), таких як машинне навчання та обробка природної мови, відкриває потенціал для підвищення точності та ефективності перевірки інформації у програмному забезпечені. Один із підходів до проблеми перевірки тверджень заснований на використанні нейронних мереж, зокрема рекурентних нейронних мереж (Recurrent neural networks (далі – RNNs)). RNNs є потужним інструментом для аналізу послідовностей даних і дозволяє виявляти помилкові. Дослідження [1], показало, що RNNs ефективні у виявленні візуальних аномалій.

Нейронні мережі можуть бути використані для автоматичного виявлення візуальних аномалій. Згорткові нейронні мережі (CNNs). CNNs − це один із видів нейронних мереж, які успішно використовуються для обробки тексту. Вони зазвичай використовуються для аналізу коротких текстів, таких як твіти. Їх особливістю є здатність виявлення патернів та взаємозв'язків між словами в тексті, що робить їх ефективними у виявленні хибної інформації у коротких текстах. Рекурентні нейронні мережі (RNN). RNNs − це інший вид нейронних мереж, призначених для обробки послідовних даних, як-от текст. Вони краще справляються з довшими текстами, такими як статті новини, завдяки здатності «розуміти» контекст і залежності між словами та пропозиціями.

RNNs дозволяє автоматично аналізувати текстові дані та їх ідентифікувати. Інший підхід полягає у використанні методів, що базуються на знаннях. Ці методи використовують великі бази знань, такі як Всесвітня павутина, для підтримки процесу перевірки [2]. Бази знань містять інформацію, яка може бути використана для зіставлення та перевірки фактів та тверджень. Візуальне тестування може допомогти виявити такі

проблеми, як несправність у відображенні графіки елементів, несумісність з різними дозволами екрану, некоректне відображення на різних пристроях, і т. д. Враховуючи швидкі темпи розвитку технологій, важливо постійно вдосконалювати візуальні методи та засоби тестування для забезпечення якості програмного забезпечення та задоволеності користувачів, що робить розпізнавання візуальних дефектів дуже важливим аспектом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки дослідження в галузі глибокого навчання та комп'ютерного зору значно просунулися завдяки роботам провідних вчених та розробників. У 2012 році команда під керівництвом Алекса [3] представила модель AlexNet, яка досягла вражаючих результатів на змаганні ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) і започаткувала широку застосовність згорткових нейронних мереж (CNN) для розпізнавання зображень. Згодом з'явилися більш складні та ефективні архітектури, як VGG [4], ResNet [5], Inception [6] та EfficientNet [7], кожна з яких вносила свій внесок у підвищення точності та продуктивності моделей.

Гібридні методики розпізнавання аномалій, дозволяють поєднувати переваги різних підходів. При цьому різні техніки можуть застосовуватись як послідовно, так і паралельно для досягнення усереднених результатів. Прикладами гібридних систем розпізнавання аномалій можуть бути такі дослідження:

- Поєднання кластеризації та алгоритму найближчого сусіда у роботі [8].
- Паралельне використання суміщених алгоритмів Байєсових мереж та вирішальних дерев, а також алгоритму найближчого сусіда з класифікацією на основі правил у роботі [9].
- Поєднання методу опорних векторів та нейронної мережі глибинного навчання у роботі [10].

На основі аналізу літературних джерел, можна зробити такі висновки:

− для детектування мережевих аномалій використовуються як алгоритми машинного навчання (Decision Trees, Support Vector Machines, Nearest Neighbor Search, Random Forest, Logistic Regression, KNN, Adaptive Boosting), так і технології глибокого навчання (Convolutional Neural Network, Recurrent Neural Networks, Long Short-term Memory) [11–15];

− відкритими наборами даних, які найчастіше використовуються для навчання та тестування систем виявлення мережевих аномалій є CTU [16], NSL-KDD [17], UNSW-NB15B [18], CSE-CIC IDS-2018, bot-IoT [19].

Джерелами даних для створення датасетів для мережевих IDS-систем є пакети (парсинг пакетів, аналіз корисного навантаження), logфайли журналу з урахуванням вікон сеансу [20]. У потокових IDS (рис. 1) замість перегляду всіх пакетів, що проходять через мережеве з'єднання, збирається агрегована інформацію про пов'язані пакети мережного трафіку у вигляді потоку, до аналізу якого застосовуються методи вилучення візуальних аномалій з нейронних мереж глибокого навчання.

Кожен потік містить агреговану інформацію про кількість переданих пакетів та байтів, IP-адреси та порти джерела та призначення, тимчасові мітки, прапори TCP, мережні маски та інші параметри. У ході експерименту [22] було зібрано навчальні вибірки з набору даних CTU для 5 сценаріїв ботнет атак на програмне забезпечення. На першому етапі для отримання ознак аномальних та нормальних станів мережі використана згорткова нейронна мережа, реалізована в вигляді Python-додатки для інтерактивних обчислень (файл формату ipynb), містять вихідний код, вхідні дані, результати обчислень у числовому та

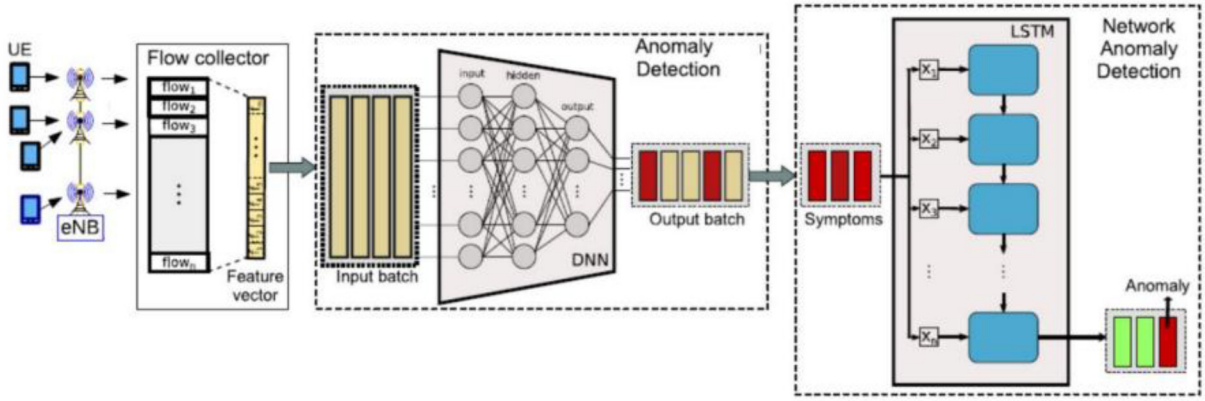


Рис. 1. Потокова IDS-система, адаптована для стільникових мереж [21]

графічне представлення. На другому етапі розпізнавання мережевих аномалій реалізовано з використанням алгоритмів машинного навчання.

Сучасні веб-системи для виявлення аномалій стали важливим інструментом у багатьох сферах, де необхідно обробляти великі обсяги даних в реальному часі. Веб-системи дозволяють користувачам швидко інтегрувати алгоритми машинного навчання, такі як Isolation Forest, LOF та DBSCAN, у свої робочі процеси без необхідності глибоких знань у програмуванні. У останні роки активно розвиваються методи, що використовують глибинне навчання для виявлення аномалій. Сучасні дослідження орієнтовані на вдосконалення традиційних алгоритмів, таких як Isolation Forest або Local Outlier Factor (LOF), оскільки вони мають обмеження у роботі з великими, складними та багатовимірними наборами даних. Крім того багато нових робіт орієнтуються на використання нейронних мереж, зокрема автокодерів (autoencoders), для виявлення аномалій, що дозволяє значно покращити точність виявлення.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз методів підвищення точності розпізнавання візуальних дефектів у ПЗ за допомогою ШІ

Виклад основного матеріалу.

З огляду літератури можна виділити основні типи моделей:

- Convolutional Neural Networks (CNN) для обробки зображень.
- Autoencoders та Variational Autoencoders (VAE) для виявлення аномалій.
- Generative Adversarial Networks (GANs) для синтезу еталонних зображень та оцінки аномалій.
- Vision Transformers (ViT) для точного аналізу структурованих візуальних даних.

У дослідженні використовувалася нейронна мережа (CNN), заснована на архітектурі, запропонованій у роботі LeNet-5, та подальших модифікаціях. CNN є потужним інструментом для аналізу зображень (рис. 2), дозволяючи ефективно отримувати та узагальнювати ознаки із вхідних даних. Архітектура CNN включає кілька згорткових шарів з функціями активації ReLU, шари об'єднання (pooling), повнозв'язкові шари та шари класифікації softmax.

Як матеріали для навчання та тестування моделі використовували набір даних MNIST, що складається з 60 000 тренувальних зображень рукописних цифр та 10 000 тестових зображень. Зображення представлені чорно-білими розмірами 28 × 28 пікселів.

1. Завантаження даних: Набір даних MNIST був завантажений за допомогою бібліотеки TensorFlow.
2. Передобробка даних: Зображення були нормалізовані (наведені до діапазону [0,1]) та змінені на розмір 28 × 28 пікселів для відповідності вхідним даним моделі.
3. Створення моделі: Була побудована згорткова нейронна мережа з використанням бібліотеки TensorFlow та її високорівневого API Keras. Модель включає згорткові шари, шари об'єднання, повнозв'язкові шари та шар класифікації softmax.
4. Компіляція моделі: Модель була скомпільована з використанням оптимізатора Adam та функції втрат категоріальної крос-ентропії.
5. Навчання моделі: Модель була навчена на тренувальних даних протягом 5 епох з розміром пакета 64.
6. Оцінка моделі: Продуктивність моделі була оцінена на тестових даних шляхом обчислення точності класифікації.

Цей порядок дій забезпечує побудову, навчання та оцінку моделі для завдання розпізнавання візуальних аномалій на наборі даних MNIST. Приклад коду на Python, який створює та навчає нейронну мережу для розпізнавання візуальних аномалій із набору даних MNIST, використовуючи бібліотеку TensorFlow:

```python
import tensorflow as tf
від tensorflow.keras import layers, models
```

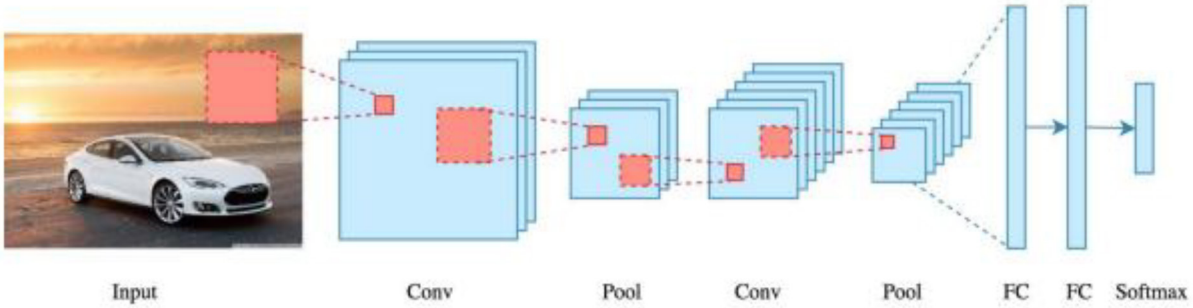


Рис. 2. Архітектура CNN

```
from tensorflow.keras.datasets import mnist
# Завантаження даних
(train_images, train_labels), (test_images,
test_labels) = mnist.load_data()
# Передобробка даних
train_images = train_images.reshape((60000,
28, 28, 1))
train_images = train_images.
astype('float32') / 255
test_images = test_images.reshape((10000,
28, 28, 1))
test_images = test_images.
astype('float32') / 255
# Перетворення тегів у категоріальний формат
train_labels = tf.keras.utils.to_
categorical(train_labels)
test_labels = tf.keras.utils.to_
categorical(test_labels)
# Створення моделі нейронної мережі
model = models.Sequential([
layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu',
input_shape=(28, 28, 1)),
layers.MaxPooling2D((2, 2)),
layers.Conv2D(64, (3, 3),
activation='relu'),
layers.MaxPooling2D((2, 2)),
layers.Conv2D(64, (3, 3),
activation='relu'),
layers.Flatten(),
layers.Dense(64, activation='relu'),
layers.Dense(10, activation='softmax')
])
# Компіляція моделі
model.compile(optimizer='adam',
loss = 'categorical_crossentropy',
metrics=['accuracy'])
# Навчання моделі
model.fit(train_images, train_labels,
epochs=5, batch_size=64, validation_
split=0.2)
# Оцінка моделі на тестових даних
test_loss, test_acc = model.evaluate(test_
images, test_labels)
print('Test accuracy:', test_acc)
```

Одним із обмежень даного дослідження є використання тільки одного набору даних MNIST. Хоча MNIST є стандартним набором даних для навчання моделей розпізнавання аномалій, його відносна простота та невеликий розмір можуть не повністю відбивати складності реальних завдань. Для більш повного розуміння продуктивності моделі та її застосовності до реальних сценаріїв необхідно провести експерименти більш різноманітних і складних наборах даних. Також варто зазначити, що, можливо, існують більш сучасні архітектури нейронних мереж, які можуть демонструвати ще вищі результати під час вирішення цієї задачі.

У цій роботі було успішно описано нейронну мережу (CNN) для розпізнавання візуальних аномалій із набору даних MNIST. Досягнута точність моделі на тестовому наборі даних склала 99.1 %, що свідчить про високу продуктивність і надійність запропонованого підходу. Представимо основні методи виявлення аномалій.

1. *Статистичні випробування*. Як правило, їх застосовують для окремих ознак і виділяють екстремальні значення (Extreme-Value Analysis). Для цього використовують, наприклад, *Z*-value [23]:

$$Z_i = \frac{x_i - \mu}{\delta}.$$

2. *Модельні тести*. Ідея дуже проста: будуємо модель, яка описує дані; точки, які сильно відхиляються від моделі (на яких модель сильно помиляється), і є аномалії. При виборі моделі можна врахувати природу завдання, функціонал якості тощо. Наприклад, у досліджуваному завданні можна прогнозувати значення тимчасових рядів з допомогою LSTM-нейронної мережі [24]. Якщо реальні значення сильно відрізняються від передбачуваних, то це свідчить про аномальну поведінку.

3. *Ітераційні методи*. Можна послідовно видаляти групи «особливо підозрілих об'єктів». Наприклад, у n-мірному ознаковому просторі можна видаляти опуклу оболонку точок-об'єктів. Як правило, методи цієї групи досить трудомісткі.

4. *Методи машинного навчання*. Завдання виявлення аномалій розглядають також як окреме завдання навчання без вчителя (unsupervised learning).

5. *Ансамблі алгоритмів*. Як і в багатьох інших областях машинного навчання, при пошуку аномалій часто використовують кілька алгоритмів зазвичай різної природи.

Методи, які вирішують проблему виявлення аномалій у багатовимірних і багатовимірних даних, підсумовані в таблиці 1. Кожен метод має переваги та недоліки, коли потрібно виправляти різні проблеми залежно від характеру даних [25].

Сучасні моделі глибокого навчання, такі як YOLOv8 [26] та U-Net [27], зарекомендували себе як потужні інструменти у завданнях класифікації, детектування та сегментації зображень.

YOLOV8 (You Only Look Once) є однією з передових архітектур для детектування об'єктів,

Таблиця 1

Порівняння продуктивності алгоритмів виявлення аномалій [25]

Алгоритм	Переваги	Недоліки
PCA	широко використовується завдяки простоті та ефективності	з великою розмірністю оцінка зазвичай складна; наявність аномалії може вплинути на продуктивність PCA
DOBIN	дозволяє виявити аномалію за допомогою меншої кількості компонентів	Чутливий
ROBEM	для виявлення аномалії використовується критичне значення; таким чином, це призводить до успішної продуктивності щодо виявлення аномалій	найповільніший алгоритм
DAE-KNN	знижує обчислювальні витрати та покращує ефективність виявлення порівняно з одним детектором аномалій	побудова DAE займає багато часу, якщо набір даних великий

забезпечує високу продуктивність та точність. U-Net, у свою чергу, є класичною архітектурою для семантичної сегментації, яка демонструє чудові результати під час аналізу складних візуальних даних (рис. 3).

Для нашого проекту було обрано енкодер Res-Net-18, це версія енкодера з 18 шарами яка добре підходить для отримання ознак із зображення. Архітектура мережі U-Net з енкодером Res-Net-18 представлена на рис. 4.

Як початкові ваги для енкодера отримані на наборі даних ImageNet. Це дозволить прискорити навчання та підвищити продуктивність моделі.

Як функція активації для вихідного шару «softmax2d», яка застосовується до двовимірних даних та активно використовується у завданнях сегментації. Ця функція перетворює вихідні значення нейронної мережі у ймовірності для кожного класу, що дозволяє інтерпретувати результати як ймовірність приналежності кожного пікселя до певного класу, У контексті завдання сегментації це дозволить моделі передбачати, до якого класу належить кожен піксель зображення.

Для двовимірного масиву Z розміром $H \times W \times C$ (де H – висота, W – ширина, C – кількість класів), функція втрат «softmax2d» визначаться як:

$$softmax(Z_{i,j,k}) = \frac{e^{z_{i,j,k}}}{\sum_{c=1}^{c} e^{z_{i,j,c}}},$$

де $e^{z_{i,j,k}}$ – логіт (не нормалізоване передбачення) для пікселя (i, j) та класу k. Сума у знаменнику

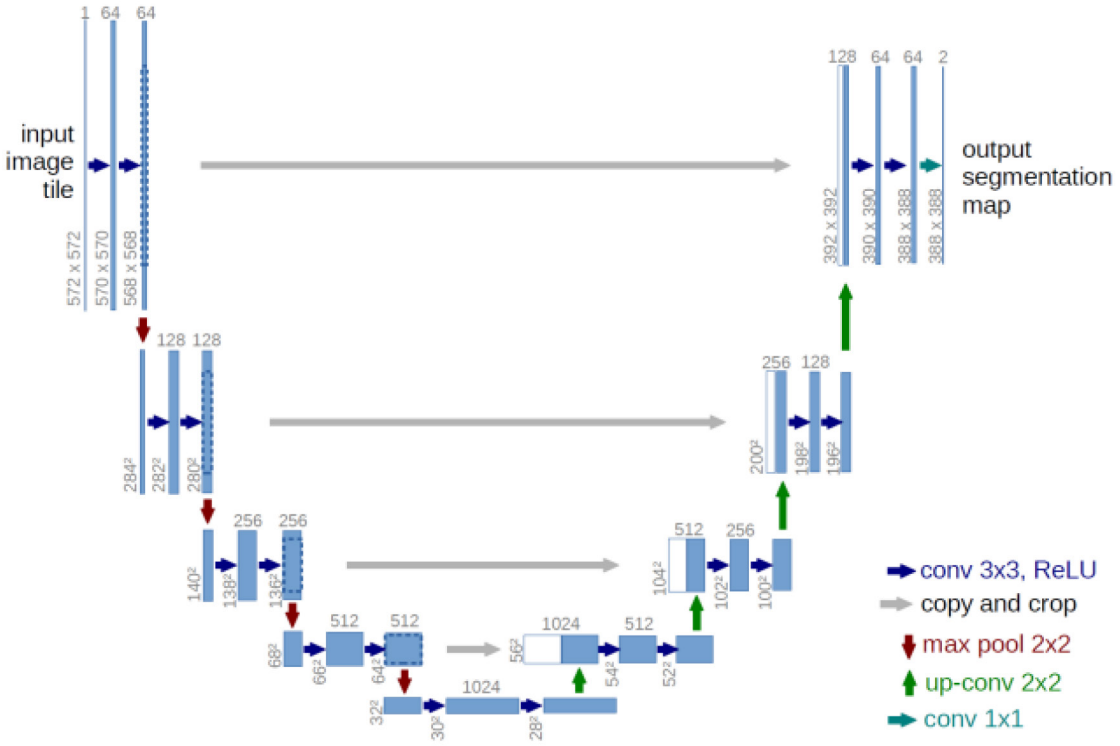


Рис. 3. Архітектура U-Net [27]

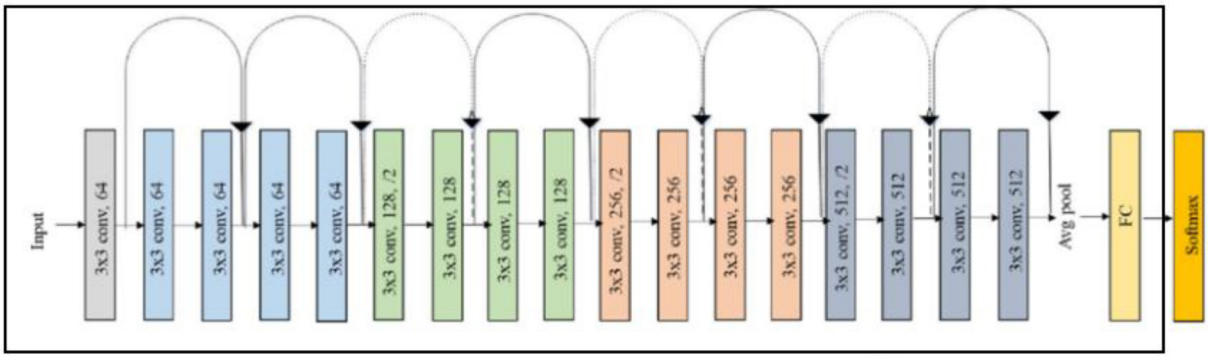


Рис. 4. Архитектура Res-Net-18

береться за всім класам c для кожного пікселя (i, j).

Для відстеження ефективності навчання та роботи мережі U-Net використовуються такі метрики:

1. F1-score.
2. IoU.

Дані метрики активно застосовують при задачах сегментації. Розглянемо кожну метрику докладніше. F1-score – це гармонійне середнє між точністю (precision) та повнотою (recall). Ця метрика особливо корисна у завданнях, де важливо враховувати як хибнопозитивні, так і хибнонегативні результати, наприклад, у задачах класифікації з дисбалансу класів. Ця метрика визначається як:

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

$$Precision = \frac{TR}{TR + FP} \quad Recall = \frac{TR}{TR + FN},$$

де TP – кількість істинно позитивних прогнозів (True Positives), FP – кількість хибнопозитивних (False Positives), FN – кількість хибнонегативних передбачень (False negatives).

$F1$-score приймає значення від 0 до 1, де означає 1 ідеальна відповідність (максимальна точність та повнота), а 0 – відсутність відповідності. IoU – коефіцієнт перетину та об'єднання, який показує, як перетин між передбачуваною областю та істинною областю відноситься до їхнього об'єднання. Обчислюється за такою формулою:

$$IoU = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|},$$

де A – область, передбачена моделлю, B – істинна область

Метрика IoU лежить у діапазоні [0, 1] і чим більше її значення, тим сильніше збігаються передбачена і справжня маска.

Проведення дослідження на двох нейронних мережах відмінних по архітектурі та підході до навчання дозволило зробити висновок, що YOLOv8 має ряд переваг: зручність використання, відсутність необхідності в детальному налаштуванні шарів, низький поріг входження. Що стосується U-Net, вона має великий потенціал: детальне налаштування як архітектури так і параметрів. Не можна не відзначити при цьому, що поріг входження набагато вищий, потрібно більш детальна робота із даними.

Висновки.

1. Ефективність архітектури CNN: Використання кількох згорткових шарів дозволяє ефективно витягувати та узагальнювати ознаки зображень, що призводить до високої точності розпізнавання.

2. Значення передобробки даних: Нормалізація зображень та збільшення даних (аугментація) відіграє важливу роль у покращенні якості вхідних даних та сприяє кращому навчанню моделі.

3. Оптимізація гіперпараметрів: Правильний вибір гіперпараметрів, таких як розмір кроку навчання, кількість шарів та фільтрів, використання методів регуляризації, дозволяє досягти кращих результатів.

4. Як модель для детекції була обрана YOLOV8, для семантичної сегментації – U-Net. Для кожної з моделей були розглянуті: архітектура, параметри, процес навчання, тип даних та формат анотацій

Хоча досягнуті результати є значними, існує кілька напрямів для подальших досліджень та покращень.

1. Застосування до складніших наборів даних: У майбутньому доцільно протестувати та адаптувати модель для роботи з більш складними та різноманітними наборами даних, такими як CIFAR-10, CIFAR-100 та ImageNet, щоб оцінити її узагальнюючу здатність.

2. Поліпшення архітектури: Дослідження більш сучасних та складних архітектур CNN, таких як ResNet, DenseNet та EfficientNet, може призвести до подальшого підвищення точності та ефективності.

3. Автоматизація підбору гіперпараметрів: Використання методів автоматизованого підбору гіперпараметрів (AutoML) та байєсівської оптимізації може прискорити процес налаштування моделі та привести до покращення її продуктивності.

4. Застосування методів ансамблювання: Об'єднання кількох моделей в ансамбль може підвищити точність та стійкість рішення, особливо в умовах різноманітних і зашумлених даних.

5. Оптимізація обчислювальних витрат: Дослідження методів зменшення обчислювальних витрат та прискорення навчання, таких як розподілене навчання та використання спеціалізованих апаратних рішень (наприклад, TPU), може зробити глибоке навчання більш доступним та ефективним. Таким чином, це дослідження підтверджує ефективність використання глибокого навчання та технологій комп'ютерного зору для розпізнавання зображень.

Список літератури:

1. Smith, J., Johnson, A. Leveraging Artificial Intelligence and Machine Learning for Network Anomaly Detection: A Comprehensive Review. Journal of Cybersecurity Advances, 2023, 5(2), 123–145.

2. An enhanced AI-based network intrusion detection system using generative adversarial networks. Park, C., Lee, J., Kim, Y., et al. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 10(3), 2330–2345.

3. Alexe, B., Deselares, T., Ferrari, V. Measuring the objectness of image windows. In PAMI, 2012.

4. Simonyan, K., Zisserman, A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. arXiv 2014, arXiv:1409.1556.

5. He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. Deep residual learning for image recognition. In: CVPR, 2016.

6. Christian Szegedy, Wei Liu, Yangqing Jia, Pierre Sermanet, Scott Reed, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Vincent Vanhoucke, and Andrew Rabinovich. Going deeper with convolutions. In CVPR, pages 1–9, 2015.

7. Tan, M., Chen, B., Pang, R., Vasudevan, V., Sandler, M., Howard, A., and Le, Q. V. MnasNet: Platform-aware neural architecture search for mobile. CVPR, 2019.

8. Lin, W-C. Ke, S-W. Tsai, C-F. "An intrusion detection system based on combining cluster centers and nearest neighbors", KnowledgeBased Systems, 2015, vol. 78, pp. 13–21.

9. Pinto, S. J., Siano, P., Parente, M. Review of cybersecurity analysis in smart distribution systems and future directions for using unsupervised learning methods for cyber detection. Energies, 2023, 16(4), 1651.

10. Tange K., De Donno M., Fafoutis X. Dragoni N. A Systematic Survey of Industrial Internet of Things Security: Requirements and Fog Computing Opportunities. EEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, V. 22(4), 2489–2520.

11. Kilincer I. F., Ertam F., Sengur A. Machine learning methods for cyber security intrusion detection: Datasets and comparative study. Computer Networks, 2021, V. 188, P. 107840.

12. Kumar R. SP2F: A secured privacy-preserving framework for smart agricultural Unmanned Aerial Vehicles. Computer Networks, 2021, V. 187, P. 107819.

13. Van Eck, N.; Waltman, L. Manual for VOS Viewer Version 1.6.10, CWTS, Universiteit Leiden, Leiden, Holland, 2019.

14. Pang, G., Shen, C., Cao, L., Hengel, A.V.D. Deep learning for anomaly detection: A review. ACM computing surveys (CSUR), 2021, 54(2), 1–38.

15. CNN features with bi-directional LSTM for real-time anomaly detection in surveillance networks. Ullah, W., Ullah, A., Haq, I. U. et. al. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(11), 16979–16995.

16. Komar, M., Fedorovych, V., Poidych, V., Taborovskyi, A. Intelligent System For Visual Testing Of Software Products. The First International Workshop of Young Scientists on Artificial Intelligence for Sustainable Development; May 10–11, 2024, Ternopil, Ukraine, 2024.

17. NSL-KDD99 Dataset. 2009. Available online: https://www.unb.ca/cic/datasets/nsl.html (accessed on 06 March 2025).

18. Komar, M., Kochan, V., Dubchak, L., Sachenko, A., Golovko, V., Bezobrazov, S., Romanets, I. High performance adaptive system for cyber attacks detection. Proceedings of the 2017 IEEE 9th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS 2017, 2017, 2, pp. 853–858.

19. Jing Ma, Wei Gao, Prasenjit Mitra, Sejeong Kwon, Bernard J. Jansen, Kam-Fai Wong, and Meeyoung Cha. Detecting rumors from microblogs with recurrent neural networks. In Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'16). AAAI Press, 2016, 3818–3824.

20. A detection method for anomaly flow in software-defined networks. Peng, H., Sun, Z., Zhao, X., et. al. IEEE Access, 2018, 6, 27809–27817.

21. Wang, C., Wang, B., Liu, H., Qu, H. Anomaly detection for industrial control system based on autoencoder neural network. Wireless Communications and Mobile Computing, 2020, 1, 8897926.

22. Verbal and Nonverbal Clues for Real-life Deception. Pérez-Rosas, V., Abouelenien, M., Mihalcea, R. Detection, 2015, 2336–2346. https://doi.org/10.18653/v1/D15-1281

23. Artificial intelligence based anomaly detection of energy consumption in buildings: A review, current trends, and new perspectives. Himeur, Y., Ghanem, K., Alsalemi, A., at. al. Applied Energy, 2021, 287, 116601.

24. Deep learning-enabled anomaly detection for IoT systems. Abusitta, A., de Carvalho, G. H. S., Wahab, O. A., at. al. Internet of Things, 21, 100656.

25. Kim, J., Lee, H., Park, J. AI-based anomaly detection over encrypted traffic: A systematic review. Scientific Reports, 2023, 13(1), 12345.

26. "YOLOv8 Models Documentation", available at: https://github.com/ultralytics/ultralytics/blob/main/docs/en/models/yo lov8.md (Accessed: 02.03.2025).

27. "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation", available at: https://lmb.informatik.unifreiburg.de/people/ronneber/u-net/ (Accessed: 02.03.2025).

Fedorovych V. I. METHODS FOR IMPROVING THE ACCURACY OF DETECTING VISUAL ANOMALIES IN SOFTWARE BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Anomaly detection is an important feature of artificial intelligence in automated testing. Artificial intelligence, in particular machine learning and neural network methods, are widely used to automate the testing process and improve the efficiency of error detection. For example, intelligent algorithms can be used to determine the optimal ways to conduct program testing, as well as to predict possible problems in the operation of the program, which allows to reduce the number of errors and reduce the time required for software testing. In this context, research into artificial intelligence methods for detecting visual anomalies in software can help in finding possible ways to improve the quality of testing. Artificial intelligence tools use machine learning algorithms to detect anomalies and patterns that may be unnoticed by manual or standard testing methods. Detect problems early and provide more efficient processing. Anomaly detection can serve as an indicator of possible production problems or situations that may arise in the software life cycle. Therefore, methods to improve the accuracy of visual anomaly detection are important. This article explores methods for building and training neural networks using deep learning and computer vision technologies for image recognition. The theoretical foundations of deep learning and computer vision are considered, and existing approaches and architectures of neural networks used in this field are analyzed. The methodology for data preparation, network architecture selection, and model training is described. The results of practical implementation are presented, including an analysis of the accuracy and efficiency of the developed model. A comparative analysis of two approaches to solving the image recognition problem is conducted: detection using the YOLOv8 model and semantic segmentation using the U-Net architecture. Finally, conclusions and prospects for further research in the field of image recognition are discussed.

Key words: *machine learning algorithms, visual elements, anomaly detection, artificial intelligence, neural networks, rendering glitches.*

УДК 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/29

Цяпа С. М.
Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

ІНТЕГРАЦІЯ СЕНСОРНИХ ДАНИХ В A-UGV СИСТЕМАХ

У статті досліджується проблема інтеграції різноманітних сенсорних систем, які використовуються у сучасних автономних наземних безпілотних транспортних засобах (A-UGV), з метою підвищення рівня безпеки їх експлуатації в умовах складних погодних явищ, а також забезпечення ефективної взаємодії з динамічним середовищем, включаючи пішоходів та інші транспортні засоби. Враховуючи значну архітектурну диференціацію систем A-UGV, всі ці платформи являють собою високотехнологічні комплекси з великою кількістю взаємопов'язаних компонентів. Архітектура таких систем може бути розглянута у двох основних аспектах: технічному та функціональному. З технічної точки зору система A-UGV об'єднує апаратне забезпечення, яке включає обчислювальні модулі, сенсорні масиви та виконавчі механізми, а також програмні засоби, що складаються з алгоритмів обробки сенсорних даних, моделей прийняття рішень і систем керування. Функціональна архітектура визначає принципи послідовної обробки даних, починаючи від збору інформації про навколишнє середовище до прийняття керуючих рішень у режимі реального часу. Інтеграція сенсорних даних є критично важливим фактором, що безпосередньо впливає на експлуатаційну ефективність A-UGV. Сучасні безпілотні платформи оснащуються різними типами сенсорів, такими як LiDAR, радарні системи, відеокамери, тепловізійні сенсори, ультразвукові сенсори та GNSS-приймачі. Аналіз наукової літератури засвідчує, що інтеграція сенсорних даних є складним завданням через необхідність часової синхронізації, просторової реєстрації інформації та зниження невизначеності при обробці даних.

Розглянуто основні архітектурні підходи до інтеграції даних сенсорів в A-UGV. Так архітектура з ранньою інтеграцією забезпечує інтеграцію необроблених даних перед етапом вилучення ознак, що сприяє максимальному використанню інформації, однак потребує значних обчислювальних ресурсів. Архітектура з пізньою інтеграцією обробляє інформацію після окремого аналізу кожного типу сенсорів, що зменшує обчислювальну складність, але може призводити до втрати важливих міжсенсорних кореляцій. Гібридні архітектури поєднують ранню обробку взаємодоповнюючих сенсорів із незалежною обробкою специфічних даних, що дозволяє оптимізувати алгоритми навігації та контролю.

У статті розглянуто ключові аспекти інтеграції сенсорних систем з метою підвищення функціональності A-UGV, зокрема адаптації до динамічних умов середовища, можливості інтеграції з інтелектуальними системами керування, здатності ідентифікувати та обходити складні перешкоди, а також ефективної взаємодії з іншими автономними платформами. Показано, що вибір конфігурації сенсорного обладнання безпосередньо впливає на експлуатаційну ефективність, надійність та адаптивність A-UGV до зовнішніх умов. Наголошено, що отримані результати можуть бути використані для розробки оптимізованих конфігурацій сенсорів, які забезпечать покращене зондування навколишнього середовища, стійкість до відмов і можливість ефективної роботи в умовах невизначеності. Визначено, що подальший розвиток автономних технологій залежатиме від вдосконалення сенсорних систем, алгоритмів штучного інтелекту, адаптивних стратегій керування та ефективної мережевої взаємодії між автономними платформами. Такий підхід, у свою чергу, дозволить значно розширити сфери застосування A-UGV та підвищити їх ефективність у складних експлуатаційних середовищах.

Ключові слова: *A-UGV, конфігурації сенсорів, мультисенсорні платформи, LiDAR, радар.*

Постановка проблеми. Автономні безпілотні наземні транспортні засоби (A-UGV) функціонують як самокеровані системи, які аналізують навколишнє середовище та реалізують навігаційні алгоритми без людського втручання. Статистичні дані відображають експоненціальну траєкторію розвитку таких систем, що свідчить про їх зростаюче значення. Слід відмітити той факт, що глобальна кількість транспортних засобів із різними рівнями автономії зросла з 31 мільйона у 2019 році до 54 мільйонів у 2024 році [1]. В той же час, еволюція мікроелектроніки, сенсорних систем та комунікаційних мереж, що характеризується мініатюризацією компонентів та підвищенням обчислювальної ефективності, забезпечила диверсифікацію технічних рішень у сфері A-UGV. Однак, імплементація цих систем у реальних експлуатаційних умовах супроводжується низкою

складних питань, серед яких особливої уваги заслуговують: забезпечення операційної безпеки при несприятливих метеорологічних умовах та розробка протоколів взаємодії з динамічними елементами середовища, включаючи пішоходів та інші транспортні засоби.

Ефективне функціонування сенсорних систем A-UGV визначається їхньою адаптацією до змінних метеорологічних умов, що впливає на якість отриманих даних і стабільність алгоритмів обробки. Сонячні відблиски, опади (сніг, дощ), атмосферні помутніння (туман, імла, серпанок) та аерозольні частинки створюють значні перешкоди для сенсорних систем. З огляду на зростаюче застосування A-UGV у таких галузях, як військові операції, сільське господарство та логістика, першочерговим завданням постає створення сенсорних систем, які б забезпечували стабільну роботу у будь-яких погодних умовах.

Слід зазначити, що складність автономної навігації зростає в дорожніх умовах, які характеризуються хаотичною поведінкою транспортних засобів і непередбачуваною динамікою руху. Так наприклад, транспортні засоби змінюють свою поведінку у відповідь на зміни в організації дорожнього руху, що потребує від A-UGV здатності до швидкої адаптації. Для забезпечення безпеки руху, A-UGV повинні мати вбудовані системи, які дозволяють проводити комплексну обробку даних та прогнозування траєкторій інших учасників руху. Такі аналітичні можливості є критично важливими для зниження ризику зіткнень [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сфера технологій A-UGV перебуває в постійному розвитку, де основна увага приділяється на вдосконаленні сенсорних технологій та їх інтеграції в складні системи для підвищення автономності. Важливими компонентами A-UGV є сенсори, які перетворюють зміни навколишнього середовища або внутрішні зміни у вимірювані дані для обробки та прийняття рішень. Такі сенсори зазвичай класифікуються на основі принципів їхньої роботи, з розрізненням пропріоцептивних та екстероцептивних типів.

Пропріоцептивні сенсори надають важливу інформацію про внутрішній стан автомобіля, вимірюючи такі параметри, як сила, кутова швидкість, навантаження на колеса та енергетичні показники, такі як напруга акумулятора. Ці сенсори необхідні для оцінки динамічного стану, причому ключову роль відіграють інерційні вимірювальні блоки (IMU – Inertial Measurement Unit), які включають акселерометри, гіроскопи та магнітометри [3]. Додаткові внутрішні сенсори включають сенсори обертання і приймачі Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS – Global Navigation Satellite System), які надають точні дані про місцезнаходження для навігації і керування.

Екстероцептивні сенсори, з іншого боку, зосереджені на зборі даних із зовнішнього середовища, що дозволяє A-UGV сприймати і реагувати на навколишнє середовище. Ці сенсори вимірюють такі змінні, як відстань, розміри об'єкта та інтенсивність світла. Прикладами є LiDAR, радар, ультразвукові сенсори і системи камер. LiDAR і радар, як активні сенсори, випромінюють енергію для картографування навколишнього середовища, тоді як камери, як пасивні сенсори, фіксують візуальні дані, використовуючи навколишнє світло.

Для гарантування надійного моніторингу навколишнього середовища та локалізації транспортного засобу, A-UGV значною мірою покладаються на мультисенсорну інтеграцію, що є основою для планування маршруту та прийняття рішень. Системи технічного зору, що складаються з камер високої роздільної здатності, допомагають розпізнавати і класифікувати об'єкти. Водночас, системи радарів і LiDAR полегшують вимірювання відстані та виявлення перешкод. Ультразвукові сенсори доповнюють їх, забезпечуючи вимірювання на коротких відстанях, що особливо корисно в умовах обмеженого простору. GNSS і IMU спільно надають інформацію про абсолютне і відносне позиціонування, забезпечуючи точне планування траєкторії.

Нещодавні дослідження акцентують увагу на важливості методів об'єднання сенсорів для підвищення ефективності і надійності A-UGV. Об'єднання декількох сенсорів використовує інтеграцію даних з різних сенсорів для зменшення обмежень окремих сенсорів, що дозволяє отримати комплексне розуміння ситуації [4]. Наприклад, об'єднання даних LiDAR і камер спостереження збільшує дальність і роздільну здатність, що є критично важливим для високоточного картографування довкілля. Крім того, вдосконалення алгоритмів машинного навчання дозволило розробити інтелектуальні сенсорні фреймворки, які оптимізують обробку та інтерпретацію даних.

Ще одним важливим аспектом, який висвітлюється в літературі, є класифікація сенсорів на основі радіусу дії зв'язку. Сенсори, що використовуються в A-UGV, можуть бути класифіковані як ближнього, середнього або дальнього радіусу дії, залежно від їхніх можливостей передачі даних

за допомогою бездротових технологій. Сенсори малого радіусу дії, такі як ультразвукові пристрої, ідеально підходять для виявлення наближення об'єктів, в той час як сенсори середнього і великого радіусу дії, в тому числі радари і LiDAR, розширюють зону дії для більш масштабних навігаційних завдань. Крім того, комунікаційні технології, такі як виділений зв'язок малого радіусу дії (DSRC – Dedicated short-range communications) і стільниковий зв'язок в технології «транспортний засіб до всього» (C-V2X – Cellular Vehicle-to-Everything), набувають все більшого значення для взаємодії на середніх і великих відстанях.

Архітектурний дизайн A-UGV акцентує увагу на синергетичній взаємодії між сенсорами і обчислювальними модулями. Згідно з [5], дані про транспортний засіб, зібрані з сенсорів, проходять послідовну обробку за допомогою чотирьох основних функціональних модулів: моніторингу, локалізації, планування і контролю. Ці модулі в сукупності дозволяють A-UGV динамічно адаптуватися до змін навколишнього середовища, зберігаючи при цьому безпеку та ефективність.

Постановка завдання. Сучасні дослідження в галузі A-UGV відзначаються значним технологічним розвитком. Проте, питання забезпечення надійного зондування навколишнього середовища шляхом інтеграції різноманітних сенсорів залишається недостатньо вивченим. Аналіз існуючих наукових публікацій виявляє відсутність комплексних рішень для актуальних проблем, що створює розрив між теоретичними моделями та практичними рекомендаціями щодо їх реалізації. Цей розрив обмежує впровадження інноваційних підходів у розробку A-UGV нового покоління.

Одним із ключових обмежень сучасних досліджень є недостатня оцінка ефективності інтегрованих сенсорних конфігурацій та стратегій інтеграції сенсорів. Більшість існуючих методологій оцінки не забезпечують необхідної деталізації для виявлення тонких, але важливих змін у функціонуванні A-UGV в різних умовах. Недостатня точність аналізу призводить до формування неоптимальних конфігурацій сенсорів, що негативно впливає на експлуатаційну ефективність, надійність та адаптивність системи.

Метою дослідження є проведення систематичного аналізу існуючих стратегій інтеграції сенсорів та оцінка їх ефективності в реальних умовах експлуатації A-UGV. На основі поєднання теоретичного моделювання та емпіричної перевірки, дослідження спрямоване на визначення найбільш ефективних архітектур інтеграції сенсорів для покращення зондування навколишнього середовища, навігації та загальних експлуатаційних характеристик A-UGV.

Виклад основного матеріалу. Розвиток A-UGV відображає значний прогрес у робототехніці і технологіях автономних систем. В основі цієї технологічної концепції лежить критично важлива вимога до надійного аналізу навколишнього середовища, що досягається за допомогою мультимодальних сенсорних систем. Інтеграція і об'єднання різнорідних потоків сенсорних даних становлять перцептивну основу, на якій будуються процеси прийняття рішень вищого рівня в даних автономних платформах. Сучасні системи A-UGV використовують різні типи сенсорів:

Системи візуального моніторингу, які базуються на відеокамерах, відіграють ключову роль у забезпеченні детального аналізу оточення в сучасних A-UGV. Різноманітність конфігурацій камер дозволяє адаптувати їх до специфічних вимог операцій [6]:

– монокулярні камери – забезпечують зображення високої роздільної здатності з точним відтворенням кольорів, що сприяє розпізнаванню та класифікації об'єктів. Впровадження нейромережевих архітектур, таких як ViT та Swin Transformer, покращує обробку даних, частково компенсуючи обмеження однокамерних систем;

– стерео камери – використовують методи тріангуляції для оцінки відстані на основі розбіжностей між синхронізованими зображеннями. Сучасні алгоритми стереозору, які включають контроль фокусування, зменшують обчислювальні витрати та підвищують точність визначення відстані, особливо в однорідних текстурних середовищах;

– камери подій – завдяки асинхронному виявленню змін яскравості на рівні пікселів, забезпечують високу тимчасову роздільну здатність (мікросекунди) та широкий динамічний діапазон (>120 дБ). Низька надлишковість даних та стійкість до розмиття при русі роблять їх ефективними для високошвидкісних операцій A-UGV в умовах динамічного освітлення.

Переваги систем на основі камер включають семантичну насиченість інформації, високу роздільну здатність кольору, високу частоту кадрів (60–240 Гц) та відносно низьку вартість. Обмеження полягають у погіршенні ефективності при несприятливому освітленні, чутливості до погодних умов, обмеженому сприйнятті глибини (для монокулярних камер) та високих обчислювальних витратах обробки зображень.

До іншого типу сенсорів слід віднести активні системи визначення дальності такі як LiDAR (Light Detection and Ranging) [7]. Сучасні технології LiDAR, які застосовуються в A-UGV, представлені наступним переліком:

– механічний скануючий LiDAR – використовуючи механізми обертання для отримання 360° горизонтального поля зору з 64–128 вертикальними каналами, такі системи забезпечують комплексну просторову вибірку. Нещодавні досягнення забезпечили зменшення форм-фактора при одночасному збільшенні роздільної здатності до >2 мільйонів точок на секунду.

– твердотільні LiDAR – у них відсутні механічні компоненти завдяки таким технологіям, як мікродзеркала MEMS, оптичні фазовані решітки або підсвічування. Зокрема, такі LiDAR-и значно покращили свої характеристики і тепер можуть працювати на дальностях понад 200 метрів з сантиметровою точністю;

– LiDAR з частотно-модульованою безперервною хвилею (FMCW – Frequency-Modulated Continuous Wave) – завдяки аналізу частотних зсувів у сигналі, отриманому в результаті зворотного проходження, такі пристрої одночасно вимірюють і відстань, і швидкість, забезпечуючи при цьому стійкість до перешкод від інших LiDAR пристроїв.

Перевагами таких пристроїв є – висока просторова роздільна здатність, пряма генерація 3D хмари точок, можливість функціонування незалежно від умов навколишнього освітлення, висока точність вимірювання відстані (±2–3 см на відстані 100 м) і все більш компактні форм-фактори.

До недоліків можна віднести – погіршення роботи в несприятливих погодних умовах (особливо під час опадів і туману), вища вартість порівняно з камерами, обмежена ефективність роботи, низька продуктивність.

Сенсори на основі радіолокаційних систем. Сучасні радіолокаційні рішення для A-UGV передбачають наступні типи систем [8]:

– РЛС міліметрового діапазону (77–81 ГГц) – вони забезпечують вищу роздільну здатність по дальності порівняно зі старими системами, що працюють на частоті 24 ГГц. Сучасні радари автомобільного класу досягають кутової роздільної здатності 1–2° з дальністю виявлення об’єктів розміром з автомобіль на відстані понад 300 метрів;

– радари з 4D зображенням – такі системи включають в себе кілька передавальних і приймальних антен в конфігурації MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), що забезпечує квазіоптичну роздільну здатність, зберігаючи при цьому стійкість радара до погодних умов. Останні розробки мають кутову роздільну здатність, що становить близько 0,5°;

– когнітивні РЛС – завдяки адаптивному проектуванню форми сигналу і регулюванню параметрів в реальному часі з урахуванням умов навколишнього середовища, такі системи є передовим досягненням радіолокаційних технологій для A-UGV.

Перевагами таких систем є – виняткова стійкість до погодних умов, пряме вимірювання швидкості за допомогою ефекту Доплера, розширений робочий діапазон (>200 м), низькі обчислювальні вимоги до обробки даних і постійне вдосконалення роздільної здатності.

До недоліків можна віднести наступні фактори – нижча просторова роздільна здатність порівняно з LiDAR системами, обмежене покриття кутів нахилу в звичайних конфігураціях і проблеми з виявленням неметалевих об’єктів.

Ультразвукові сенсори в основному використовуються для виявлення об’єктів на коротких відстанях [9]:

– широкосмугові ультразвукові решітки – сучасні розробки використовують декілька частот (30–100 кГц) одночасно для зменшення шумів навколишнього середовища і покращення роздільної здатності;

– параметричні ультразвукові решітки – такі пристрої створюють високоспрямовані діаграми направленості за рахунок генерування різночастотних сигналів у просторі, що значно покращує кутову роздільну здатність.

До переваг ультразвукових решіток можна віднести наступні фактори – ефективні в операціях на дуже близькій відстані (< 10 м), низька вартість, компактний розмір і висока ефективність, на яку не впливають освітлення або помірні опади.

До недоліків можна віднести наступне – дуже обмежений радіус дії, чутливість до атмосферних впливів, чутливість до зовнішніх ультразвукових перешкод і відносно низька кутова роздільна здатність.

Для точного позиціонування A-UGV застосовуються різноманітні технології локалізації. Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) забезпечують глобальне покриття та абсолютне позиціонування. Використання багатосистемних приймачів, які обробляють сигнали GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou та інших, покращує доступність та точність даних завдяки їх дублюванню. Методи кінематики в реальному часі (RTK – Real-Time Kinematic) та точного точкового позиціонування (PPP – Precise Point Positioning)

дозволяють досягти сантиметрової точності за рахунок диференційних поправок та точних ефемеридних даних. В умовах, де GNSS сигнали обмежені, використовуються альтернативні методи. Позиціонування на основі стільникової мережі 5G, з використанням покращених опорних сигналів позиціонування (PRS – positioning reference signals), дозволяє досягти субметрової точності в міських умовах за допомогою методів різниці часу прибуття (TDOA – time difference of arrival) та кута прибуття (AOA – angle of arrival). Надширокосмугове (UWB – Ultra-Wideband) позиціонування забезпечує високу часову роздільну здатність та сантиметрову точність у спеціалізованих застосуваннях, де GNSS недоступний [10].

До переваг цих систем належать – доповнення до GNSS у складних умовах, висока швидкість оновлення даних та використання існуючої інфраструктури. Обмеження включають – погіршення або втрату сигналу GNSS в умовах міських забудов, тунелів та густої рослинності, вразливість до перешкод та ризики маніпуляцій з сигналами GNSS, залежність від розгортання та обслуговування зовнішньої інфраструктури, а також потенційні затримки зв'язку.

Спільне повітряно-наземне зондування:

– спільне зондування UAV-A-UGV – UAV можуть забезпечити кращі точки спостереження для подолання перешкод у наземному зондуванні. Нещодавні дослідження свідчать про можливості семантичного картографування в реальному часі, коли UAV передають попередньо оброблені дані зондування на UGV для покращення оцінки поточної обстановки;

– повітряні системи з периферійними обчисленнями – сучасні безпілотні платформи мають суттєві можливості бортової обробки даних, що дозволяє проводити попередній аналіз даних перед передачею на наземний транспортний засіб, тим самим зменшуючи вимоги до каналу зв'язку.

Перевагами таких систем є – можливість подолання перешкод, розширення горизонту зондування і надання альтернативних перспектив для покращення оцінки ситуації.

До недоліків можна віднести – складність експлуатації, обмежена тривалість польоту UAV, регуляторні обмеження і складнощі в координації між повітряними і наземними платформами.

Розглянувши технічні характеристики і робочі параметри окремих сенсорів, що використовуються в A-UGV, стає очевидним, що жодна сенсорна технологія не може самостійно задовольнити високим вимогам до обробки даних, необхідним для надійної автономної роботи в різноманітних умовах навколишнього середовища. Обмеження, притаманні кожному способу зондування – чи то чутливість камер до несприятливих умов освітлення, погіршення роботи LiDAR під час опадів, чи обмежена просторова роздільна здатність радіолокаційних систем – зумовлюють необхідність системного підходу до інтеграції сенсорів, який виходить за рамки можливостей ізольованих компонентів.

Важливість об'єднання сенсорів при розробці A-UGV підкреслюється кількісним аналізом ефективності, проведеним в різних операційних умовах. Нещодавні експлуатаційні дослідження показали, що хоча системи зондування з одним сенсором досягають показників виявлення об'єктів на рівні 76–89 % за нормальних умов, ці показники стрімко знижуються до 31–58 %, коли умови навколишнього середовища погіршуються [11]. На противагу цьому, правильно налаштовані мультисенсорні системи забезпечують рівень виявлення вище 92 % навіть у складних умовах, що означає покращення ефективності на 34–61 % за несприятливих умов.

Потенційні технічні переваги, які надають сучасні методики об'єднання сенсорів, виходять за рамки простої надлишковості. Емпіричні дані свідчать про адитивний ефект, коли інтеграція взаємодоповнюючих сенсорів дає покращення ефективності, що перевищує сукупність можливостей окремих сенсорів [12]. Цей ефект кількісно виражається через індекс ефективності інтеграції сенсорів (SFEI – Sensor Fusion Efficacy Index) (1):

$$SFEI = \frac{P_{fusion}}{\max(P_1, P_2, \ldots, P_N) + \alpha \cdot \sum_{i=1}^{N} P_i}, \qquad (1)$$

де P_{fusion} – метрика ефективності об'єднаної системи; P_i – позначає ефективність окремих сенсорів; α – коефіцієнт контексту навколишнього середовища, який зазвичай знаходиться в діапазоні від 0,15 до 0,30.

Результати тестування в польових умовах показують, що значення SFEI систематично перевищують 1,4 в різних операційних умовах, що підтверджує суттєві переваги сучасних підходів до інтеграції сенсорів.

Функціональні вдосконалення, що стали можливими завдяки ефективній архітектурі об'єднання сенсорів, проявляються у багатьох експлуатаційних аспектах ефективності A-UGV (наведено в Таблиці 1):

Таблиця 1

Кількісна оцінка покращення ключових експлуатаційних характеристик A-UGV завдяки впровадженню мультисенсорної інтеграції

Параметр	Ефективність одного сенсора	Покращена ефективність інтеграції	Коефіцієнт покращення
Діапазон ідентифікації об'єктів, м	45–120	180–280	2.3–4.0×
Точність просторової локалізації, см	8–25	2–7	3.6–4.0×
Коефіцієнт помилкових спрацьовувань, %	6.8–15.2	0.8–2.4	6.3–8.5×
Стійкість до несприятливих погодних умов, %	35–52	87–94	1.8–2.5×
Точність динамічного трекінгу об'єктів, %	68–79	93–97	1.2–1.4×

Окрім кількісного покращення можливостей зондування, удосконалені архітектури об'єднання сенсорів дають можливість отримати якісно нові функціональні можливості, які докорінно змінюють операційні парадигми A-UGV. До них відносяться:

– прогностичне моделювання навколишнього середовища – синтезуючи часові потоки даних з різнорідних сенсорів, A-UGV можуть створювати прогнозні моделі динамічних елементів навколишнього середовища, що дозволяє використовувати прогностичні, а не реактивні навігаційні стратегії. Математичне моделювання показує, що такий підхід знижує ризик зіткнення на 78 % в динамічному середовищі порівняно з реактивними системами;

– семантична інтерпретація середовища – інтеграція додаткових сенсорних функцій полегшує комплексну інтерпретацію середовища, що виходить за рамки простого виявлення об'єктів, дозволяючи A-UGV розпізнавати складні ситуаційні контексти і відповідно адаптувати поведінкові стратегії [13]. Польові випробування свідчать про покращення на 340 % у виборі відповідної поведінкової реакції порівняно з системами, яким бракує семантичного аналізу;

– сенсорно-інваріантна локалізація – комбінація систем абсолютного і відносного позиціонування створює надійні системи локалізації, які підтримують субдециметрову точність навіть тоді, коли окремі системи позиціонування зазнають деградації або виходять з ладу. Експериментальні дані свідчать про можливість безперервної роботи з дрейфом положення менше 0,05 % від пройденої відстані навіть в умовах відсутності GNSS протягом більше 30 хвилин.

Економічні наслідки цих технічних досягнень також не менш цікаві. Аналіз витрат і переваг показує, що в той час як впровадження складних архітектур інтеграції сенсорів збільшує початкові апаратні і обчислювальні витрати на 28–45 %, ці інвестиції дають скорочення операційних витрат на 58–74 % завдяки зменшенню аварійності, розширенню операційних вікон і зменшенню потреби у втручанні людини. Ефективність різних підходів до об'єднання може бути математично формалізована за допомогою інформаційно-теоретичних метрик, зокрема, взаємного інформаційного приросту (MIG – Mutual Information Gain) (2), що досягається завдяки інтеграції сенсорів:

$$MIG = H(S_1, S_2, \ldots, S_n) - \sum_{i=1}^{n} H(S_i) + \\ + \sum_{i=1}^{n} H(S_i \vee S_1, S_2, \ldots, S_{i-1}, S_{i+1}, \ldots, S_n), \quad (2)$$

де $H(S_1, S_2, \ldots, S_n)$ – спільна ентропія всіх даних сенсорів разом взятих; $H(S_i)$ – ентропія окремого потоку даних сенсора; $H(S_i \vee S_1, S_2, \ldots, S_{i-1}, S_{i+1}, \ldots, S_n)$ – умовна ентропія сенсора S_i з урахуванням всіх інших сенсорів; $S_1, S_2, \ldots, S_n$ – відображає окремі потоки даних з різних сенсорів (наприклад, камера, LiDAR, радар тощо) [14].

Емпіричні вимірювання в типових операційних умовах показали значення MIG в діапазоні значень 4,2–5,8 для інтеграції камери і LiDAR, 3,7–4,9 для інтеграції радара і камери і 7,2–8,5 для комплексної інтеграції сенсорів, що кількісно свідчить про значний приріст інформації, який досягається за рахунок інтеграції сенсорів [15].

Впровадження цих перспективних систем зондування неминуче призводить до виникнення питань щодо оптимізації архітектури, методології інтеграції і специфічних для конкретної конфігурації характеристик ефективності. Оскільки обмеженість ресурсів залишається важливим фактором при практичному впровадженні A-UGV, визначення оптимальної конфігурації сенсорів і архітектури об'єднання для конкретних умов експлуатації є важливим дослідницьким завданням, що має суттєві практичні наслідки.

Визначивши кількісні переваги і функціональні вдосконалення, які дає комплексна інтеграція сенсорів, слід детально розглянути сучасні архітектури і методології інтеграції сенсорів, та провести оцінку оптимальних конфігурацій сенсорів для різних оперативних умов. Ці висновки

є важливою основою для розробки платформ A-UGV, які забезпечують надійну автономність у повному спектрі очікуваних умов розгортання.

У системах A-UGV інтеграція гетерогенних сенсорних даних потребує архітектурних рішень, які забезпечують синергію інформації та мінімізацію впливу сенсорних помилок. Аналіз наукової літератури показує, що існуючі архітектури інтеграції сенсорів поділяються на три основні категорії: низькорівневу, середньорівневу та високорівневу [16].

Низькорівнева інтеграція об'єднує необроблені дані через калібровані мультисенсорні платформи, забезпечуючи просторово-часову синхронізацію та підвищену відмовостійкість, проте вимагає значних обчислювальних ресурсів. Середньорівнева інтеграція працює з об'єктами або сітковими представленнями середовища, використовуючи адаптивні метрики та байєсівське оновлення для навігації, забезпечуючи модульність системи з ризиком часткової втрати даних. Високорівнева інтеграція, найбільш обчислювально ефективна, комбінує результати незалежного моніторингу через централізовані або розподілені архітектури з динамічною оцінкою вірогідності, але може втрачати критичну інформацію при обробці комплексних сценаріїв.

Проведення порівняльного аналізу та визначення оптимальних конфігурацій сенсорів надає можливість оцінювати ефективність сенсорів в залежності від умов навколишнього середовища:

– міське середовище – висока щільність забудови сприяє інтеграції камери і LiDAR, доповнених радаром, для збільшення дальності виявлення і стійкості до несприятливих погодних умов;

– в умовах бездоріжжя – складний рельєф місцевості дозволяє використовувати радарні технології, доповнені стереобаченням, з підвищеним акцентом на пропріоцептивне зондування для оцінки рельєфу місцевості;

– несприятливі погодні умови – опади і туман зумовлюють підвищену залежність від радіолокаційного і ультразвукового зондування з алгоритмами інтегрування, розробленими для динамічного коригування вагових коефіцієнтів на основі оцінки надійності сенсорів.

Як приклад, слід привести можливі конфігурації сенсорів для конкретних застосувань:

– логістика і доставка «останньої милі» – низькі швидкості дозволяють зменшити складність сенсорів, з акцентом на інтеграцію камери та ультразвуку для отримання економічно ефективних рішень;

– військове застосування – потребують надлишкових, високоефективних масивів сенсорів з акцентом на роботу в умовах відсутності GNSS. Для забезпечення надійної навігації в таких умовах застосовуються методи візуально-інерціальної одометрії та відносної навігації на місцевості;

– автоматизація сільського господарства – використання спеціалізованих сенсорів, в тому числі мультиспектральних камер і радіолокаторів для одночасної навігації і аналізу посівів.

Висновки. Розвиток сенсорних систем A-UGV продовжує стрімко набирати темпи завдяки вдосконаленню як апаратних можливостей, так і алгоритмічної складності. Оптимальна конфігурація сенсорів і методологія інтеграції для конкретної реалізації A-UGV залишається дуже залежною від експлуатаційних вимог, умов навколишнього середовища і обчислювальних обмежень. В перспективі конвергенція вдосконалених апаратних платформ, складних алгоритмів інтеграції і парадигм спільного зондування може дозволити подолати нинішні обмеження, що дасть змогу A-UGV працювати з більшою автономією в широкому діапазоні експлуатаційних умов.

Найуспішніші сучасні реалізації A-UGV показують, що взаємодоповнюваність сенсорів, а не їхнє резервування, пропонує найбільш ефективний підхід – шляхом інтеграції сенсорів з ортогональними перевагами і недоліками для досягнення надійного моніторингу навколишнього середовища в різноманітних умовах експлуатації.

Список літератури:

1. Koopman P., Wagner M. Autonomous Vehicle Safety: An Interdisciplinary Challenge, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 9, № 1, 2023, pp. 90–96.

2. Arafat M.Y., Alam M.M., Moh S. Vision-Based Navigation Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: Review and Challenges, Drones, vol. 7, № 2, 2023, pp. 89–106.

3. Yin H., Wang C., Zhang F. Inertial and GNSS sensor fusion for autonomous navigation: Recent advances and challenges. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 8(1), 2023, pp. 45–62.

4. Arafat M.Y., Alam M.M., Moh S. Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges, Drones, 2023, 7(2), pp. 89–106.

5. Bai S., Lian X., Hu G., Wang Q. Multi-sensor fusion for autonomous vehicles navigation: Review and challenges, Sensors, 2022, 22(5), pp. 1–25.

6. Yang Y., Yan Z., Liu H., ViT and Swin Transformer for visual perception in autonomous systems: A review, Journal of Artificial Intelligence Research 75, 2023, pp. 50–72.

7. Wang H., Chen W., LiDAR-based 3D mapping and localization for autonomous vehicles, Sensors, 22(8), 2022, pp. 269 -275.

8. Gong X., Wang R. Advances in radar technologies for autonomous navigation: Challenges and future directions, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 25(1), 2024, pp. 118–136.

9. Kwon S., Kim S., Park H., Lee D. Ultrasonic sensor applications for autonomous vehicles: Challenges and advancements, Sensors, 20(5), 2022, pp. 112–130.

10. Jones M., Patel R. Sensor fusion techniques in A-UGVs: A review of localization and environment perception, Robotics and Autonomous Systems, 135, 2021, pp. 45–67.

11. Zhao H., Ma Y., Li W. Deep learning-based object detection in adverse weather conditions for autonomous vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 24(1), 2023, pp. 45–59.

12. Feng D., Haase-Schütz C., Rosenbaum L., Glaeser C., Timm F., Wiesbeck W., Dietmayer K. Deep multi-modal object detection and semantic segmentation for autonomous driving: Datasets, methods, and challenges, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 22(3), 2021, pp. 1341–1360.

13. Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics, The MIT Press, 2005, p. 672.

14. Garcia E., Thompson H., Rivera L. Information-theoretical metrics in sensor fusion for autonomous systems, International Journal of Robotics Research, 41(1), 2023, pp. 67–84.

15. Johnson K., Miller D., Wang S. Mutual information metrics in LiDAR-camera integration for autonomous vehicles, International Journal of Robotics Research, 39(3), 2023, pp. 134–152.

16. Anderson M., Patel K., Zhang R. Multi-layer sensor integration architectures for A-UGVs, Robotics Journal, 45(2), 2023, pp. 99–115.

Ciapa S. M. INTEGRATION OF SENSOR DATA IN A-UGV SYSTEMS

This article investigates the problem of integrating various sensor systems used in modern autonomous ground unmanned vehicles (A-UGVs) in order to increase the level of safety of their operation in severe weather conditions, as well as to ensure effective interaction with a dynamic environment, including pedestrians and other vehicles. Given the significant architectural differentiation of A-UGV systems, all these platforms are high-tech complexes with a large number of interconnected components. The architecture of such systems can be considered in two main aspects: technical and functional. From a technical point of view, the A-UGV system combines hardware, which includes computing modules, sensor arrays and actuators, as well as software, which consists of sensor data processing algorithms, decision-making models and control systems. The functional architecture defines the principles of sequential data processing, from collecting information about the environment to making real-time control decisions. The integration of sensor data is a critical factor that directly affects the operational efficiency of A-UGVs. Modern unmanned platforms are equipped with various types of sensors, such as LiDAR, radar systems, video cameras, thermal sensors, ultrasonic sensors, and GNSS receivers. The analysis of scientific literature shows that the integration of sensor data is a complex task due to the need for temporal synchronization, spatial registration of information, and reduction of uncertainty in data processing.

The main architectural approaches to the integration of sensor data into A-UGVs are considered. Thus, the early integration architecture ensures the integration of raw data before the feature extraction stage, which contributes to the maximum use of information, but requires significant computing resources. The late integration architecture processes information after a separate analysis of each type of sensor, which reduces computational complexity but can lead to the loss of important cross-sensor correlations. Hybrid architectures combine early processing of complementary sensors with independent processing of specific data, which allows optimizing navigation and control algorithms.

The article discusses the key aspects of sensor system integration to improve the functionality of A-UGVs, including adaptation to dynamic environmental conditions, the ability to integrate with intelligent control systems, the ability to identify and avoid complex obstacles, and effective interaction with other autonomous platforms. It is shown that the choice of sensor equipment configuration directly affects the operational efficiency, reliability, and adaptability of A-UGVs to external conditions. It is emphasized that the results obtained can be used to develop optimized sensor configurations that will provide improved environmental sensing, fault tolerance, and the ability to work effectively under conditions of uncertainty. It is determined that the further development of autonomous technologies will depend on the improvement of sensor systems, artificial intelligence algorithms, adaptive control strategies, and effective networking between autonomous platforms. This approach, in turn, will significantly expand the scope of A-UGVs and increase their efficiency in complex operating environments.

Key words: *A-UGV, sensor c onfigurations, multi-sensor platforms, LiDAR, radar.*

УДК 004.89
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/30

Шаповал В. П.
Черкаський державний технологічний університет

Тарасенко Я. В.
Державний науково-дослідний інститут
випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ВІДЕОКОНТРОЛЮ ПЕРВИННИХ ОЗНАК ПСИХОЛОГІЧНОГО СТАНУ

У статті розглянуто актуальну на сьогоднішній день задачу розробки інформаційних систем та технологій для попередження витоку інформації на підприємствах шляхами інсайдерських атак. Проаналізовано найбільш перспективні в цьому напрямку існуючі технології діагностики емоційного та психологічного стану для аналізу відхилень функціональних станів співробітників підприємств за результатами дослідження відео. Вперше розроблено метод інтелектуального відеоконтролю первинних ознак психологічного стану працівників, який дозволив підвищити ефективність комп'ютерної психодіагностики за рахунок інтелектуального аналізу відеоряду в режимі реального стану на 31,5 %. За рахунок навчання нейромережі надається можливість визначення відхилень характерних працівнику функціональних психологічних станів. Висока ефективність методу досягається за рахунок обчислення вагових коефіцієнтів шляхом факторного аналізу. Запропонований метод доцільно використовувати як первинний інструмент постійного моніторингу первинних ознак відхилень психологічних функціональних станів працівників комерційних підприємств з метою більш точного подальшого глибинного дослідження. В розробці методу враховано різні класи характеристик, які впливають на коефіцієнт психічного стану. На відміну від існуючих розробок одночасно досліджуються такі класи як вираз обличчя, постава тіла, жести, рухи тіла з метою визначення широкого ряду з 9 функціональних станів. Розглянуто наступні функціональні стани як джерело невербальної інформації: ситуативні стани у трудовій діяльності. Характерною особливістю є дослідження функціональних психологічних станів в режимі реального часу за рахунок визначення щільності функціональних станів за часовий проміжок в процесі відеомоніторингу, що не потребує окремого зупинки відеомоніторингу та окремого дослідження відео. Подальші дослідження передбачають додавання звукової складової для підвищення точності інтелектуального аналізу представленого відеоряду. Удосконалення потребують процедури дослідження ефективності для визначення залежностей, на які впливають ті чи інші фактори відеомоніторингу первинних психологічних ознак.

Ключові слова: *відеомоніторинг, функційні психологічні стани, попередження витоку інформації, системи аналізу емоцій, системи психологічного аналізу, автоматизований психоаналіз.*

Постановка проблеми. На сьогоднішній день постає проблема витоку інформації на світових підприємствах, установах та організаціях усіх рівнів. Поточні реалії, спричинені військовими діями на території України ще більше загострюють дану проблему на вітчизняних підприємствах. Відповідно до звіту [1] інсайдерські атаки спричиняють збитки від 100 тисяч до 1 мільйона доларів за одну атаку при частоті 10 атак на рік у 2024 році для 51 % розглянутих у звіті організацій. Співробітники компаній виступають основним джерелом небезпеки за умови належного захисту програмного забезпечення від вторгнень. Подібна ситуація змушує керівників та представників служби безпеки організацій шукати можливості попередження негативним наслідкам від подібних загроз. З урахуванням того, що 52 % організацій не мають належного інструментарію та програмного забезпечення для протидії таким атакам [1], описана проблема є вкрай актуальною як в Україні так і у світі.

З одного боку, така ситуація може виникнути в результаті злого умислу співробітника, а з іншого по необережності чи під примусом. Кожна з причин може бути попереджена або з максимальною оперативністю виявлена за умови своєчасної та ефективної діагностики психологічного стану співробітників, які готуються чи вже вчинили такий злочин.

Для ефективної та своєчасної психодіагностики неможливо обійтись без залучення відповідних спеціалізованих інформаційних технології,

які здатні в режимі реального часу виконувати контроль психологічного стану співробітників та сигналізувати про відхилення у їх стабільних функціональних станах для подальшого детального розгляду та вивчення причин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в області автоматизованої психодіагностики, та їх реалізація у вигляді відповідних інформаційних систем не дозволяють використовувати результати цих досліджень в початковому вигляді для вирішення задачі автоматизованого постійного відеомоніторингу психологічних відхилень функціональних станів. Так, в роботі [2] представлена інформаційно-аналітична система визначення психічного стану людини націлена на проведення тестування та аналіз результатів цього тестування. У такому випадку можна визначити низький рівень автоматизації процедури психодіагностики. Потреба залучення співробітника до опитування та неможливість безперервного контролю не дозволяють використовувати подібні підходи при запобіганню витоку інформації. Основна задача полягає в автоматизованому постійному дослідженню результатів психоаналізу, яку можна виконати залучивши елемент відеоконтролю, де відеоряд виступає основним джерелом даних як альтернатива опитуванню. У роботі [3] описано технологію відео-комп'ютерного інтелектуального психологічного аналізу, яка застосовується в процесі діагностики психопатій та визначення ефекту від лікування. Основним недоліком в рамках вирішення задач, поставлених в статті виступає вузька спеціалізація визначення психопатологій та відсутність можливості контролю в режимі реального часу.

Для аналізу відхилень поведінки індивіда використовуються системи обробки відео як описується в роботі [4]. Головним недоліком, описаної в зазначеній роботі системи є відсутність врахування емоційних реакцій, характерних для співробітника в умовах допущення ним витоку інформації та можливості всебічного визначення первинних функціональних станів та реакцій. У даному випадку немає необхідності в детальному психологічному аналізі. Психоемоційних маркерів, які виходять за рамки звичайних функціональних станів працівника достатньо для виявлення працівників, які потребують подальшого детального аналізу для встановлення причин відхилень функціональних станів.

На сьогоднішній день є багато розробок щодо визначення емоцій людини за відеорядом [5–7], більшість з яких розглядає суто обличчя. По перше, такі роботи не дозволяють визначити психологічний стан особливо з огляду тривалого проміжку часу, а не в конкретний момент. По друге, більшість робіт розглядають лише обличчя як джерело емоцій, в той час як відповідно до роботи [8] емоційну оцінку відношення людини до ситуації можна визначити за оптичними знаками, до яких окрім виразів обличчя відносять жести, постави та рухи тіла.

У роботі [9] описується можливість визначення психологічних ознак за розташуванням частин тіла. Таку систему складно застосувати для вирішення поставлених задач через обмеженість розглянутих емоційних складових та складністю реалізації в результаті глибокого аналізу.

Відеоконтроль психологічного стану для вирішення поточної задачі передбачає моніторинг лише первинних зовнішніх ознак, що дозволить в подальшому економити час та обчислювальні ресурси при дослідженні усіх співробітників.

Представлені у роботі [10] дані доводять можливість глибинного психологічного аналізу та емоційного стану особистості за текстовими повідомленням. Такі системи доцільно застосовувати для подальшого глибинного аналізу після виявлення первинних зовнішніх відхилень від нормальної поведінки досліджуваного індивіда.

Аналіз показав, що більшість сучасних методів та засобів розпізнавання емоційної складової та психологічного стану особи прямо чи опосередковано пов'язано з використанням технологій штучного інтелекту, який є необхідним інструментом і для вирішення поставленої в роботі задачі, додає інтелектуальну складову та дозволяє проводити навчання, що є ключовим для постійного моніторингу в режимі реального часу.

Постановка завдання. Метою статті є підвищення ефективності комп'ютерної психодіагностики за рахунок відеомоніторингу динаміки первинних ознак функціональних станів співробітників в задачах попередження витоку інформації.

Виклад основного матеріалу. Визначення показників психічних функціональних станів ґрунтується на виокремлення з відеоряду ключових класів характеристик, множина яких буде позначена як S. Кожен клас впливає на визначення коефіцієнту психічного стану P (рис. 1).

За класифікацією психічних станів в даному випадку розглядаються наступні стани: за роллю в структурі особистості – ситуативні як такі, що дозволяють визначити психоемоційну складову в окремій ситуації можливого витоку інформації

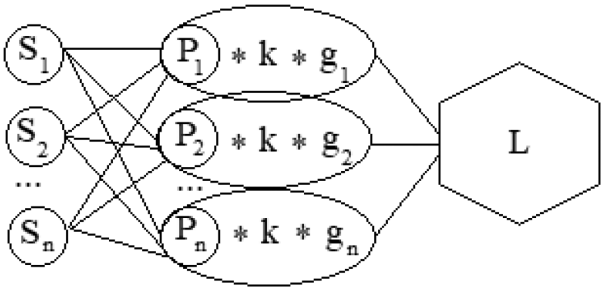


Рис. 1. Концептуальна структурна схема визначення відхилень функціональних психологічних станів співробітників: S_1 – вираз обличчя; S_2 – постава тіла; S_3 – жести; S_4 – рухи тіла; P_1 – стрес; P_2 – страх; P_3 – гнів; P_4 – сором; P_5 – фрустрація; P_6 – агресія; P_7 – радість; P_8 – занепокоєння; P_9 – апатія; k – коефіцієнт відхилення; g – ваговий коефіцієнт; L – працівник

та ставлення індивіда до неї; за родом занять – стани у трудовій діяльності як такій, що характеризує предметну область здійснення відеоконтролю. Тип стану – функціональний, оскільки здійснюється відеоконтроль за невербальною функціональною реакцією працівника. Коефіцієнт відхилення відображає рівень відхилення від звичного функціонального стану працівника. За умови, якщо відхилення виходить за рамки допустимої похибки (значення 0,1), коефіцієнт психічного функціонального стану збільшується. Ваговий коефіцієнт визначається індивідуально для кожного показника в конкретній ситуації.

Запропонований у статті метод складається з 5 етапів. На першому етапі проводиться навчання нейронної мережі.

Формула функції для нейромережі аналізу психологічних станів має такий вигляд:

$$y = \sum_{j=1}^{4} \varphi\left(\sum_{i=1}^{n} S_{ij} \cdot g_i \cdot k + a \right), \qquad (1)$$

де φ – сигмоїдна функція активації; a – зміщення; S – вхідні зображення з відеоряду; g – вагові коефіцієнти.

Зміщення визначається за рахунок подальшого навчання нейромережі та слугує для контролю функціонального стану особистості протягом часу. Початкове значення для кожного працівника встановлюється відповідно до результатів первинного психологічного опитування як точка відліку для підвищення точності. На кожен показник психологічного стану впливає одночасно кожен з ключових класів характеристик, що зумовлює основну відмінність від підходу [7], де аналізується лише один клас – вираз обличчя. Використання сигмоїдної функції активації пояснюється відсутністю необхідності аналізу від'ємних значень, оскільки за умов відсутності на кадрі жодного з функціональних станів, такий кадр відноситься до нейтральних.

Наступний етап передбачає проведення покадрового аналізу відеопотоку для виявлення щільності функціональних станів за відповідний часовий проміжок. З цією метою можна взяти за основу описаний в [7] підхід до розподілу кадрів за типами емоцій та адаптувати до задачі визначення функціональних станів з використанням легкої нейромережі описаної в [9].

Для покадрової класифікації зображень використовується підхід на основі статистичного розподілу, описаний в [11]. Функція належності зображення до того чи іншого функціонального стану матиме вигляд:

$$\mu(e_v(i)) = \sum_{j=1}^{4} \frac{\eta^{S_j}(e_v, i)}{\sum_{i=1}^{N} \eta^{S_j}(e_v, i)}, \qquad (2)$$

де (e_v, i) – елемент із бази еталонних зображень; η – міра подібності; i – номер еталону; N – загальна кількість випадків. Кожне зображення аналізується з урахуванням кожного класу S.

Міра подібності може бути виражена через манхетенську метрику. Зображення порівнюються з базою еталонних зображень та розподіляються за 10 класами психічного стану. Оскільки усього розглянуто в статті 9 класів психічного функціонального стану, то вводиться ще один клас, який відповідає за нейтральний стан зображення. Класи множини ключових характеристик впливають на розподіл кадрів. Один кадр може бути віднесено до різних психічних станів, що зумовлено одночасним аналізом різних ключових класів. На одному кадрі вираз обличчя може вказувати на одну множину функціональних станів, а постава тіла на іншу. Цим фактом пояснюється можливість наявності більшої кількості кадрів після розподілу за функціональними станами, аніж загальна кількість кадрів. Множина кадрів G може бути описана формулою:

$$G = S_1^{P_n} \cup S_2^{P_n} \cup S_3^{P_n} \cup S_4^{P_n}, \qquad (3)$$

яка при розподілі кадрів виконує дублювання.

Необхідною умовою відеоконтролю є визначення щільності функціональних станів за часовий проміжок. Щільність визначається наступною формулою:

$$d_n = \frac{\left| S_n \mu(e_v(i)) \right|}{\frac{q}{t}}, \qquad (4)$$

де q – кількість кадрів у секунду для даного відеоряду; t – повторюваний часовий інтервал; $|S_n\mu(e_v(i))|$ – потужність множини кадрів, які належать до відповідного класу функціональних психологічних станів. Потужність множини визначає кількість подібних кадрів. Необхідність врахування повторюваного часового інтервалу зумовлена потребою аналізу відеоряду не після запису, а в режимі реального часу.

Етап визначення коефіцієнтів психічного стану передбачає використання моделі LSTM, описаної в [7] з урахуванням щільності функціональних станів за часовий проміжок. З урахуванням інтелектуальної складової, коефіцієнти визначаються за формулою:

$$P_n = \sigma(d_n[S_m, \mu(e_v(i))] + a), \quad (5)$$

де сигмоїдна функція σ набуває значень на інтервалі від 0 до 1.

Коефіцієнт відхилення k визначається відношенням:

$$k = \left| \frac{100 - \frac{a(P_n)\cdot 100}{a(y)}}{100} \right|, \quad (6)$$

де допустиме значення відхилення складає 0,1.

Наступним етапом є визначення вагових коефіцієнтів для коефіцієнтів психічного стану. Визначення питомої ваги впливу кожного з 9 коефіцієнтів на рівень загального показника психічного стану в умовах можливого витоку інформації визначається на основі методики факторного аналізу, описаної в роботі [12] за формулою:

$$g_n = \sum_{j}^{4} \frac{q_{nj}\cdot c_{nj}}{\sum_{n=1}^{9} q_{nj}\cdot c_{nj}}, \quad (7)$$

де c – вагові коефіцієнти впливу, які розраховуються як відношення кількості показників n-го фактора до загальної кількості показників з урахуванням ключових класів характеристик; q – співвідношення кількості бінарних показників, значення яких дорівнює одиниці до загальної кількості бінарних показників за 9 групами.

Після визначення вагових коефіцієнтів проводиться визначення первинних ознак загального стану кожного досліджуваного працівника за наступною формулою:

$$L = P_n \cdot k \cdot g_n, \quad (8)$$

де L – відповідний досліджуваний працівник.

Структурно-логічна схема запропонованого методу з урахуванням усіх п’яти етапів його роботи та функційний взаємозв’язків цих етапів прадставлена на рисунку 2.

Експеримент було проведено із залученням здобувачів вищої освіти. В експерименті прийняло участь 17 здобувачів з різних курсів за спеціальністю «Інформаційні системи та технології». Було проведено навчання нейромережі протягом 5 лекційних та лабораторних занять. Після навчання запропоновано написати зріз знань (без відеомоніторингу) та розпочато відеомоніторинг одразу після виконання робіт. Із 17 осіб списували 6, із них було виявлено первинні психологічні ознаки, які відбивають функційні стани (надмірна радість, сором, залишкові ознаки страху тощо) у 8 осіб, серед яких 5 осіб списували. Аналогічні системи психологічного дослідження виявили також 5 осіб, але відрізнявся час, затрачений на психодіагностику.

Ефективність визначалась з урахуванням часу, необхідного на виявлення цільових осіб за наступною формулою:

$$E = \frac{\frac{K_b}{K_c}}{\sin(t^*)}, \quad (9)$$

де K_b – кількість цільових осіб; K_c – кількість виявлених цільових осіб; t^* – час, затрачений на виявлення. Враховується синус від часу, затраченого на виявлення, оскільки чим більше часу затрачено, тим нижче ефективність.

Аналогічні засоби передбачали дослідження усіх працівників, на відміну від запропонованого методу виявлення первинних ознак, який дозволяв проводити глибинний аналізу лише виявлених осіб. Незважаючи на виявлених хибних цільових осіб, значно скорочується загальний час та зростає ефективність. В даному експерименті ефективність психодіагностики із застосованою системою інтелектуального відеомоніторингу складала 69,2 % на відміну від аналогічних систем, ефективність яких складала 37,7 %.

Висновки. Таким чином, у статті підвищено ефективність комп’ютерної психодіагностики за рахунок постійного інтелектуального моніторингу динаміки первинних ознак функціональних станів співробітників в задачах попередження витоку інформації. Експериментальні дослідження доводять підвищення ефективності на 31,5 %.

У роботі розроблено метод інтелектуального відеоконтролю первинних ознак психологічного стану на основі штучних нейронних мереж, які шляхом перманентного аналізу відеоряду дозво-

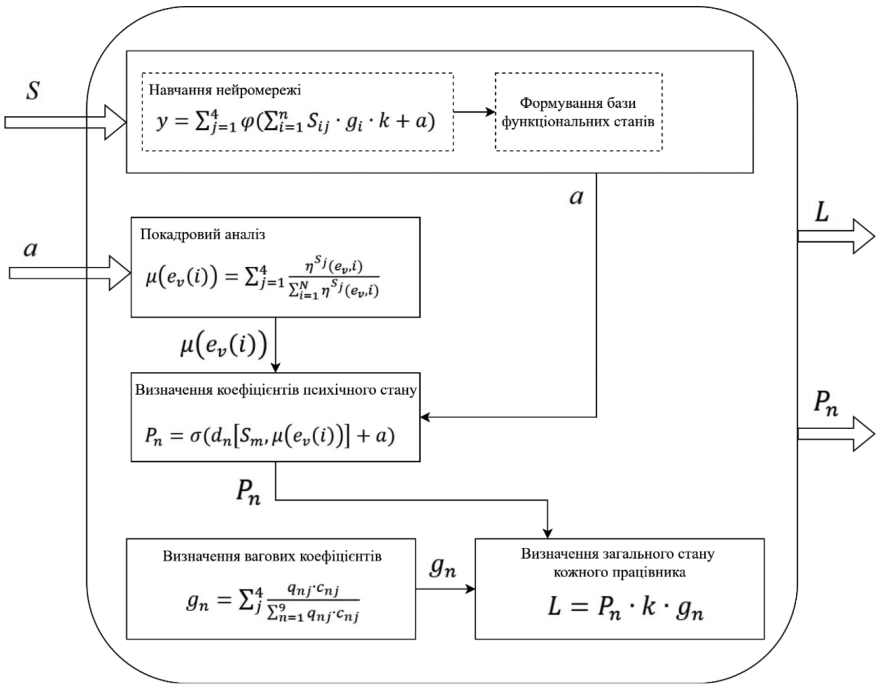


Рис. 2. Структурно-логічна схема методу інтелектуального відеоконтролю первинних ознак психологічного стану

ляють відстежувати динаміку функціональних психологічних станів співробітників за рахунок визначення їх щільності за часовий проміжок.

Вагові коефіцієнти, визначені за рахунок факторного аналізу дозволяють забезпечити високу ефективність запропонованого методу.

Сфера практичного застосування запропонованого методу полягає у його використанні службами безпеки підприємств для контролю психологічного стану співробітників і оперативного усунення наслідків можливого витоку комерційної інформації.

Подальшого розгляду потребують питання відеоакустичного моніторингу первинних ознак функціональних станів для підвищення точності роботи системи.

Список літератури:

1. Insider Threat Report. Gurucul, 2024. 20 p.

2. Григоришен О. О., Колесник І. С., Савицька Л. А. Інформаційно-аналітична система визначення психологічного стану людини. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2021. № 3. С. 4–9.

3. Шелехов І. В., Востоцький В. О., Мажаровська А. І. Система комп'ютерної психодіагностики в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології. *Інформатика, математика, механіка* : *Матеріали IV міжвузівської науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студенітв (м. Суми, 19–23 квітня 2010 р.)*. Суми: Видавництво СумДУ, 2010. С. 278–283. С. 137–138.

4. A novel framework for intelligent surveillance system based on abnormal human activity detection in academic environments / M. Al-Nawashi et al. *Neural Comput & Applic*. 2017. Vol. 28. P. S565–S572.

5. Detection of (Hidden) Emotions from Videos Using Muscules Movements and Face Manifold Embedding / J. Kim et al. *arXiv*. 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2211.00233 (дата звернення: 05.03.2025)

6. Vaiani L., Cagliero L., Garza P. Emotion Recognition from Videos Using Multimodal Large Language Models. *Future Internet*. 2024. Vol. 16, № 7. P. 247–264.

7. Li Y. Deep Learning of Human Emotion Recognition in Videos. Uppsala University, 2017. URL: https://surl.li/mbtdqh (дата звернення: 03.03.2025).

8. Мельничук О. Д. Невербальна комунікація: від семіотики до міждисциплінарних теорій. *Сучасні філологічні дослідження та навчання іноземної мови в контексті міжкультурної комунікації* : *Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих науковців за міжнародної участі (м. Житомир, 23 листопада 2018 р.)*. Житомир: Видавництво Житомирського державного університету імені Івана Франка, 2018. С. 278–283.

9. Determining the psycho-emotional state of the observed based on the analysis of video observations / Ye. Amirgaliyev et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. № 1(2(127)). P. 45–53.

10. Гасько Р. В., Висоцька В. А., Чирун Л. Б. Інформаційна система аналізу психологічного стану особистості. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: інформаційні системи та мережі*. 2015. Вип. 829. С. 102–128.

11. Дослідження результативності класифікаторів зображень за статистичними розподілами для компонентів структурного опису / В. О. Гороховатський та ін. Сучасні інформаційні системи. 2021. Т. 5, № 1. С. 5–11.

12. Меренкова О. В., Медвідь Т. А., Бойко А. О. Факторний аналіз імовірнісної оцінки ризику використання послуг банків для легалізації кримінальних доходів або фінансування тероризму. *Вісник Національного банку України*. 2010. № 11. С. 124–130.

Shapoval V. P., Tarasenko Ya. V. METHOD OF INTELLIGENT VIDEO MONITORING OF PRIMARY SIGNS OF PSYCHOLOGICAL STATE

The article considers the currently relevant task of developing information systems and technologies for preventing information leakage at enterprises by means of insider attacks. The most promising in this direction existing technologies for diagnosing emotional and psychological state in analysis of enterprise employees' functional state deviations based on the results of video control were analyzed. For the first time a method of intelligent video control of the primary signs of the employees' psychological state was developed which allowed to increase the effectiveness of computer psychodiagnostics due to the video stream intelligent analysis in real time by 31,5 %. Due to the neural network training, it is possible to determine the deviations of employee's functional states. The high efficiency of the method is achieved due to the calculation of weighting factors by means of factor analysis. It is advisable to use the proposed method as a primary tool for constant monitoring of primary signs of psychological functional states deviations of employees at the commercial enterprises for the purpose of more accurate further in-depth research. The method development takes into account different classes of characteristics that affect the mental state coefficients. In contrast to existing developments, such classes as facial expression, body posture, gestures, body movements are simultaneously investigated in order to determine a wide range of 9 functional states. The following functional states are considered as a source of non-verbal information: situational states in labor activity. A characteristic feature is the study of functional psychological states in real time by determining the density of functional states over a period of time during video monitoring, which does not require a separate stop of video monitoring and its separate analysis. Further research involves the addition of a sound component to increase the accuracy of the presented video sequence intelligent analysis. Improvements are needed in the effectiveness research procedure to determine the dependencies that are influenced by certain factors of primary psychological signs video analysis.

Key words: *video monitoring, functional psychological states, information leakage prevention, emotion analysis systems, psychological analysis systems, automated psychoanalysis.*

УДК 004.852
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/31

Шерстюк І. О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Голубєв Л. П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РЕКОМЕНДАЦІЙНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ УДОСКОНАЛЕНОГО АЛГОРИТМУ КОРЕЛЯЦІЇ

У статті розглядається розробка рекомендаційної системи, яка використовує кореляційний аналіз та параметри регуляризації для покращення точності рекомендацій. Рекомендаційні системи є важливим інструментом у сфері електронної комерції, потокових сервісів та соціальних мереж, оскільки вони допомагають користувачам знаходити цікаві для них товари чи контент. У роботі було розглянуто основні методи рекомендацій, зокрема колаборативну фільтрацію та кореляційний підхід. Колаборативна фільтрація є одним з найбільш популярних методів побудови рекомендацій. В її основі лежить матриця оцінок користувачами тих чи інших елементів. Кореляційний метод направлений на визначення оцінок для пропущених значень на основі схожості уподобань користувачів. В статті висвітлено проблеми, пов'язані з розрідженістю даних, і шляхи їх подолання. Основною проблемою традиційних методів є розрідженість матриці оцінок, що ускладнює знаходження подібних користувачів та об'єктів. Для вирішення цієї проблеми застосовано регуляризацію, яка допомагає зменшити вплив розрідженості на точність рекомендацій. У ході експериментального дослідження було перевірено ефективність регуляризації на синтетичних наборах даних. Аналіз показав, що застосування регуляризації покращує якість рекомендацій, особливо для даних із великою кількістю пропущених значень. Отримані результати показують, що, чим більш розріджена матриця, тим значніший позитивний ефект від регуляризації. Також було проведене дослідження залежності якості рекомендацій від значення параметра регуляризації. Реалізовано алгоритми обчислення подібності між користувачами та рекомендації на основі їх уподобань. Отримані результати підтверджують доцільність використання регуляризованого методу для побудови рекомендаційних систем. Запропоноване рішення дозволяє підвищити точність рекомендацій без значного ускладнення обчислювальної моделі.

Ключові слова: *рекомендаційна система, кореляційні методи, регуляризація, колаборативна фільтрація.*

Постановка проблеми. Рекомендаційні системи є важливим інструментом для персоналізації контенту та підвищення зацікавленості користувачів. Однак традиційні методи, такі як колаборативна фільтрація, стикаються з проблемою розрідженості матриці оцінок, що ускладнює точність прогнозів. Методи машинного навчання можуть обробляти такі дані, але їхня висока обчислювальна складність обмежує застосування в малих бізнесах. Кореляційні методи є більш доступними та простими у використанні, проте їхня точність потребує вдосконалення.

Також однією з переваг методів колаборативної фільтрації є те, що йому не потрібно для розрахунків додаткової інформації про користувача, оскільки ця інформація не змінює та не впливає на результати рекомендацій. Це робить колаборативну фільтрацію більш гнучким методом, ніж інші.

Основним недоліком методу є те, що для генерації результату прогнозування використовується загальна матриця оцінки елементів. У реальних рекомендаціях зазвичай найактивніші користувачі оцінюють дуже обмежений відсоток елементів у порівнянні з доступною загальною кількістю. Це призводить до розрідженості матриць елементів користувача, неможливості знайти успішних сусідів і, нарешті, створення нерелевантних рекомендацій

Враховуючи ці аспекти, розробка ефективної, зручної та продуктивної рекомендаційної системи є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Техніка колаборативної фільтрації спирається на описи продуктів і профілі користувачів. Даний підхід включає різні методики розрахунків, а його результати застосовуються для побудови рекомен-

дації для фільмів, туристичних пам'яток тощо [1], [2]. Однак в більшості досліджень вказується, що відсутність великої кількості оцінок може суттєва погіршити рекомендації. Для цього пропонується використовувати різні техніки. В роботі [3] застосовується додаткова інформація щодо переваг користувачів. В роботах [4, 5] застосовуються різні методи машинного навчання або графові методи, які можуть забезпечити кращу точність рекомендацій. Однак, в будь-якому разі, ці методи потребують додаткової інформації та/або додаткових обчислювальних ресурсів. Тому задача більш простих методів без залучення додаткової інформації потребує подальшого дослідження.

Постановка завдання. Метою дослідження є вдосконалення алгоритму рекомендацій за рахунок використання регуляризації для коригування впливу відсутності значної кількості оцінок.

Виклад основного матеріалу. Рекомендаційні системи – це програмні рішення, що прогнозують, які об'єкти (фільми, музика, книги, новини, веб-сайти, товари) можуть зацікавити користувача, спираючись на інформацію про його вподобання. Вони надають рекомендації в різних ситуаціях, наприклад, коли користувач обирає серед великої кількості варіантів або прагне отримати персоналізовані пропозиції [6].

Виділяють чотири ключові функції рекомендаційних систем [7]:

– підтримка у прийнятті рішень шляхом прогнозування оцінок користувача для певних товарів;

– допомога у порівнянні, що забезпечує персоналізоване ранжування списку доступних елементів;

– сприяння у пошуку, надаючи користувачеві рекомендації щодо нових об'єктів, які можуть його зацікавити;

– розширення можливостей дослідження шляхом пропонування елементів, подібних до обраного користувачем.

Система рекомендацій на основі колаборативної фільтрації використовують міру схожості між користувачами. В основі даного підходу лежить така ідея: пошук групи або колекції користувачів X, чиї вподобання та антипатії подібні до уподобань користувача A. Нові елементи, які подобаються більшості користувачів у X, рекомендуються користувачеві A (рис. 1) [8].

Ефективність побудови рекомендацій залежить від того, на скільки точно алгоритм може знайти околиці цільового користувача, тобто визначити групи користувачів зі спільними уподобаннями. В основу методу покладені три правила [6]:

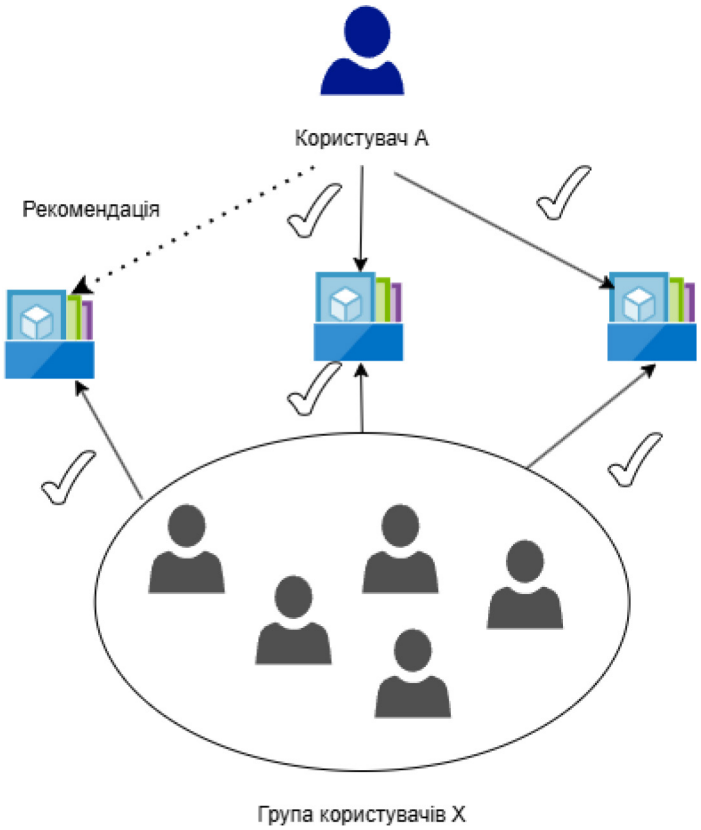


Рис. 1. Принцип роботи алгоритму колаборативної фільтрації

– люди мають однакові переваги та об'єкти своєї уваги,

– їхні переваги та об'єкти уваги є стабільними,

– їхній вибір можна визначити, досліджуючи їх історичні переваги.

Таким чином, алгоритм пошуку рекомендацій, побудований на діях користувачів, займається пошуком сусідів для кожного користувача та прогнозуванні його інтересів згідно інтересів чи переваг його сусідів.

Розглянемо загальну постановку задачі колаборативної фільтрації. Нехай рекомендаційна система визначається такими множинами [9]:

множина користувачів $U = \{u_1, u_2, \ldots, u_N\}$,

множина елементів $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_M\}$,

матриця оцінок $R = \{r_{ij}\}_{N \cdot M}$, $i = 1, 2, \ldots, N, j = 1, 2, \ldots, M$. Потрібно зауважити, що не всі елементи даної матриці заповнені.

Алгоритм рекомендаційної системи повинен спрогнозувати значення пропущених елементів матриці на основі вже існуючих елементів матриці.

Загалом, колаборативна фільтрація використовує шкалу схожості для пошуку активних сусідів користувачів і кандидатів у спільні елементи. Для цього використовуються різні методи схожості: кореляційні моделі та методи на основі відстані між елементами [10,11].

Кореляційний метод у рекомендаційних системах ґрунтується на виявленні залежностей між вподобаннями користувачів або характеристиками об'єктів на основі статистичних показників. Основна ідея цього підходу полягає у визначенні схожості між користувачами шляхом обчислення коефіцієнта кореляції, такого як коефіцієнт Пірсона або косинусна міра подібності.

Кореляція Пірсона обчислює кореляцію між двома елементами та визначає їхню схожість на основі моделей їх сумісної появи. Коефіцієнт кореляції Пірсона (r) є мірою міцності лінійного зв'язку між двома змінними. Він коливається від –1 до 1, де 1 означає ідеальну позитивну кореляцію, –1 означає ідеальну негативну кореляцію, а 0 означає відсутність кореляції. Коефіцієнт кореляції Пірсона використовується для порівняння схожості між двома об'єктами.

$$P(u,v) = \frac{\sum_{i \in I} (r_{ui} - \overline{r}_u)(r_{vi} - \overline{r}_v)}{\sqrt{\sum_{i \in I} (r_{ui} - \overline{r}_u)^2 (r_{vi} - \overline{r}_v)^2}} \qquad (1)$$

У випадку колаборативної фільтрації метод дозволяє визначати користувачів зі схожими уподобаннями та рекомендувати об'єкти, які вони оцінили позитивно, іншим користувачам зі схожим профілем.

При застосуванні кореляційного методу потребує врахування низки викликів, таких як проблема розрідженості матриці оцінок та можливий вплив шуму в даних.

Для побудови рекомендаційної системи пропонується використовувати регуляризацію. Удосконалення кореляційного методу за допомогою регуляризації дозволяє підвищити його стабільність та точність. Регуляризація дає змогу зменшити вплив проблем кореляційного методу, додаючи штрафний елемент до розрахунку кореляції, що забезпечує стабільність коефіцієнта, особливо за наявності малої кількості даних.

Формула регуляризованого коефіцієнта кореляції Пірсона має вигляд

$$r_{reg} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i (x_i - \overline{x})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_i (x_i - \overline{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_i (y_i - \overline{y})^2} + \lambda}, \qquad (2)$$

де λ –параметр регуляризації, який контролює рівень штрафу за невелике число спостережень; n – кількість спільних об'єктів (наприклад, рейтингів користувачів).

Регуляризація дозволяє «згладжувати» значення кореляції для пар із невеликою кількістю спостережень, зменшуючи їх вплив на рекомендації.

Значення λ підбирається експериментально, залежно від характеру даних.

Для наборів даних із високим рівнем шуму рекомендується більший λ, щоб зменшити вплив екстремальних значень. У випадках, коли більшість користувачів взаємодіє з великою кількістю продуктів, можна використовувати менший λ. Уявімо двох користувачів, які оцінюють лише кілька спільних продуктів. У класичному підході їхній коефіцієнт кореляції може бути високим, навіть якщо ці оцінки випадкові. Регуляризація зменшує цей коефіцієнт, відображаючи недостатність даних для точного визначення схожості.

Регуляризація має певні переваги. Розглянемо їх детальніше.

Вона забезпечує стабільність результатів, тобто зв'язки для пар із малою кількістю спостережень мають зменшену оцінку. Зменшується вплив аномалій, штрафний параметр компенсує вплив екстремальних значень.

Регуляризація може легко поєднуватися з іншими методами вдосконалення, такими як зважування чи кластеризація.

Удосконалений кореляційний метод із регуляризацією забезпечує кращу точність рекомендаційних систем, особливо для даних із малою кількістю спостережень чи високою варіативністю. Таке вдосконалення дозволяє уникати недоліків класичного підходу, зберігаючи його простоту та інтуїтивність.

Для дослідження запропонованого методу було проведено експеримент на основі згенерованих даних. Це дало б змогу з'ясувати, чи покращується рекомендація при використанні регуляризованого методу. При проведенні експерименту досліджувалось різні вхідні параметри: розмір матриці рекомендацій, заповненість даної матриці даними.

Для оцінки рекомендацій використовувались такі міри якості [10, 12].

MAE (Mean Absolute Error) визначає середню похибку між передбаченими та реальними рейтингами.

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|r_i - \hat{r}_i\right|, \qquad (3)$$

де N – кількість прогнозованих рейтингів; r_i – реальний рейтинг; $\hat{r}_i$ – передбачений рейтинг

Менші значення MAE означають кращу якість рекомендацій.

RMSE (Root Mean Squared Error) вимірює середньоквадратичну похибку передбачених рейтингів.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(r_i - \hat{r}_i)^2}. \qquad (4)$$

Даний показник є більш чутливим до великих помилок на відміну від MAE.

Перш за все досліджувалось вплив загальної кількості користувачів на точність рекомендацій. У рамках експерименту було обрано різні розміри матриці оцінок, змінюючи кількість користувачів у діапазоні від 15 до 100. Кількість товарів змінювалася пропорційно, щоб підтримувати прийнятне співвідношення між користувачами та об'єктами.

Збільшення кількості користувачів дає змогу оцінити роботу алгоритму за умов підвищеного навантаження та перевірити, чи зберігається стабільність рекомендацій. Водночас аналіз при малих значеннях U дозволяє визначити ефективність методу в ситуаціях із обмеженою кількістю даних. Це має ключове значення для порівняння різних підходів та вибору оптимальних параметрів моделі.

Результати експерименту, проведеного за співвідношенням користувачів до об'єктів оцінювання 2:1, наведені на рис. 2 (за умови відсутності 30 % рекомендацій).

Отримані результати показують, що зі збільшенням кількості користувачів, але збереженням співвідношення між користувачами та об'єктами оцінювання, регуляризований метод демонструє дещо кращу ефективність порівняно з методом Пірсона. Значення критерію MAE для удосконаленого методу знаходиться в діапазоні від 1,35 до 1,66, а RMSE змінюється в межах від 1,75 до 2,15. Це свідчить про стабільність методу при формуванні рекомендацій.

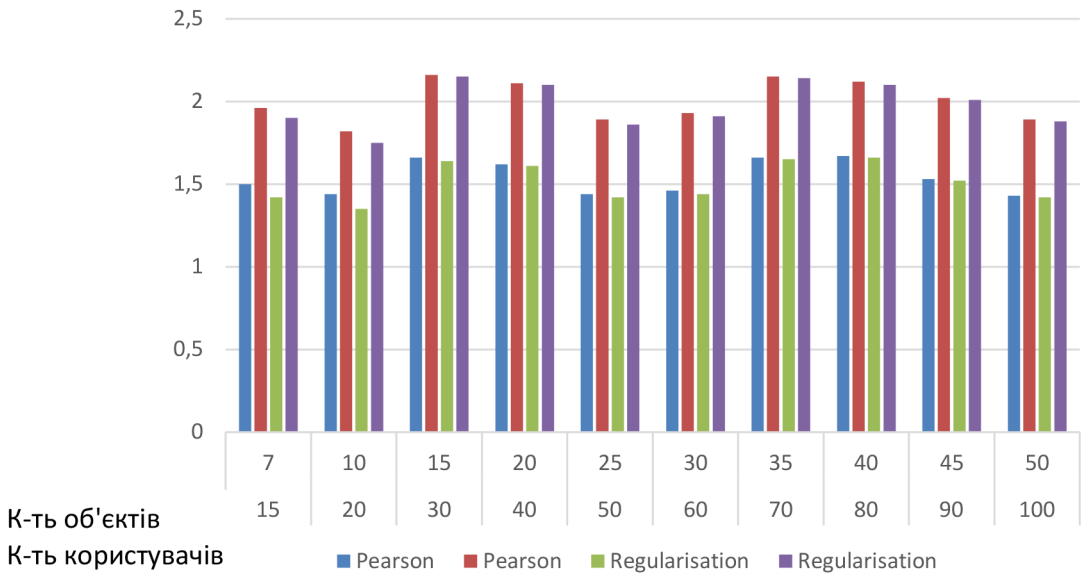


Рис. 2. Порівняння критеріїв оцінки рекомендацій для кореляції Пірсона та удосконаленого методу для різної кількості користувачів

Дослідження роботи методів при зміні співвідношення між кількістю користувачів та кількістю об'єктів оцінювання (рис. 3) показало, що вдосконалений метод перевершує метод Пірсона в середньому на 1,27 в.п. Крім того, варто зазначити, що зі збільшенням кількості оцінюваних об'єктів похибка рекомендаційної системи зменшується. Це пояснюється тим, що система має ширший набір даних, що дає змогу точніше визначати схожість між користувачами та формувати більш релевантні рекомендації.

Подальший аналіз удосконаленого методу був спрямований на зміну загального відсотку пропущених оцінок (рис. 4). Експеримент відбувався при кількості користувачів 50, та предметів для оцінювання – 10.

Проведений експеримент показує, що удосконалений метод покращує визначення рекомендацій у всіх випадках. Найкращі результати узагальнений метод показує при частці пропущених оцінок від 0,3 до 0,55. При майже заповненій матриці рекомендацій обидва методи працюють достатньо добре. Також якість рекомендації знижується при збільшенні частки пропущених оцінок до 60 %.

Отже, удосконалений метод ефективніше відновлює пропущені значення та враховує додаткову інформацію, що сприяє точнішому формуванню рекомендацій. Натомість метод Пірсона виявляється менш стійким до неповноти даних, оскільки класичний підхід до кореляції не дозволяє ефективно обробляти пропущені значення.

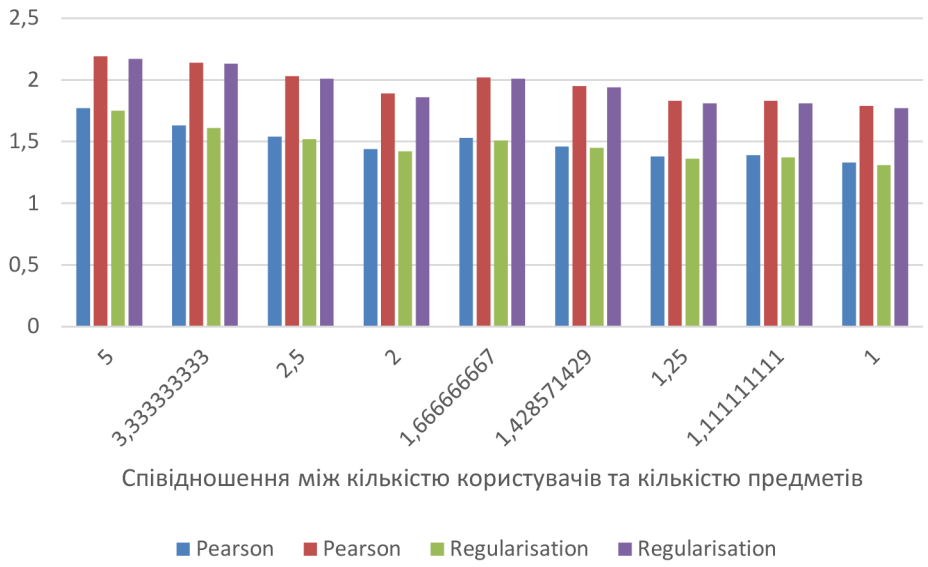


Рис. 3. Порівняння критеріїв оцінки рекомендацій для кореляції Пірсона та удосконаленого методу для різних співвідношень між користувачами та об'єктами для оцінки

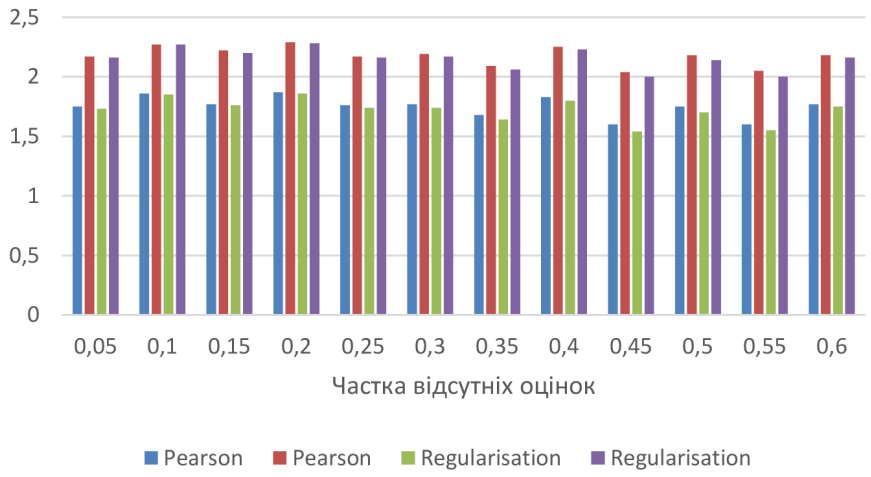


Рис. 4. Порівняння критеріїв оцінки рекомендацій для кореляції Пірсона та удосконаленого методу для різної частки відсутніх оцінок

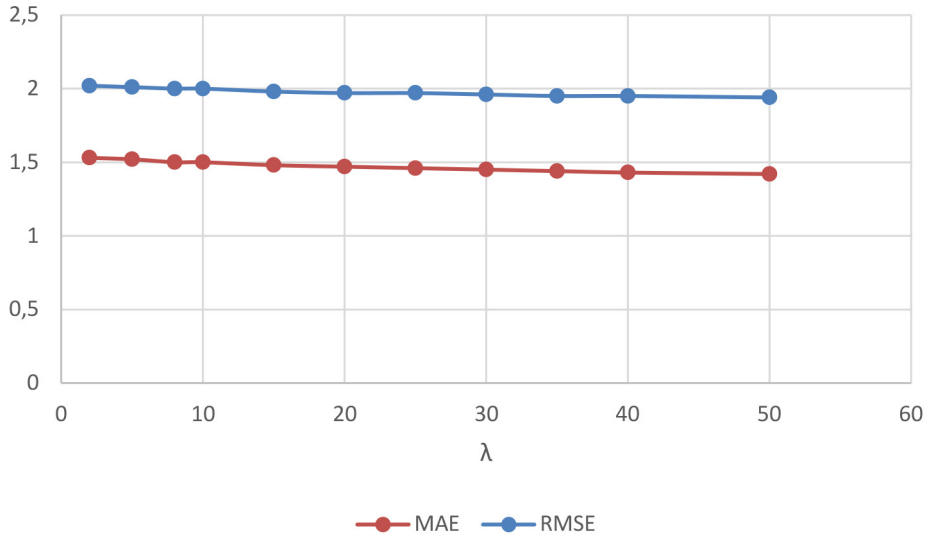


Рис. 5. Залежність похибок прогнозу від значення коефіцієнта регуляризації

При майже заповненій матриці обидва методи демонструють схожу ефективність, оскільки наявність достатньої кількості даних забезпечує точніші обчислення. У такій ситуації різниця між підходами мінімізується, адже обидва методи оперують майже повною інформацією для визначення подібності між користувачами чи товарами. Однак, коли частка пропущених оцінок перевищує 55 %, якість рекомендацій значно погіршується. Це пов'язано з тим, що розріджена матриця містить недостатньо інформації для точних прогнозів. Навіть удосконалені методи в таких умовах стикаються з проблемою обмеженої кількості зв'язків між користувачами та товарами, що ускладнює побудову надійних рекомендацій.

Порівняємо результати роботи обох методів для різних значень параметра регуляризації. Порівняння будемо здійснювати для кількості пропущених значень 30 % та для 50 користувачів з 20 об'єктами для рекомендацій (рис. 5).

Отримані результати свідчать про те, що коефіцієнт регуляризації покращує результати оцінки рекомендацій. В той же час при великих значеннях даного коефіцієнту результати роботи методу практично не покращуються.

Таким чином, проведені експерименти засвідчують, що удосконалений метод в усіх випадках показує кращі результати порівняно з класичним методом кореляції Пірсона. В той же час найкращі результати досягаються при частці відсутніх оцінок від 0,3 до 0,55 та коефіцієнті регуляризації від 10 до 40. Для інтернет-магазинів має сенс використовувати регуляризовану кореляцію, оскільки вона більш точно передбачає рекомендації при відсутності значної кількості оцінок.

Висновки. У ході дослідження було проаналізовано та експериментально перевірено ефективність удосконаленого кореляційного методу. Отримані результати показали, що регуляризація дозволяє підвищити якість рекомендацій, особливо у випадку розріджених матриць. Це зумовлено тим, що класичний метод Пірсона чутливий до відсутніх значень, тоді як удосконалений підхід враховує додаткову інформацію, що забезпечує стабільність результатів. Незважаючи на загальну ефективність удосконаленого методу, при значній кількості пропущених значень (понад 55 %) спостерігається помітне зниження точності рекомендацій. Власне усе зазначене вказує на необхідність додаткових механізмів обробки розріджених даних, таких як комбінування різних методів або застосування нейронних мереж.

Список літератури:

1. Anwar T., Uma V. Comparative study of recommender system approaches and movie recommendation using collaborative filtering. *Int. J. Syst. Assurance Eng. Manage.*, vol. 12, no. 3, pp. 426–436, Jun. 2021, doi: 10.1007/s13198-021-01087-x

2. Campos P., Pinto E., Torres A. Rating and Perceived Helpfulness in a Bipartite Network of Online Product Reviews. Cham, Switzerland:Springer, 2023, doi: 10.1007/s10660-023-09725-1

3. Haruna K., Akmar I. M., Damiasih D., Sutopo J., Herawan T. A Collaborative Approach for Research. *Paper Recommender System. PLoS ONE*. 12 (10), e0184516 (2017). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184516

4. Mallouk I., Abou el Majd B., Sallez Y.A generic model of the information and decisional chain using Machine Learning based assistance in a manufacturing context. *Mathematical Modeling and Computing*. 10(4), 1023–1036 (2023).

5. Lin K., Sonboli N., Mobasher B., Burke R. Calibration in collaborative filtering recommender systems: a user-centered analysis. *Proceedings of the 31st ACM Conference on Hypertext and Social Media*, pp. 197–206, 2020.

6. Meyer F. Recommender systems in industrial contexts. Thèse de Doctorat, University of Grenoble, France. 6, 21. 2012.

7. Le W., Cao J., Wu J. Huang C., Buyya R. A collaborative filtering recommendation method based on discrete quantum-inspired shuffled frog leaping algorithms in social networks. *Future Generation Computer Systems*. Volume 88, November 2018. https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.008

8. Li Z., Huang M., Zhang Y. A collaborative filtering algorithm of calculating similarity based on item rating and attributes. *Proc. – 2017 14th Web Inf. Syst. Appl. Conf*. WISA 2017, vol. 2018–Janua, pp. 215–218, 2018.

9. Mahesh T.R., Vivek V., Kumar V.V. Recommendation Systems: Different Techniques, Challenges and Future Directions. *International Journal of Information Technology, Research and Applications*, 2022. vol. 1, no. 2, pp. 1–8.

10. Hassanieh L., Abdo J.B., Demerjian J. Similarity Measures for Collaborative Filtering Recommender Systems, 2018.

11. Wang Y., Deng J., GaoJ., Zhang P. A hybrid user similarity model for collaborative filtering. *Inf. Sci. (Ny)*., 2017. vol. 418–419, pp. 102–118. https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.07.040

12. Kumar P., Gupta M., Rao C., Bhavsingh M., Srilakshmi M. A Comparative Analysis of Collaborative Filtering Similarity Measurements for Recommendation Systems. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2023. 11. 184-192. 10.17762/ijritcc.v11i3s.6180

Sherstiuk I.O., Holubiev L.P. RECOMMENDATION SYSTEM BASED ON AN IMPROVED CORRELATION ALGORITHM

The article discusses the development of a recommendation system that uses correlation analysis and regularization parameters to improve the accuracy of recommendations. Recommender systems are an important tool in the field of e-commerce, streaming services, and social networks, as they help users find products or content that they are interested in. The paper considered the main methods of recommendations, in particular, collaborative filtering and the correlation approach. Collaborative filtering is one of the most popular methods for building recommendations. It is based on a matrix of user ratings of certain elements. The correlation method is aimed at determining ratings for missing values based on the similarity of user preferences. The article highlights the problems associated with data sparsity and ways to overcome them. The main problem of traditional methods is the sparsity of the rating matrix, which makes it difficult to find similar users and objects. To solve this problem, regularization was used, which helps to reduce the impact of sparsity on the accuracy of recommendations. During the experimental study, the effectiveness of regularization was tested on synthetic datasets. The analysis showed that the use of regularization improves the quality of recommendations, especially for data with a large number of missing values. The results obtained show that the more sparse the matrix, the greater the positive effect of regularization. The dependence of the quality of recommendations on the value of the regularization parameter was also studied. Algorithms for calculating the similarity between users and recommendations based on their preferences were implemented. The results obtained confirm the feasibility of using the regularized method for building recommendation systems. The proposed solution allows you to increase the accuracy of recommendations without significantly complicating the computational model.

Key words: *recommendation system, correlation methods, regularization, collaborative filtering.*

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 66.092-977
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/32

Головенко В. О.
Український державний університет науки і технологій

Коваль Д. С.
Український державний університет науки і технологій

Ясногор М. В.
Український державний університет науки і технологій

Приходько Д. М.
Український державний університет науки і технологій

Андріянова М. В.
Український державний університет науки і технологій

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ НА ВИХІД ОТРИМАНИХ ПРОДУКТІВ

Проблема утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) є однією з найважливіших екологічних та соціальних викликів сучасного світу. Щорічно у світі накопичуються мільярди тонн відходів, і їх кількість невпинно зростає через урбанізацію, збільшення чисельності населення та розвиток економіки. Традиційні методи, такі як захоронення на полігонах та спалювання, мають низку суттєвих недоліків. Полігони займають значні площі земель, спричиняють забруднення ґрунту, підземних вод та атмосферного повітря через виділення шкідливих газів, що є одним із основних факторів глобального потепління. Спалювання відходів, хоча й зменшує їх обсяг, супроводжується викидами токсичних речовин, таких як діоксини і фурани, що негативно впливають на здоров'я людини та навколишнє середовище.

У зв'язку з цим необхідно шукати альтернативні, більш екологічні та енергоефективні методи переробки ТПВ. Одним із найбільш перспективних способів є піроліз – процес термічного розкладання органічних матеріалів без доступу кисню. На відміну від традиційного спалювання, піроліз дозволяє отримувати корисні продукти: піролізний газ, рідке паливо та вуглецевий залишок. Отримані речовини можуть бути використані у промисловості та енергетиці, що сприяє зменшенню споживання традиційних викопних енергоресурсів. Крім того, піроліз дозволяє значно скоротити обсяги відходів і мінімізувати їх негативний вплив на довкілля. Ця технологія відповідає принципам циркулярної економіки, яка передбачає повторне використання ресурсів та зменшення кількості відходів. У країнах Європи та світу піроліз активно впроваджується як екологічно чистий метод утилізації відходів, проте в Україні ця технологія поки що не набула широкого поширення. Важливим завданням є оцінка економічної доцільності та перспективи впровадження піролізу в нашій державі.

У роботі досліджено та встановлено оптимальні умови піролізу поліпропілену – 550 °С протягом 60 хв. За таких умов вихід піроконденсату складає 85–90 %, газу до 10 % та залишок 1–2 %. Показано, що густина піроконденсату не залежить від часу піролізу. Так, при зростанні температури піролізу поліпропілену густина піроконденсату зростає, і продукти отримані при температурі 650 °С та вище тверді.

Ключові слова: *піроліз, поліпропілен, піроконденсат, піролізна олива, синтетична нафта, альтернативне паливо.*

Постановка проблеми. В останній час накопичення пластикових відходів є глобальною екологічною проблемою, яка загрожує природі та здоров'ю людей [1–3]. Щорічно у світі виробляється понад 400 мільйонів тонн пластику, значна частина якого після короткочасного використання потрапляє на звалища, у водойми та ґрунти. Пластик має надзвичайно довгий період розкладу – від сотень до тисяч років, що призводить до його постійного накопичення в екосистемах. Забруднення пластиковими відходами спричиняє деградацію довкілля, знищення біорізноманіття та потрапляння мікропластику в харчові ланцюги. Традиційні методи утилізації, зокрема захоронення або спалювання, не вирішують проблему ефективно: сміттєзвалища займають великі території, а спалювання утворює токсичні викиди в атмосферу. Одним із перспективних методів боротьби з накопиченням пластику є піроліз – процес термічного розкладання полімерів за високих температур без доступу кисню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Піроліз є однією з перспективних технологій утилізації твердих побутових відходів, що дозволяє отримувати корисні продукти: синтетичне паливо, газ і вуглецевий залишок [1–4]. На відміну від традиційного спалювання, цей процес проходить без доступу кисню, що мінімізує викиди шкідливих речовин. Однак, попри очевидні переваги, широке впровадження піролізу стикається з низкою проблем. Основними викликами є висока вартість обладнання, складність впровадження технології на державному рівні та необхідність попереднього сортування відходів [2, 3]. Також існують технічні труднощі, пов'язані з неоднорідністю складу ТПВ, що впливає на ефективність процесу. Крім того, в Україні та багатьох інших країнах бракує належного законодавчого регулювання та фінансової підтримки таких ініціатив. Для розв'язання цих проблем необхідно розробляти ефективніші технологічні рішення, залучати інвестиції та вдосконалювати екологічну політику, спрямовану на стимулювання впровадження піролізу

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення оптимальних умов для максимізації виходу цінних продуктів у процесі піролізу поліпропілену, а також дослідження фізико-хімічних властивостей отриманого піроконденсату.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження впливу температури та часу піролізу на вихід продуктів провели планування експерименту в результаті реалізації якого побудували математичну модель.

Для проведення експериментальних досліджень, результати яких дозволяють розрахувати коефіцієнти рівнянь регресії, тобто залежності для: виходу рідкого продукту піролізу $Y_n = f(t, \tau)$, виходу газу піролізу $Y_г = f(t, \tau)$, виходу залишку піролізу $Y_з = f(t, \tau)$, густини продукту піролізу $Y_\rho = f(t, \tau)$ від температури та часу піролізу вибрали центральний композиційний рототабельний план.

Інтервал та межі варіювання факторів експерименту наведені у табл. 1.

Повна матриця центрального композиційного рототабельного плану експерименту в кодованому вигляді представлена в табл. 2.

Для обґрунтування технологічних параметрів процесу піролізу та встановлення закономірностей зміни виходу продуктів піролізу, властивостей продуктів піролізу в залежності від температури (t, °C) та від часу процесу (τ, хв.) провели лабораторні експериментальні дослідження процесу піролізу та отриманих продуктів.

Невідомі коефіцієнти рівнянь регресії визначали за формулами композиційного рототабельного плану. Оцінку значимості коефіцієнтів рівнянь регресії перевіряли за допомогою t-критерію Стьюдента. Статистично не значимі коефіцієнти були відкинуті.

Функції відклику, які відображають залежність виходу рідкого продукту піролізу Y_p, виходу газу піролізу $Y_г$ та виходу залишку $Y_з$ в залежності від

Таблиця 1

Кодування факторів та рівні їх варіювання при проведенні експериментів згідно центрального композиційного рототабельного плану

Рівні факторів	Кодовані значення		Натуральні значення	
	x_1	x_2	температури піролізу, °C	часу піролізу, хв.
Нульовий рівень	0	0	550	60
Інтервал варіювання	1	1	100	20
Верхній рівень	+1	+1	650	80
Нижній рівень	1	1	450	40
Зіркові точки (+)	+1,41	+1,41	690	90
Зіркові точки (+)	1,41	1,41	410	30

Таблиця 2

План-матриця проведення експериментів центрального композиційного рототабельного плану

Групи дослідів	Номер досліду	Рівні факторів						Параметр оптимізації, Y
		x_0	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	x_1^2	x_2^2	
Повний факторний експеримент	1	+1	–1	–1	+1	+1	+1	Y_1
	2	+1	+1	–1	–1	+1	+1	Y_2
	3	+1	–1	+1	–1	+1	+1	Y_3
	4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y_4
Досліди на «зіркових» точках	5	+1	+1,41	0	0	2	0	Y_5
	6	+1	1,41	0	0	2	0	Y_6
	7	+1	0	+1,41	0	0	2	Y_7
	8	+1	0	1,41	0	0	2	Y_8
Досліди у центрі плану експерименту	9	+1	0	0	0	0	0	Y_9
	10	+1	0	0	0	0	0	Y_{10}
	11	+1	0	0	0	0	0	Y_{11}
	12	+1	0	0	0	0	0	Y_{12}
	13	+1	0	0	0	0	0	Y_{13}

температури процесу піролізу та від часу процесу в кодованих значеннях змінних факторів набули такого вигляду:

– вихід рідкого продукту піролізу, % (значимість коефіцієнтів складає 90 %)

$$Y_p = 86,4993 + 18,9686x_1 + 6,9568x_2 + \\ + 7,2909x_1x_2 - 36,4834x_1^2 - 5,8689x_2^2; \quad (1)$$

– вихід газу піролізу, % (значимість коефіцієнтів складає 99 %)

$$Y_г = 6,923 + 10,0428x_1 + 3,9152x_1^2; \quad (2)$$

– вихід залишку піролізу, % (значимість коефіцієнтів складає 95 %)

$$Y_з = -32,9251x_1 + 25,3853x_1^2. \quad (3)$$

Після перекодування, проведення перетворень і спрощень регресії для Y_p, $Y_г$, $Y_з$ в натуральних величинах технологічних параметрів набувають такого вигляду:

– вихід рідкого продукту піролізу, %

$$Y_p = -1078,6402 + 4,057t - 0,3223\tau + \\ + 0,0024t\tau - 0,0036t^2 - 0,0065\tau^2; \quad (4)$$

– вихід газу піролізу, %

$$Y_г = 70,1124 - 0,3302t + 0,0004t^2; \quad (5)$$

– вихід залишку піролізу, %

$$Y_з = 949 - 3,1t + 0,0025t^2. \quad (6)$$

Після перевірки адекватності отриманих моделей даного технологічного процесу піролізу за F-критерієм Фішера виявилось, що F_p менше $F_{табл.}$, то гіпотеза про адекватність рівнянь регресії була прийнята.

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу піролізу (змінних факторів) на вихід продуктів побудували графіки залежності від змінних факторів.

Вплив температури та часу на процес піролізу. Отримані рівняння регресії (1) та (4) показують, що на вихід піроконденсату впливає як температура процесу, так і час. Слід відмітити, що температура процесу піролізу більш суттєво впливає (рис. 1), ніж час процесу. Вплив часу на вихід піролізної оливи дещо підвищується при збільшенні температури піролізу від 550 °С до 690 °С. Час процесу піролізу залежить від наважки сировини, враховуючи, що наважка в дослідах була в межах 50–55 г при досягненні часу в 60 хв. вихід піроконденсату виходить на плато. Подальше проведення процесу не призводить до збільшення виходу рідкого продукту.

Залежність виходу піролізної оливи від температури процесу піролізу має екстремальний характер та досягає максимуму вже при 550 °С при подальшому збільшенні температури до 620 °С вихід не збільшується, а з зростанням температури понад 620 °С навіть зменшується (рис. 1). Це пояснюється збільшенням виходу піролізного газу.

Виходячи з вище перерахованого оптимальні умови для забезпечення максимального виходу рідкого продукту піролізу 550 °С та 60 хв.

Вихід газу при піролізі поліпропілену не залежить від часу процесу про що свідчить відсутність даного фактору в рівняннях регресії (2) та (5). З ростом температури процесу піролізу вихід газу зростає по експоненті (рис. 2). Слід відмітити, що нахил дотичної до графіку (рис. 2, крива 1) в інтервалі температур 410–550 °С значно менше

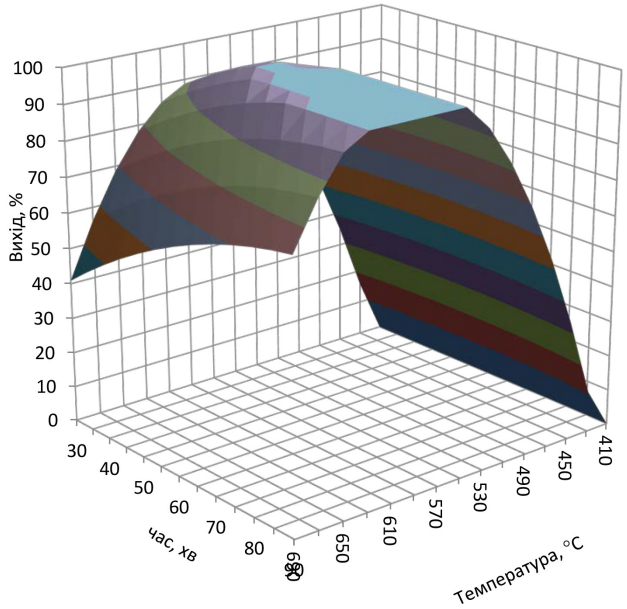


Рис. 1. Залежність виходу піроконденсату від температури та часу процесу піролізу поліпропілену

ніж в інтервалі 550–690 °С, що свідчить про збільшення швидкості виділення газу при температурі понад 550 °С.

Рівняння регресії (3) та (6), що характеризують вихід залишку процесу піролізу, також не містять фактору часу, отже він не впливає на його вихід. З ростом температури піролізу вихід залишку зменшується, що відповідно свідчить про степінь проходження процесу та досягає мінімуму при 550 °С. Це свідчить про те, що температури 550 °С достатньо для проведення процесу піролізу поліпропілену (рис. 2, крива 2).

Таким чином оптимальними умовами для проведення повного піролізу поліпропілену з максимальним виходом піролізної оливи та помірним виділенням газу 550 °С 60 хв. Час процесу буде зростати при збільшенні наважки, що піддається піролізу.

Характеристика продуктів піролізу поліпропілену. Слід відмітити, що зразки отримані при температурі 650 °С та 690 °С при охолодженні до температури 25 °С мають твердий агрегатний стан, як м'який парафін. Для продуктів піролізу були виміряні: густина, показник заломлення, молекулярна маса та вміст ненасичених. Показник заломлення був у межах 1,442–1,454, молекулярна маса – 270–345 кг/кмоль, вміст ненасичених – 5–12 %.

Залежність густини продуктів піролізу Y_ρ (г/см^3) від температури та від часу процесу за результатами проведеного рототабельного центрального композиційного планування експерименту в кодо-

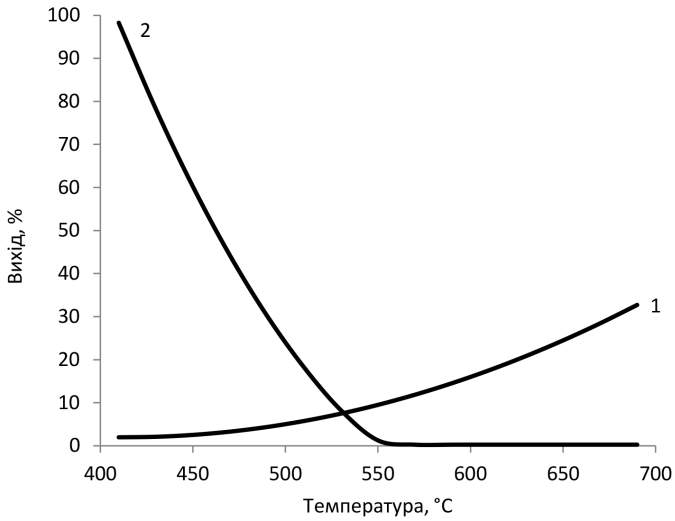


Рис. 2. Залежність виходу газу (1) та залишку (2) від температури процесу піролізу поліпропілену

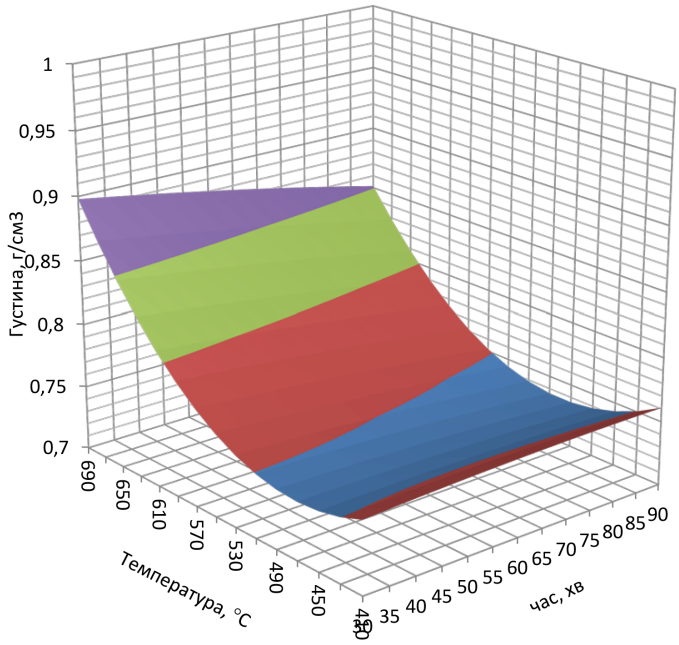


Рис. 3. Залежність густини піроконденсату від температури та часу процесу піролізу поліпропілену

ваних значеннях змінних факторів набули такого вигляду (значимість коефіцієнтів складає 99 %):

$$Y_\rho = 0,7715 + 0,0415x_1 + 0,0048x_2 - \\ - 0,0092x_1x_2 + 0,0317x_1^2 + 0,0019x_2^2 \quad (7)$$

Після перекодування, проведення перетворень і спрощень регресія для Y_ρ в натуральних величинах технологічних параметрів набуває такого вигляду:

$$Y_\rho = 1,399 - 0,00289t + 0,00159\tau + \\ + 0,0000031t\tau + 0,0000032t^2 - 0,0000021\tau^2. \quad (8)$$

Для дослідження впливу температури та часу процесу піролізу на густину цільового продукту піролізу поліпропілену побудували графік залежності від змінних факторів (рис. 3).

Густина піроконденсату не суттєво залежить від часу піролізу. В цілому час процесу піролізу залежить від наважки, що піддається піролізу. При збільшенні температури процесу від 410 °С до 510 °С густина піроконденсату дещо зменшується але несуттєво 0,76–0,73 г/см^3 в межах допустимих до одного виду палива. В інтервалі температур 510 °С до 690 °С густина піроконденсату змінюється вже суттєво, це дає змогу отримувати різні продукти в залежності від їх призначення та подальшого застосування. При збільшенні температури піролізу густина піроконденсату зростає, це пояснюється тим, що при більшій температурі молекули з більшою молекулярною масою здатні випаровуватись. Саме тому продукти отримані при 650 °С та 690 °С при н.у. знаходяться в твердому стані, їх можна віднести до парафінів.

Висновки. Встановлено оптимальні умови піролізу поліпропілену 550 °С 60 хв., при цьому вихід піроконденсату 85–90 %, газу до 10 % та залишок 1–2 %. Подальше збільшення температури приводить до зменшення виходу рідкого продукту та збільшенню виходу піролізного газу. Час піролізу буде зростати при збільшенні наважки.

Показано, що густина піроконденсату не залежить від часу піролізу. При зростанні температури піролізу поліпропілену густина піроконденсату зростає. Продукти отримані при температурі 650 °С та вище тверді.

Список літератури:

1. Hasan M.M., Rasul M.G., Khan M.K., Ashwath N., Jahirul M.I. Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. V.145. P. 54–65.

2. Yufeng Du, Tongyao Ju, Yuan Meng, Tian Lan, Siyu Han, Jianguo Jiang. A review on municipal solid waste pyrolysis of different composition for gas production. *Fuel Processing Technology*. 2021. V. 224. P. 79–87.

3. Miteva K. Production of sustainable energy from solid waste by pyrolysis: A review. *Recycling and Sustainable Development*. 2019. V. 12. P. 69–77.

4. Holovenko V. O., Andriianova M. V., Roienko K. V., Roienko Yu. S. Pyrolysis of solid polymer waste and properties of obtained products. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2022. № 4. P. 24–30.

Holovenko V. O., Koval D. S., Yasnohor M. V., Prykhodko D. M., Andriianova M. V.

INFLUENCE OF THE PARAMETERS PROCESS ON PRODUCTS YIELD OF SOLID HOUSEHOLD WASTE PYROLYSIS

The problem of solid waste (SW) disposal is one of the most important environmental and social challenges of the modern world. Billions of tons of waste accumulate in the world every year, and their amount is constantly growing due to urbanization, population growth and economic development. Traditional methods, such as landfilling and incineration, have a number of significant drawbacks. Landfills occupy significant areas of and, cause pollution of soil, groundwater and atmospheric air due to the release of harmful gases, which is one of the main factors of global warming. Incineration of waste, although it reduces its volume, is accompanied by emissions of toxic substances, such as dioxins and furans, which negatively affect human health and the environment.

In this regard, it is necessary to look for alternative, more environmentally friendly and energy-efficient methods of MSW processing. One of the most promising methods is pyrolysis – the process of thermal decomposition of organic materials without access to oxygen. Unlike traditional combustion, pyrolysis allows you to obtain useful products: pyrolysis gas, liquid fuel and carbon residue. The resulting substances can be used in industry and energy, which helps reduce the consumption of traditional fossil energy resources. In addition, pyrolysis allows you to significantly reduce the volume of waste and minimize its negative impact on the environment. This technology complies with the principles of a circular economy, which involves the reuse of resources and reducing the amount of waste. In European and world countries, pyrolysis is actively implemented as an environmentally friendly method of waste disposal, but in Ukraine this technology has not yet become widespread. An important task is to assess the economic feasibility and prospects for the implementation of pyrolysis in our country.

The work establishes the optimal conditions for pyrolysis of polypropylene – 550 °C for 60 minutes. Under such conditions, the yield of pyrocondensate is 85–90 %, gas up to 10 % and residue 1–2 %. It is shown that the density of pyrocondensate does not depend on the pyrolysis time. Thus, with increasing temperature of pyrolysis of polypropylene, the density of pyrocondensate increases, and the products obtained at a temperature of 650 °C and above are solid.

Key words: *pyrolysis, polypropylene, pyrocondensate, pyrolysis oil, synthetic oil, alternative fuel.*

UDC 628.19
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/33

Dychko A. O.
Taurida National V. I. Vernadsky University

Yeremeyev I. S.
Taurida National V. I. Vernadsky University

Remez N. S.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Barabash O. V.
National Transport University

Minaieva Yu. Yu.
Taurida National V. I. Vernadsky University

ANALYSIS OF RISKS TO THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF WATER TREATMENT

The paper provides the algorithm for effective recognizing the dangerous factors in water treatment complex systems functioning, caused by possible emergencies and catastrophes or terrorism threats. Environmental safety risks include the emissions of pollutants that lead to the formation of toxic compounds. An important aspect is the impact on the stability of engineering and technical facilities, which can result in accidents and disasters. Anthropogenic factors, earthquakes, and fires cause hazardous changes in the natural environment, disrupting the engineering and geotechnical stability of the foundations of critical infrastructure objects and creating preconditions for emergency situations. The emissions of pollutants from technogenic processes have affected the safety of the environment, air, surface water, and groundwater, and the presence of untreated sewage in rivers has exacerbated environmental risks, as highlighted. Modern environmental monitoring and information processing systems are largely based on artificial intelligence systems in order to guarantee maximum environmental safety. One of the main problems of such systems is identification, which can be solved by using associations and analogies for an appropriate risk assessment process. The search for associations should be done with the help of heuristics. The application of the mentioned heuristics enables a rapid assessment of the scale and degree of terrorism threats to wastewater treatment processes and other complex technical systems. This approach facilitates the early identification of potential issues and ensures effective recognition of situations arising in real conditions due to changes in external factors, recognition system configurations, object behavior parameters, and system objectives. Heuristics are the most effective and flexible tools for formalizing relationships between associations and relationships. The heuristics for minimizing the impact of terrorist threats in water treatment that should be considered when making decisions under unclear and incomplete information are presented.

Key words: *risk, water treatment, heuristics, associations, analogies.*

Introduction. The environmental safety risks include the emissions of pollutants, which lead to the formation of toxic dangerous substances. The significant is the impact on sustainability of engineering technical objects and possible emergencies and catastrophes on these objects. As a result of anthropogenic or earthquakes, fires and demolitions of constructions and buildings the dangerous changes in the natural environment are observed. Thus the engineering-geotechnical stability of the foundation of critical infrastructure objects is disturbed and the emergencies take place [1].

The mechanical impact on the environment (as a result of mining, the movement of heavy machinery and equipment, the constructions, etc.), effects disturb of the soil structure, which leads to its erosion [2–3]. As a result of equipment breakdowns and accidents, chemical soil pollution occurs, which causes secondary chemical reactions in the environment, capable not only of polluting the soil, but also of

destroying the useful microflora that restores the soil and forms humus. The salt and water balance of nutrients absorbed by plants is also disturbed, while the latter die, which also contributes to a decrease in soil fertility and soil erosion.

The most dangerous thing in technogenic disasters for the environment is the ingress of harmful substances into the geological environment, soil and groundwater namely. Usually, a significant excess of the content of carcinogenic substances is recorded, which threatens the health of residents of settlements located near the epicenter. It is necessary to check the water in the wells, because there is a possibility that dirt will get into the groundwater. In such accidents, an excess of benzopropylene content is detected. Sulfuric and sulfurous anhydrides, carbon monoxide, and nitrogen oxide get into the air together with flue gases. Pollutants settle on the soil, surface water, migrate into the ground water, natural reservoirs. That can lead to the impoverishment of species biodiversity in the rivers and ground ecosystems.

This negative trends for the environment is exacerbated by already existing environmental problems, such as inefficient functioning of the treatment equipment. The main pollutants, present in rivers, are heavy metals, groups of pharmaceutical substances, substances containing phosphates, organic substances, agricultural pesticides. In particular, herbicides, insecticides, and fungicides were found in the water. Also, pharmaceuticals were found in the water – such as even ordinary Ibuprofen, traces of antidepressants, antiviral agents etc. [4].

Untreated industrial and communal discharges get into the rivers heavy metal ions, oil and petroleum products from metallurgical and chemical enterprises. The pulp and paper industry, sugar and food productions pollutes rivers with organic substances. This causes a decrease in the concentration of oxygen in the water, which is why fish and vegetation die.

For the timely detection, response and prevention of the consequences of intervention in the geological environment, it is advisable not only to use a traditional system of environmental pollution monitoring, but also to involve artificial intelligence. Modern automated environmental information processing systems should include the artificial intelligence (AI) systems able to analyze changes at the environment state and to react to achieve specific aims. However, one of the main problems of AI systems is the problem of recognition [5–6]. This problem affects many aspects of the functioning of AI systems:

– choosing the optimal information processing technology;

– choosing a target that is located against the background of various types of obstacles (including active, artificial);

– choosing a behavior strategy under conditions of fluctuating environmental conditions; changes in the reaction to certain actions of the researched object; changes in one's condition, etc.;

– recognition of the behavior model of the researched object;

– recognition of the distribution, configuration and degree of threat (toxicity) of the state of the surrounding environment after a natural or man-made accident (catastrophe);

– recognition (estimation) of the parameters of the researched object;

– assessment of recognition risks under conditions of obstacles (natural and artificial) and virtual reconfigurations of the AI system.

The aim of the research is the development of the decision-making approach for recognizing situations that arise in real circumstances in geological environment during the functioning of objects under the conditions of unexpected harsh changes.

Results and discussion. One of an effective means of recognition is the use of analogies, but there is an opinion that hidden biases (on the background of insufficient, limited information) may create a kind of implicit associative bias, which affects on an unconscious level of the making of a wrong decision [7–10]. This opinion is quite valid, but mainly concerns linguistic and philosophical problems – in AI systems, it is necessary to provide a number of measures that are designed to minimize this virtual threat. The use of "hard" algorithms and neural networks to increase the "viability" of intelligent systems and reliability recognition does not exclude the influence of implicit associative biases: a flexible approach is needed, based on a wider use of the theory and methods of fuzzy sets and the methodology of expert systems.

In order to successfully solve the above-mentioned problems, it is worth turning to the idea of association, that is, to the search for a connection between those new, not yet understood concepts, phenomena, information, individual events that are observed, and those facts, phenomena, objects that are already known, but reflected in the mind of the analyst (and in the base of facts or knowledge of the AI system) and fixed as belonging to a completely different sphere that has, it would seem, no relation to what is being observed. Such a connection, if discovered, allows to analyze new information by analogy, that is, to identify the similarity of objects,

phenomena, processes, patterns of behavior, etc. and thus to learn something new, unknown by comparing it with the known, but in a completely different field of knowledge [11].

The main problems associated with the use of analogies are the possible randomness of the selected characteristics of the comparison by analogy, the formality of forecasting by analogy without taking into account specifics, the unjustified predictability of consequences, the historical uniqueness of just one problem, etc. [12]. In order to increase the probability of formal analogy conclusions, requirements for analogies are accepted, such as an increase in quantitative and qualitative features, the non-identity of the analyzed objects, the presence of differences between them, as well as a clear connection between the features of the object and the selected feature – associations.

The search of associations should take place with the help of heuristics, as the most effective and flexible tool for formalizing connections and relationships between certain connections.

As a rule, heuristics can be formulated as follows:

IF {certain unknown event, phenomenon, object, etc. cause a certain association *ASSOC* with known phenomena, events, objects, the description of which, their parameters, behavior patterns, characteristic features, etc. are in the banks of knowledge (*BK*), facts (*BF*) or data (*DB*)}, *THEN* {it is necessary to use the information stored in these banks to simulate by analogy the behavior of these unknown objects (processes) by influencing them with a virtual set of adequate input signals and at the same time to simulate the behavior of a known object (process) under the influence of similar (adequate) virtual signals with a comparison of the results} *AND* {make a decision based on the results of the comparisons regarding the correspondence of the association and the chosen analogy} *AND* {start the procedure for specifying the parameters of the recognized object} *ELSE* {return to the search for another adequate analogies} [13].

To implement the procedure of searching of association of a given unknown phenomenon or an object, a set of virtual (possible) objects (models), that cause association under existing conditions, is used at the same time, of which it is not known in advance. If there is data on the reaction of analog objects under the influence of certain exciting signals at the moment of predicting the behavior of the object that causes association, that is, the values at a certain point (according to each of the models), the actual value of the adequate parameters is determined at this point. This is done at a number of points along the direction of action of the corresponding (virtual) exciting signals. After the reactions are determined at all predetermined points, the real spectrum distribution is compared with the model distribution (for each of the models separately) and a metric is calculated that characterizes the degree of difference between the real and model spectrum distributions for each of the models. The metric corresponding to the smallest value characterizes the optimal model for this case. After that, this optimal model as an associative link can be used and decisions based on the simulation data can be made, and other models can be not used. However, it is necessary to monitor the abrupt changes in the parameters of the environment, as well as the behavior of the researched object. In case of such changes, it is necessary to use all the models again and find the best one (as shown above), etc. The approach is, of course, rather artificial, but it helps each time to find and to use the best of the set of models and, thus making it easier to provide and display the situation, which helps to solve the recognition problem.

The distance between the distribution of the actually determined values y_i and the distribution of the values y_i^m (the Euclidean metric d_E, which correspond to the m-th model) is calculated by the expression:

$$d_E = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (y_i - y_i^m)^2 \right)^{1/2}. \quad (1)$$

The selection of the optimal model M_{opt} corresponds to the condition:

$$M_{opt} = M(U_{j=1}^{m}(\min d_E^i)), \quad (2)$$

where n – number of points at which the parameters of the corresponding models y_i^m and the real object y_i are determined, m – number of the model (association).

As the simplest example, the problem of detecting a virtual terrorist act in the mine wastewater treatment and drainage system can be considered. Under conditions of extraordinary circumstances (floods, earthquakes and other natural disasters, as well as man-made disasters, and, in the case of war – terrorist acts), the situation changes dramatically: water indicators deviate significantly from statistical averages, which requires an adequate response from regulatory bodies and, in some cases, switching to another wastewater treatment technologies, changing modes of operation, possible serious changes in the treated wastewater drainage system, etc. In other words, the model of wastewater treatment and drainage is changing.

In the case of natural and man-made cataclysms, the very fact of the disaster is a signal for a change

in the paradigm of wastewater treatment and treated water drainage (of course, such virtual situations are predicted and modeled). But in the case of terrorist acts, the matter is much more complicated, since simulating the latter is quite difficult, although, in principle, it is possible. It is impossible to predict a terrorist act, neither in terms of the place of its planning and organizing, nor in terms of the direction of actions, nor in terms of the means of carrying out the action. If it is about the use of toxic substances by terrorists, then most of them have no color, smell, or taste, and their content in water is not very easy to detect in real time, even with complex and expensive analyzers. But these substances have one thing in common – they are transported in a concentrated form and have an acidic or alkaline base, that is, they significantly affect the *pH* of water, in addition, they are usually sensitive to the chlorine, which is present in the mine wastewaters [14]. This gives reason to believe that if continuous monitoring of these parameters is organized, then it is quite possible to receive a signal about a terrorist attack in a timely manner and take precautionary measures regarding notification of consumers and emergency services, as well as regarding the minimization of possible consequences for the environmental safety.

It is worth citing, as an example, heuristics for assessing the situation and decision making for the risk minimization that actually occurred:

$$\begin{gathered}\textbf{\textit{IF}}\ (Cl2 \approx 0)\ \textbf{\textit{AND}}\ (|\Delta Cl_2| > (|\Delta Cl_2|\max)\\ \textbf{\textit{AND}}\ (WS = 0)\\ \textbf{\textit{AND}}\ (DC = 1)\ \textbf{\textit{AND}}\ (SC = 1)\ \textbf{\textit{AND}}\ (LE = 1),\\ \textbf{\textit{THEN}}\ (DIAGN)\ \textbf{\textit{ELSE}}\ (TER),\\ \textbf{\textit{IF}}\ (|\Delta pH| > |\Delta pH|\max)\ \textbf{\textit{AND}}\ (Cl_2 > 0)\\ \textbf{\textit{AND}}\ (WS = 0)\\ \textbf{\textit{AND}}\ (LE = 1)\ \textbf{\textit{AND}}\ (RPA = 0),\ \textbf{\textit{THEN}}\ (DIAGN)\\ \textbf{\textit{ELSE}}\ (TER),\end{gathered} \tag{3}$$

where Cl_2 – residual chlorine content in wastewater; $|\Delta Cl_2|$ – absolute value of the increase in residual chlorine during the current monitoring cycle; $|\Delta Cl_2|\max$ – the maximum possible absolute increase in the content of residual chlorine in water (according to long-term statistics); $WS = 0$ – confirmation that there have been no water spills caused by downpours, earthquakes, floods, or tornadoes in the previous few days; $DC = 1$ – confirmation of the fact of normal operation of the wastewater treatment unit; $SC = 1$ – ascertaining the fact that the sealing of the treatment tanks was not broken and there was no spillage of chemical treatment reagents; $LE = 1$ – localization of the place with abnormal indicators is established; *DIAGN* – need for urgent diagnostics of all controlled objects; *TER* – terrorist act; $|\Delta pH|$ – absolute value of the increment of the *pH* indicator; $|\Delta pH|\max$ – the maximum possible absolute value of the increment of the *pH* indicator in water (according to long-term statistics); $RPA = 0$ – no reports of possible accidents associated with the release of significant acidic or alkaline masses into the drainage area.

Usually, risk forecasting takes place on the basis of statistical data on the possible causes of man-made and ecological disasters, as well as various models of functioning, behavior, trees of the development of events, based on various initial data and criteria. However, representative statistical data can be obtained only if there is information on a significant number of cases with clearly defined conditions of the circumstances of the occurrence of disasters. In the case of unique disasters, there are no statistics at all, which makes risk forecasting a rather difficult problem, since even failure statistics are based on considerations about average operating conditions, average external and internal factors, etc. [15]. It is not for nothing that the well-known expert in economics, political scientist S. N. Parkinson claims (and not without reason) that if a catastrophe can happen, then its realization is inevitable, regardless of any small probability of this event [16]. Indeed, let's turn to the facts. The probability of a severe radiation accident at nuclear facilities six months before the accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant (Ukraine) was estimated as one per million reactor-hours, which, taking into account the number of nuclear units operating in the world at that time and the total operating time, corresponded to the average probability of one accident per 100 years [17]. However, during the 50 years of the "atomic era", there were large-scale accidents at the factories for the production of nuclear explosives Windscale (Great Britain), the Plutonium production for atomic bombs "Mayak" (USSR), at the Three Mile Island NPP (USA) and at the Chernobyl nuclear power plant. That is, «statistics» provided data that were eight times smaller than the actual result! The fact is that statistics is based on the prerequisites of the «statistical average level» of the state of technical and software tools, personnel training, external conditions, etc.

In fact, before assessing the possibility of realizing a particular disaster, it is worth turning to the *SWOT* analysis procedure, that is, an analysis that separates and takes into account factors and phenomena of four categories: strengths and weaknesses risks, as well

as opportunities and threats associated with their implementation [18–19].

Conclusions. The use of the mentioned heuristics makes it possible to quickly assess the scale and degree of risk of terrorism threats for the process of wastewater treatment or the functioning of other complex technical systems and identify (recognize) problems at the initial stages of their development.

The above-mentioned approach allows recognizing effectively situations that arise in real circumstances during the functioning of objects of various nature under the conditions of changes in external factors, the configuration of recognition systems, changes in the parameters of the behavior of objects under investigation, changes in goals that systems should achieve.

Bibliography:

1. Сучасні підходи в пост-майнінгу: за матеріалами міжнар. наук.-практ. конф. «Виклики та загрози для критичної інфраструктури» / [ред.] Бондар О. І., Єрмаков В. М., Лубенська Н. О. – Київ : Ямчинський О. В. [вид.], 2023. – 77 с.

2. Akono A., Druhan J., Ordoñez M., Tsotsis Th., Jessen K. et al. A review of geochemical–mechanical impacts in geological carbon storage reservoirs. *Greenhouse Gases: Science and Technology*. 2019. 9. 10.1002/ghg.1870

3. Kril T., Bublias V. The impact of natural microgeodynamic processes and technogenic vibrations on the geological environment. *Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine*. 2020. 13, 104–112. 10.30836/igs.2522-9753.2020.214523

4. Барсукова О., Осадча Ю. *Українська правда*. 2022. 12.

5. Joksimovic S., Ifenthaler D., Marrone R., Laat M., Siemens G. Opportunities of artificial intelligence for supporting complex problem-solving: Findings from a scoping review. *Computers and Education: Artificial Intelligence*. 2023. 4, 100138. 10.1016/j.caeai.2023.100138

6. Taherdoost H., Madanchian M. AI Advancements: Comparison of Innovative Techniques. *AI*. 2024. *5*(1), 38–54. https://doi.org/10.3390/ai5010003

7. Reva N. The Analogy in Decision-Making and the Implicit Association Bias Effect. Studia Humana. 2019. 8, 25-31. 10.2478/sh-2019-0015

8. Mitchell M. Abstraction and analogy-making in artificial intelligence. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2021. 1505, 1. 79.

9. Yashchenko V. O. Survivability of intelligent control systems based on the receptor-effector neural growing networks. *Mathematical Machines and Systems*. 2012. N 2. 37–40.

10. Hana B, Varshneyb K, LaDeaua S et al. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2023. 120. 38.

11. Dychko A., Yeremeyev I., Remez N., Kraychuk S., Ostapchuk N. Structural redundancy as robustness assurance of complex geoengineering systems. *E3S Web of Conferences*. 2020. 166. 11003.

12. Лепський М. А., Лепська Н. В. Метод «Прогнозування за аналогією». #GS Геополітичні студії. Робоча книга. Handbook #1. Запоріжжя : КСК-Альянс, 2017. 62.

13. Yeremeyev I., Dychko A., Kyselov V., Zaichenko S. Monitoring and Management of Geoengineering Repositories of Radioactive Waste. *Architecture, Civil Engineering, Environment*. 2021. 14(3). 103.

14. Wilkes D. *Florida Water Resource Journal*. 2007. 4.

15. Potentional Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Daimler Chrysler Corporation: Ford Motor Company: General Motors Corporation. 2001. 78.

16. Parkinson C. Parkinson's Law. 2007. https://surl.li/afyqjz

17. Cacciabue P. Evaluation of human factors and man-machine problems in the safety of nuclear power plants. *Nucl. Eng and Des*. 1988. 109(3). 417.

18. Kotler P., Berger R., Bickhoff N. The Quintessence of Strategic Management: What You Really Need to Know to Survive in Business (Springer). 2016. 113.

19. Yelesina A. Mechanizm upravlinnya zovnishnimy rizikamy VNZ. *Business inform*. 2012. 9: 315–318.

Дичко А. О., Єремєєв І. С., Ремез Н. С., Барабаш О. В., Мінаєва Ю. Ю. АНАЛІЗ РИЗИКІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВОДООЧИЩЕННЯ

У роботі запропоновано алгоритм ефективного розпізнавання небезпечних факторів у функціонуванні водоочисних комплексних систем, спричинених можливими надзвичайними ситуаціями та катастрофами або загрозами тероризму. Викиди забруднюючих речовин від техногенних процесів вплинули на безпеку навколишнього середовища, повітря, поверхневих і підземних вод, а наявність неочищених стічних вод у річках посилює екологічні ризики. Ризики екологічної безпеки включають викиди забруднюючих речовин, що спричиняють утворення токсичних сполук. Важливим аспектом є вплив на стійкість інженерно-технічних об'єктів, що може призводити до аварій та катастроф. Антропогенні фактори, землетруси та пожежі викликають небезпечні зміни в природному

середовищі, порушуючи інженерно-геотехнічну стійкість основи об'єктів критичної інфраструктури та створюють передумови для аварійних ситуацій. Сучасні системи екологічного моніторингу та обробки інформації значною мірою базуються на системах штучного інтелекту, щоб гарантувати максимальну екологічну безпеку. Однією з головних проблем таких систем є ідентифікація, яку можна вирішити шляхом використання асоціацій і аналогій для відповідного процесу оцінки ризику. Пошук асоціацій повинен здійснюватися за допомогою евристики. Застосування евристичних методів дозволяє оперативно оцінювати масштаби та ступінь ризику загроз для очищення стічних вод та функціонування складних технічних систем. Такий підхід забезпечує ефективне розпізнавання проблем на ранніх етапах їх розвитку та адаптацію до змін зовнішніх факторів, параметрів систем і цілей їх функціонування. Евристики є найбільш ефективними і гнучкими інструментами для формалізації зв'язків між асоціаціями і відносинами. Наведено евристики мінімізації впливу терористичних загроз на очищення води, які слід враховувати при прийнятті рішень в умовах нечіткої та неповної інформації.

Ключові слова: *ризик, водопідготовка, евристика, асоціації, аналогії.*

УДК 541.128:66.094.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/34

Кожура О. В.
Український державний хіміко-технологічний університет

Цибуля Є. О.
Український державний хіміко-технологічний університет

ВИКОРИСТАННЯ НІТРОГЕН(II) ОКСИДУ У ЯКОСТІ КАТАЛІЗАТОРУ ОКИСНЕННЯ КИСНЕМ СІРЧАНОКИСЛИХ РОЗЧИНІВ ФЕРУМ(II) СУЛЬФАТУ

Проведено аналіз основних джерел утворення відходів та побічних продуктів солей феруму(II) у промисловості. Показано, що метизні виробництва є найбільш поширеним джерелом забруднення довкілля кислими розчинами солей феруму(II). Натомість виробництва пігментного TiO_2 *сірчанокислотним розкладанням ільменітів є найбільшим джерелом надходження сполук феруму(II) у довкілля. Об'єми утворення таких відходів та побічних продуктів у промисловості сильно перевершують об'єми їх споживання, що викликає негативні екологічні та економічні наслідки. Показано, що активне зростання попиту на сполуки феруму (III) для використання їх у якості коагулянтів, реагентів осадження фосфатів із стічних вод чи окисників в процесах хімічної металургії визначають актуальність знаходження ефективного методу окиснення сполук феруму(II). Розчини феруму(II) сульфату у сульфатній кислоті окиснювали киснем у присутності нітроген(II) оксиду в газорідинному реакторі з механічним диспергуванням суспензії при вмісті газу у газорідинній суміші 20 %. Підвищення температури окиснення в діапазоні 25–40 °С збільшує швидкість окиснення, уявна енергія активації процесу* $E_{act}^{app} = 84.4$ кДж/моль, *порядок реакції по оксиду азоту* (NO) *1,48. Залежно від кількості внесеного каталізатору (0,004–0.018 моль/л) та температури окиснення кислих 0,5–1,5 М розчинів феруму(II) сульфату може бути здійснене за прийнятний для технологічного процесу час (1–3 год). При окисненні підкислених суспензій залізного купоросу отримано 40 % розчини феруму(III) сульфату, які сертифіковані для використання у якості коагулянтів у процесах водопідготовки та очищення стічних вод. Добавки відходу гідролізної кислоти виробництва пігментного* TiO_2*, в яких* $FeSO_4$ *був попередньо окиснений киснем, підвищили вилучення урану при дослідженні вилуговування упорних уранових руд мічурінського родовища.*

Ключові слова: *ферум(II), ферум(III), сульфат, окиснення киснем, нітроген(II) оксид, каталізатор.*

Постановка проблеми. Утилізація масштабних відходів твердих солей феруму(II) і їх розчинів на сьогодні є екологічним і технологічним викликом для металообробного, гірничодобувного, хімічного та інших промислових секторів.

Відпрацьовані травильні розчини, що утворюються у якості відходів метизних виробництв в процесах очищення розчинами сильних кислот металічних виробів представляють собою забруднені важкими металами сильно кислі сульфати або хлориди феруму(II). Через низький попит на відповідні солі їх здебільшого утилізують на полігонах та звалищах, а пряме їх потрапляння у воду знижує її pH та спричиняє забруднення важкими металами. У Китаї такі виробництва щорічно скидають 5 млрд м³ стічних вод і понад 13 млн т осаду солей. В ЄС окремі виробництва після нейтралізації вапном скидають на хвостосховища до 100 000 т залізовмісних осадів [1, с. 1].

Основні відходи виробництва титанового пігменту це гідролізна сульфатна кислота, моно- та гептагідрат феруму(II) сульфат. Великий обсяг відходів $FeSO_4$ загрожує сталому розвитку промисловості пігментного діоксиду титану в Китаї [2, с. 2229]. ПАТ «Сумихімпром» м. Суми при виробництві пігментного TiO_2 на території підприємства накопичено близько 1,5 млн т залізного купоросу $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ та сильнокислого моногідрату $FeSO_4 \cdot H_2O$, який виділяється при концентруванні відходу гідролізної сульфатної кислоти упарюванням [3, с. 30].

В залежності від якості сировини в процесі отримання TiO_2 кількість утвореного залізного купоросу може сягати 6 тонн на кожну тонну отриманого пігментного TiO_2 [4, с. 1].

Споживання залізного купоросу та інших солей Fe^{2+} є доволі масштабним. У рослинництві це засіб боротьби з хлорозом рослин, добриво, засіб закислення грунтів, гербіцид проти слимаків

тощо. Як кормова добавка він підвищує гемоглобін у тварин, особливо на ранніх стадіях їхнього життя. Пігментна промисловість споживає купорос на виготовлення залізооксидних пігментів різної гами кольорів [5, с. 9–10]. Цементна промисловість різко розширила споживання залізного купоросу для відновлення канцерогенних сполук хрому(VI) у бетонних сумішах [6, с. 73–74]. Установки водопідготовки парогенераторів споживають залізний купорос як коагулянт.

Водночас, через великі обсяги утворення, споживання сполук феруму сильно відстає від їх виробництва. Кислі відходи хімічних та металургійних виробництв, що містять іони Fe^{2+}, нейтралізують при додаванні вапна та отримують червоний гіпс, який складається переважно з $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ та гідроксидів заліза [7, с. 1430].

Виробники, уряди, науковці прикладають зусилля для вирішення проблеми накопичення таких відходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На споживання великих обсягів залізного купоросу відновним розкладанням с піритом, з утворенням ліквідних магнетиту (Fe_3O_4) і діоксиду сірки (SO_2) покладають свої сподівання китайські дослідники [8, с. 5]. Раніше європейські виробники відмовилися від такого процесу через його високу енергоємність [9, с. 455].

Для утилізації хлоридних метизних розчинів, відходів $FeCl_2$, $FeCl_3$ титанової та інших галузей промисловості розроблений метод пірогідролітичного окислення. При подачі таких відходів у піч киплячого шару при 600 °C утворюється Fe_2O_3 та HCl. Метод характеризується високою витратою енергії, але через можливість регенерувати соляну кислоту і вирішити проблему з відходами у світі діють кілька тисяч таких промислових установок [10, с. 42].

Значного споживання сполук феруму(II) можна досягти при їх перетворенні на сполуки феруму(III). В ЄС щороку близько 1 млн тон сполук феруму(III) застосовують зокрема для флокуляції та видалення фосфатів на муніципальних і промислових очисних спорудах. При отриманні реагентів для водоочищення та зв'язування фосфатів європейськими виробниками застосовується окиснення сполук феруму(II) киснем або азотною кислотою в автоклавах [9, с. 455].

Зниження витрат при окисненні сполук Fe^{2+} сприятиме значному розширенню сфер застосування та споживання сполук Fe^{3+}. Зокрема, актуальним є використання їх у процесах вилуговування уранових руд у якості окисника урану(IV) до розчинного урану(VI) у процесі вилуговування уранових руд [11, с. 448], або при хімічній металургії халькопіриту та інших сульфідних руд [12, с. 417–418].

У біологічному очищенні стічних вод сполуки заліза (Fe^{3+}) зазвичай використовуються як неорганічні флокулянти, які сприяють агломерації та осадженню завислих часток, підвищують ефективність видалення забруднюючих речовин і забезпечують дотримання суворих норм скидання стічних вод [13, с. 1].

Одним із перспективних підходів до отримання розчинів феруму(III) сульфату є окиснення розчинів феруму(II) сульфату молекулярним киснем у присутності активаторів – сполук нітрогену, зокрема оксидів, нітратів і нітритів. Реакція окиснення Fe^{2+} киснем повітря є складним багатоетапним процесом, що включає як оборотні, так і незворотні стадії, які відбуваються в рідкій і газовій фазах. Ефективність цього процесу значною мірою залежить від pH середовища, концентрації іонів Fe^{2+} і природи активаторів, що визначає кінетичні параметри реакції та вихід кінцевого продукту [14, с. 49]. Автоклавне окиснення Fe^{2+} у водному середовищі за наявності сполук (NO_x) [15, с. 212–213; 16, с. 5486] є ефективним але енерговитратним процесом, який забезпечує повне окиснення заліза з Fe^{2+} до Fe^{3+}.

Через високі витрати енергії і складного обладнання автоклавний процес окиснення не може забезпечити низьку собівартість розчинів феруму(III) сульфату. Для зниження собівартості процесу окиснення в даній роботі запропоновано вести процес окиснення при низьких температурах без використання підвищеного тиску у масообмінному обладнанні з механічним диспергуванням газорідинної суміші.

Постановка завдання. Метою статті є визначення умов окиснення кислих розчинів феруму(II) сульфату киснем у присутності нітроген(II) оксиду при температурах 25–40 °C та атмосферному тиску. Одержати розчини феруму(III) сульфату за прийнятний для технологічного процесу час (2–3 год) при низьких витратах енергії та реагентів.

Досягнення поставленої мети вимагало вирішення наступних задач:

– Дослідити кінетичні залежності процесу взаємодії кисню з розчинами феруму(II) сульфату у присутності нітроген(II) оксиду при температурах 25–40 °C.

– Визначити уявну енергію активації та порядок реакції каталітичного окиснення киснем розчинів феруму(II) сульфату по нітроген(II) оксиду.

– Провести випробування одержаних розчинів феруму(III) сульфату у основних галузях його використання: водоочищенні та гідрометалургії.

Виклад основного матеріалу. Окиснення сірчанокислих розчинів проводили у газорідинному реакторі з механічним диспергуванням парогазової суміші у рідині (рис. 1). В скляний циліндричний реактор об'ємом 100 мл (1), обладнаний сорочкою (2) та відбивними перетинками (3), вносили 80 мл розчину $FeSO_4$ заданої концентрації у 5N H_2SO_4. Захисна гільза (6) встановлена між магнітним ротором (5) і статором (7), ізолювала реакційний об'єм та дозволяла підтримувати у реакторі (1) заданий склад газової фази. Вмикали магнітну мішалку і магнітним якорем (8) при ~240 об/хв з точністю ±0,05 °С встановлювали задану температуру розчину, яку контролювали по термометру (9). Реакційний об'єм з'єднували краном (10) з лінією подачі кисню та триходовим краном (11) з атмосферою, пропускали кисень для витіснення повітря. Закривали подачу кисню (10) та краном (11) реакційний об'єм з'єднували з наповненим (99,8 %) киснем газгольдером волюмометричної установки. Шприцом (12) по капіляру (13) (∅ 0,5 мм) вносили під шар розчину заданий об'єм NO. Вимикали обертання якоря (8) та ввімкненням приводу турбінної мішалки (4) на 3000 об/хв починали окиснення. Фіксували тиск, температуру і вологість кисню та зміну об'єму кисню у волюмометрі у часі з точністю ±0,1 мл. Опосередковано, по об'єму поглинутого кисню, контролювали швидкість окиснення іонів Fe^{2+}. По завершенні окиснення оксидиметричним титруванням визначали концентрацію Fe^{2+} та Fe^{3+} у розчині.

В окремих випадках у якості каталізатору окиснення використовували нітрит калію чи натрію. Дозування розчину нітриту натрію чи калію є зручним способом внесення і підтримки заданої концентрації сполук зв'язаного азоту у технологічній практиці:

$$2KNO_2 + 4FeSO_4 + 2H_2SO_4 \rightarrow \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + 2[FeNO]SO_4 + K_2SO_4 + 2H_2O \quad (1)$$

В дослідженні кінетики окиснення у якості каталізатору використовували газоподібний нітроген(II) оксид оскільки його додавання не вносить у розчини сторонні катіони. Крім того, при низькому вмісті домішки NO_2 (реакція 3), внесення NO практично не впливає на початкову концентрацію сполук Fe(II) у розчині (реакція 2). Для точності опосередкованого визначення концентрації феруму(II) у розчині, яке здійснювали через фіксування об'єму поглинутого кисню, відсутність неконтрольованого впливу сторонніх окисників є обов'язковою умовою.

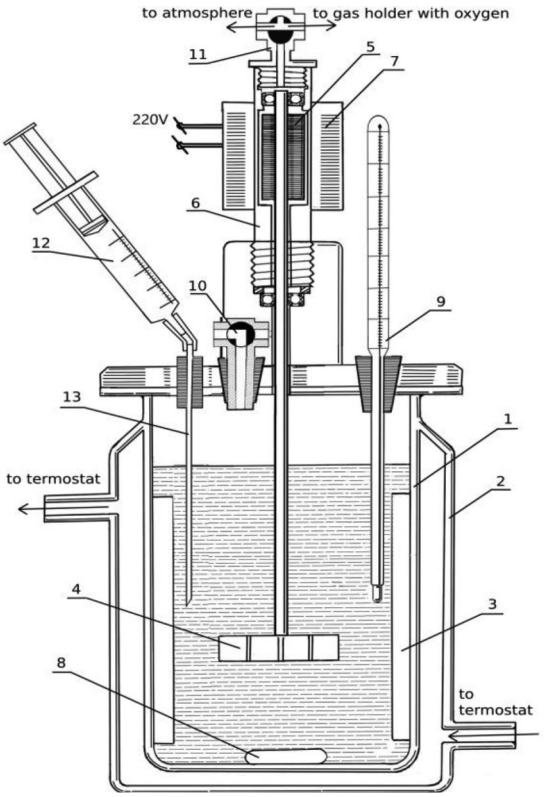


Рис. 1. Установка окиснення кислих розчинів $FeSO_4$ киснем

$$FeSO_4 + NO \rightleftarrows [FeNO]SO_4 \quad (2)$$

$$3FeSO_4 + NO_2 + H_2SO_4 \rightarrow \rightarrow [FeNO]SO_4 + Fe_2(SO_4)_3 + H_2O \quad (3)$$

Взаємодія феруму(II) у кислих середовищах з киснем відбувається дуже повільно. Прискорення окиснення $FeSO_4$ киснем по каталітичному механізму спостерігається [15, с. 209] при використанні сполук зв'язаного азоту та автоклавних умовах окиснення.

Без використання підвищеного тиску і температури швидкість поглинання кисню у часі сірчанокислими розчинами $FeSO_4$ зі збільшенням концентрації внесеного каталізатору також зростає (рис. 2). Для окиснення використовували модельні розчини, склад яких наближений до складу відходу гідролізної кислоти виробництва пігментного TiO_2 із ільменітів (20–23 % H_2SO_4, 8–12 % $FeSO_4$). Окиснення феруму(II) при вищих концентраціях внесеного каталізатору відбувається протягом 15–25 хвилин. У розчині феруму(II) сульфату нітроген(II) оксид утворює комплексну сполуку (реакція 1) з константою комплексоутворення $4.4 \cdot 10^2$ M^{-1}. В суспензії газорідинного реактору нітрозильний комплекс феруму(II) дисоціює, малорозчинний у воді NO розподіляється між розчином і газовою фазою.

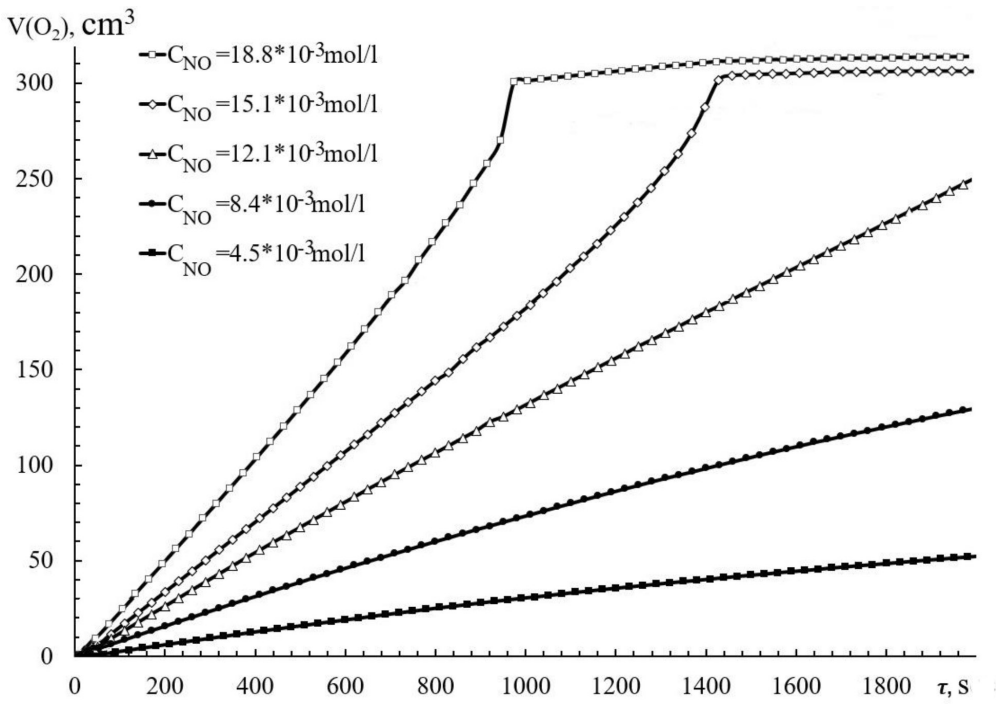


Рис. 2. Залежність об'єму кисню, який поглинається розчином ферум(II) сульфату у часі при різних концентраціях NO: при 25 °C, C($FeSO_4$) = 0.695 моль/л, C(H_2SO_4) = 2,5 моль/л та атмосферному тиску

При різних тисках і температурі процеси окиснення нітроген(II) оксиду киснем відбуваються одночасно в рідкій та газовій фазах з різною швидкістю.

$$2NO + O_2 \rightarrow N_2O_4 \quad (4)$$

$$2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2 \quad (5)$$

$$4NO + O_2 \rightarrow 2N_2O_3 \quad (6)$$

$$3NO_2 + H_2O \rightarrow 2HNO_3 + NO \quad (7)$$

За рахунок інтенсивного контакту між газовою фазою та рідиною N_2O_3 та NO_2 швидко взаємодіють з іонами Fe^{2+} не тільки у розчині, а також на поверхні розподілу газової та рідкої фази. При цьому відбувається утворення сполук Fe^{3+} та регенерація каталізатору.

$$4Fe^{2+} + N_2O_3 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + 2FeNO^{2+} + H_2O \quad (8)$$

$$3Fe^{2+} + NO_2 + 4H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + FeNO^{2+} + 2H_2O \quad (9)$$

$$6Fe^{2+} + N_2O_4 + 8H^+ \rightarrow 4Fe^{3+} + 2FeNO^{2+} + 4H_2O \quad (10)$$

Кінетичні криві, при верхніх обраних концентраціях каталізатору, демонструють прискорення окиснення при низьких залишкових концентраціях Fe^{2+}, що свідчить про значну роль окиснення каталізатору не в розчині, а в газовій фазі. Поступове припинення споживання кисню у верхній частині кривих найбільш імовірно свідчить про окиснення на цій ділянці сполук нітрогену в нижчих ступенях окиснення до нітратної кислоти. При нижніх концентраціях внесеного каталізатору кількісне окиснення Fe^{2+} не відбувалося імовірно через втрату активності каталізатору.

Нітратна кислота з іонами феруму(II) взаємодіє повільно [15, с. 213; 17, с. 3757–3758].

$$4Fe^{2+} + NO_3^- + 4H^+ \rightarrow 3Fe^{3+} + FeNO^{2+} + 2H_2O \quad (11)$$

Саме через витрату частини NO на реакцію (7) відбувається втрата активності каталізатору у процесі окиснення. Після внесення каталізатору блідо-зелені кислі розчини ферум(II) сульфату отримують забарвлення коричневого $[FeNO]^{2+}$, в процесі окиснення це забарвлення ослаблюється. За рахунок витрати NO на побічні процеси зв'язаний нітроген виводиться із каталітичного циклу та накопичується в розчині у вигляді нітратної кислоти, утворення якої є небажаним напрямком окиснення NO.

Загальні рівняння окиснення має вигляд:

$$4FeSO_4 + O_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O \quad (12)$$

Для визначення порядку реакції окиснення феруму(II) по нітроген(II) оксиду перераховували об'єм поглинутого кисню у кількість окисненого Fe^{2+}. На рис. 3 показана залежність зменшення концентрації Fe^{2+} за рахунок окиснення його киснем у присутності різних концентрацій нітроген(II) оксиду у розчині. Для аналізу обраний початковий період окиснення, коли концентрація нітроген(II) оксиду у розчині може вважатися сталою.

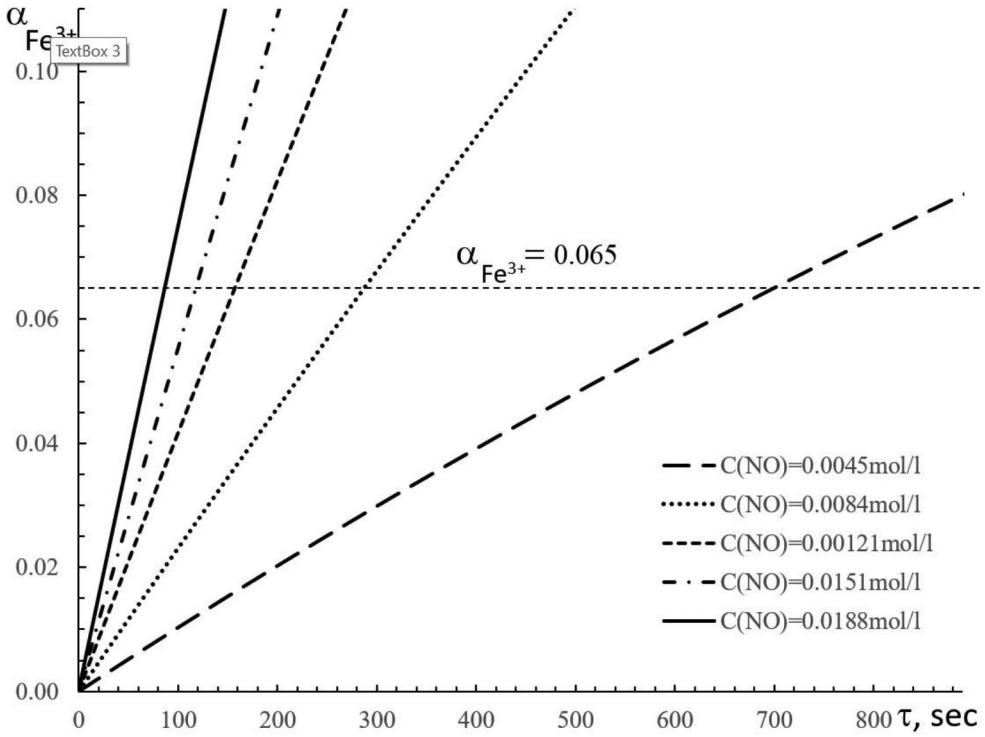


Рис. 3. Зміна концентрації іонів Fe^{2+} від часу окиснення киснем та концентрації NO у розчині: $^{почат}C(Fe^{2+})$ = 0.695 моль/л, $^{почат}C(H_2SO_4)$ = 5 екв/л, *t* = 25 °C

Порядок реакції визначали графічним методом. По перетину лінії обраного постійного ступеня перетворення з кінетичними кривими визначали інтервали часу необхідні для досягнення фіксованого ступеня перетворення Для різних початкових концентрацій NO будували графічну залежність $\lg(\alpha(Fe^{3+})/\tau_i) - \lg(C_i)$ (рис. 4).

Тангенс кута нахилу цієї залежності є порядком реакції за нітроген(II) оксидом n = 1,48, що вказує на сильну залежність швидкості процесу від концентрації каталізатору.

Зміна концентрації іонів Fe^{2+} у часі при різних температурах та постійних початкових концентраціях $FeSO_4$ та NO показана на рис. 5. Збільшення

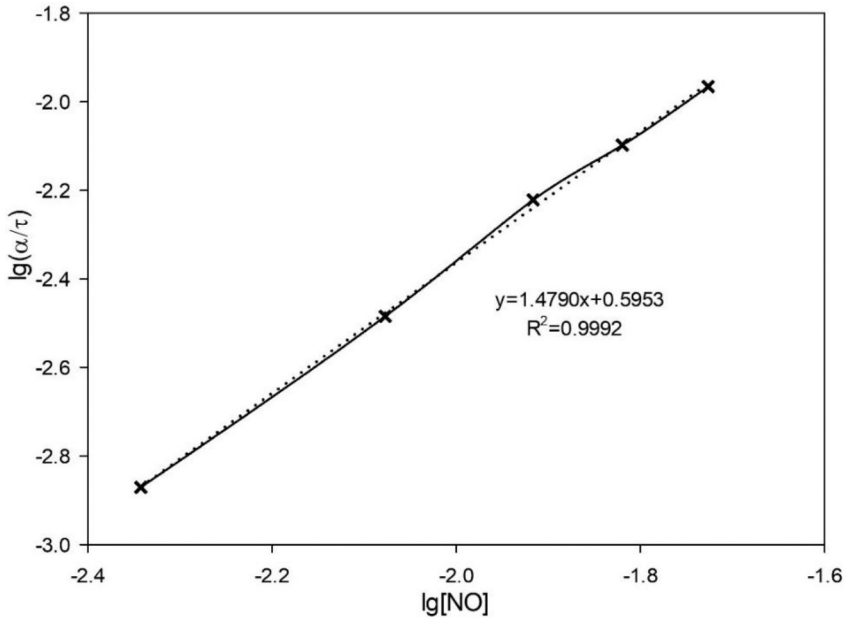


Рис. 4. Графічний розрахунок порядку реакції по нітроген(II) оксиду за часом досягнення постійного ступеня перетворення α

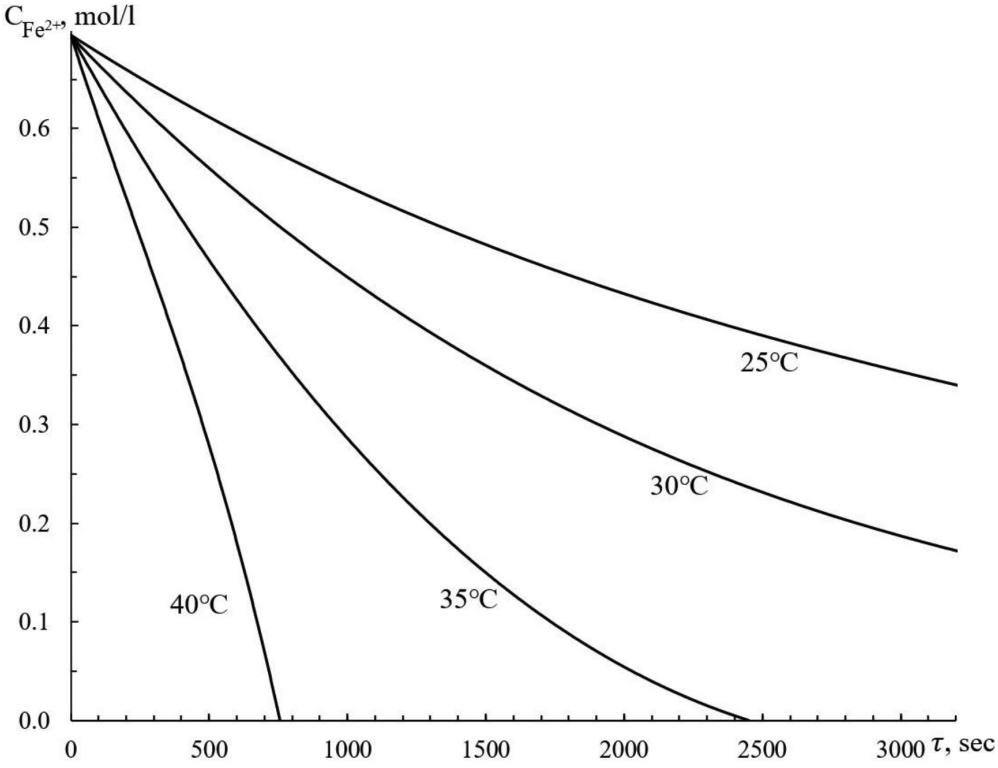


Рис. 5. Зміна концентрації Fe(II) у часі при різних температурах: *C*(NO) 0.015 моль/л, $C^{почат}(Fe^{2+})$ = 0.695 моль/л, $C(H_2SO_4)$ = 2,5 моль/л

температури значно прискорює процес окислення феруму(II).

Для визначення уявної енергії активації процесу окиснення було застосовано диференціальний підхід до обрахунку кінетичних даних. Для виключення впливу зменшення концентрації каталізатора в процесі окиснення час, необхідний на досягнення постійного ступеня перетворення $\alpha(Fe^{3+})$ при кожній температурі, визначали у початковий період перетворення (рис. 6), чим виключали вплив зменшення концентрації каталізатору в процесі окиснення.

Представлення цих даних у координатах рівняння Арреніуса (рис. 7) дозволило визначити уявну енергію активації яка склала 84,4 кДж/моль.

Таке високе значення може вказувати на посилення дисоціації нітрозильного комплексу феруму(II) (реакція 2) та збільшення доступного для окиснення через газову фазу нітроген(II) оксиду.

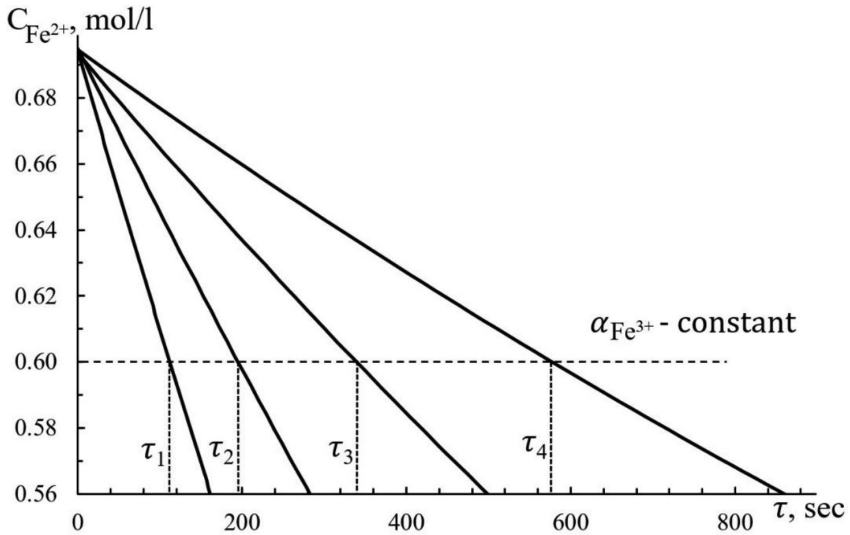


Рис. 6. Зміна концентрації Fe(II) у часі при різних температурах: C(NO) 0.015 моль/л, $C^{почат.}(Fe^{2+})$ = 0.695 моль/л, $C(H_2SO_4)$ = 2,5 моль/л

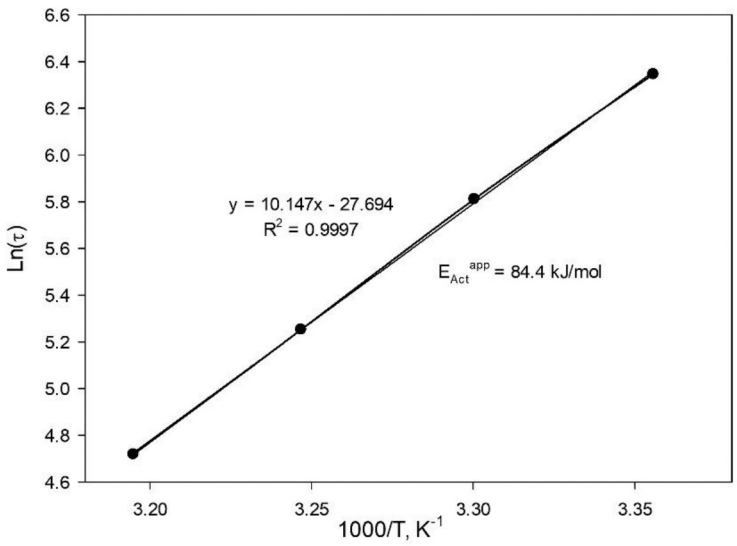


Рис. 7. Дані по часу досягнення сталого ступеню перетворення Fe(II)/Fe(III) в координатах рівняння Арреніуса

Результати дослідження були використані для одержання кількох зразків продукції на основі розчинів ферум(III) сульфату. Каталітичним окисненням киснем суспензії залізного купоросу в присутності розрахованої кількості сульфатної кислоти, за умови внесенні як каталізатора розчину натрію нітриту, у збільшеній лабораторній установці за низьких температур і атмосферному тиску було отримано 40 % розчини ферум(III) сульфату. По результатам збільшених лабораторних досліджень було спроектовано пілотну установку в якій для проведення окиснення використали ректор типу РМЦ об'ємом 0,5 м^3 з мішалкою встановленою в циркуляційному контурі. Така конструкція дозволяє досягти максимального вмісту газу у газорідинній суспензії. При використанні обладнання, виготовленого з кислотостійкої сталі 07Х17Н13М2 (AISI 316L), одержані розчини 40 % ферум(III) сульфату із залишковим вмістом H_2SO_4 менше 10 г/л та $FeSO_4$ менше 1 г/л. В процесі окиснення за рахунок теплоти реакції у пілотному обладнанні відбувається розігрівання реакційного середовища з 40 °С до 75 °С. При внесенні, в кінці окиснення, в гарячі $t > 70$ °С розчини $Fe_2(SO_4)_3$ розрахованої кількості карбаміду відбувається розкладання та видалення залишку каталізатору у вигляді молекулярного азоту. Одержані розчини сертифіковані для використання у якості коагулянтів в процесах водопідготовки та очищення стічних вод.

Ферум(II) сульфат у складі відходу гідролізної кислоти виробництва пігментного TiO_2 кількісно окиснили киснем у збільшеному лабораторному газорідинному реакторі при додаванні розчинів нітриту калію як каталізатора. Внесення в пульпи вилуговування упорних уранових руд мічурінського родовища добавки окисненої гідролізної кислоти підвищувало вилучення урану в умовах зниження температури вилуговування.

Використання для отримання сполук феруму(III) одного з найдешевших і доступних окисників, яким є кисень, при незначних технологічних витратах, як показано в даному дослідженні, розкриває шлях до розширення сфер використання сполук феруму(II) та зменшення їхнього навантаження на довкілля.

Висновки. Аналіз основних джерел утворення відходів та побічних продуктів солей феруму(II) показав, що об'єми утворення таких відходів та побічних продуктів у промисловості сильно перевершують об'єми їх споживання, що викликає негативні екологічні та економічні наслідки.

Показано, що активне зростання попиту на сполуки феруму(III) для використання їх у якості коагулянтів, реагентів осадження фосфатів із стічних вод чи окисників в процесах хімічної металургії визначають актуальність знаходження ефективного методу окиснення сполук феруму(II).

Визначено окремі кінетичні параметри окиснення киснем кислих розчинів $FeSO_4$ у присутності NO в газорідинному реакторі з механічним диспергуванням суспензії без використання підвищених температур та тиску.

Показано, що окиснення киснем у присутності нітроген(II) оксиду розчинів ферум(II) сульфату у сульфатній кислоті в газорідинному реакторі

з механічним диспергуванням суспензії без використання підвищених температур та тиску йде з високою швидкістю. Підвищення температури окиснення в діапазоні 25–40 °С прискорює окиснення, уявна енергія активації процесу Порядок реакції по оксиду азоту (NO) складає 1,48.

Залежно від кількості внесеного каталізатору (0,004–0.018 моль/л) та температури окиснення кислих 0,5–1,5 М розчинів ферум(II) сульфату може бути здійснене за прийнятний для технологічного процесу час (1–3 год).

При окисненні підкислених суспензій залізного купоросу отримано 40 % розчини ферум(III) сульфату. Одержані розчини сертифіковані для використання у якості коагулянтів у процесах водопідготовки та очищення стічних вод.

Розчини гідролізної кислоти виробництва пігментного TiO_2 після каталітичного окиснення феруму(II) сульфату при внесенні в пульпи вилуговування упорних уранових руд мічурінського родовища сприяли підвищенню вилучення урану в умовах зниження температури вилуговування.

Список літератури:

1. Guo S., Wang H., Liu X., Zhang Z. and Liu Y. Approaches for the Treatment and Resource Utilization of Electroplating Sludge. *Materials*. 2024. Vol. 17, № 7. 1707. P. 1–20. DOI:10.3390/ma17071707

2. Huang P., Jiang B., Zhang Z., Wang X., Chen X., Yang X., and Yang L. Recycling sulfur and iron resources in the waste ferrous sulfate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2014. Vol. 119. P. 2229–2237. DOI: 10.1007/s10973-014-4306-1

3. Барсукова Г. В., Вакал С. В. Можливість використання відходу титанового виробництва як сировини. *Сучасні технології у промисловому виробництві*: III Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф. присвяч. дню науки в Україні (Суми, 22–25 квітня 2014 р.). Суми, 2014. С. 30–31.

4. Kanari N., Menad N-E., Ostrosi E., Shallari S., Diot F., Allain E. and Yvon J. Thermal Behavior of Hydrated Iron Sulfate in Various Atmospheres. *Metals*. 2018. Vol. 8, № 12. 1084. P. 1–9. DOI: 10.3390/met8121084

5. Gázquez M. J., Contreras M., Pérez-Moreno S. M., Guerrero J. L., Casas-Ruiz M., Bolivar J. P. A Review of the Commercial Uses of Sulphate Minerals from the Titanium Dioxide Pigment Industry: The Case of Huelva (Spain). *Minerals*. 2021 Vol. 11, № 6. 575. P. 1–15. DOI: 10.3390/min11060575

6. Monˇceková, M., Novotný, R., Koplík, J., Kalina, L., Bílek, V., Šoukal, F. Hexavalent chromium reduction by ferrous sulphateheptahydrate addition into the portland clinker. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 151. P. 73–79. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.382

7. Gázquez, M. J., Bolívar, J. P., García-Tenorio R. and Vaca F. Physicochemical characterization of raw materials and co-products from the titanium dioxide industry. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 166, № 2–3. P. 1429–1440. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.067

8. Huang P., Deng S., Zhang Z., Wang X., Chen X., Yang X., Yang L. A sustainable process to utilize ferrous sulfate waste from titanium oxide industry by reductive decomposition reaction with pyrite. *Thermochimica Acta*. 2015. Vol. 620. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.tca.2015.10.004

9. Gázquez, M. J., Bolívar, J. P., García-Tenorio R. and Vaca F. A Review of the Production Cycle of Titanium Dioxide Pigment. *Materials Sciences and Applications*. 2014. Vol.5. P. 441–458. DOI: 10.4236/msa.2014.57048

10. Filippou D., Hudon G. Iron removal and recovery in the titanium dioxide feedstock and pigment industries. *JOM*. 2009. Vol. 61. P. 36–42. DOI: 10.1007/s11837-009-0150-3

11. Venter R. and Boylett M. The evaluation of various oxidants used in acid leaching of uranium. *Hydrometallurgy Conference, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2009. P. 445–456.

12. Li X., Monnens., Li Z., Fransaer J., Binnemans K. Solvometallurgical process for extraction of copper from chalcopyrite and other sulfidic ore minerals. Green Chemistry. 2019. Vol. 22, № 2. P. 417–426. DOI: 10.1039/c9gc02983d

13. Zhang L., Zhang M., You S., Ma D., Zhao J., Chen Z. Effect of Fe^{3+} on the sludge properties and microbial community structure in a lab-scale A_2O process. *The Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 780, № 3. 146505. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146505

14. Gok O. Catalytic oxidation mechanism of oxy-nitrogen spicies (NO_x) in FeSO4 electrolyte. *Nitric Oxide*. 2011 Vol. 25, № 1. P. 47–53. DOI: 10.1016/j.niox.2011.05.003

15. Baldwin S. A., Weert G. V. On the catalysis of ferrous sulphate oxidation in autoclaves by nitrates and nitrites. *Hydrometallurgy*. 1996 Vol. 42, № 2. P. 209–219. DOI: 10.1016/0304-386X(95)00092-U

16. Gok O. Ferrous oxidation catalyzed by oxy-nitrogen species (NO_X). Asian Journal of Chemistry. 2012 Vol. 24, № 12. P. 5485–5489.

17. Epstein I. R., Kustin K., Warshaw L. J. A kinetics study of the oxidation of iron (II) by nitric acid. *Journal of the American Chemical Society*. 1980. Vol. 102, № 11. P. 3751–3758. DOI: 10.1021/ja00531a015

Kozhura O. V., Tsybulia Ye. O. USE OF NITRIC OXIDE AS A CATALYST FOR THE OXYGEN OXIDATION OF SULFURIC ACID SOLUTIONS OF IRON(II) SULFATE

An analysis of the main sources of waste and by-products of iron(II) salts in industry has been conducted. It has been shown that fastener manufacturing is the most widespread source of environmental pollution by acidic solutions of iron(II) salts. In contrast, the production of pigment-grade TiO_2 *by the sulfuric acid decomposition of ilmenite is the largest source of iron(II) compounds released into the environment. The volumes of such waste and by-products generated in industry far exceed their consumption, leading to negative environmental and economic consequences. The growing demand for iron(III) compounds as coagulants, phosphate precipitation reagents for wastewater treatment, and oxidizers in chemical metallurgy highlights the need for an effective oxidation method for iron(II) compounds. Iron(II) sulfate solutions in sulfuric acid were oxidized with oxygen in the presence of nitric oxide in a gas-liquid reactor with mechanical dispersion of the suspension, maintaining a gas content of 20 % in the gas-liquid mixture. An increase in oxidation temperature within the range of 25–40 °C enhances the oxidation rate, with an apparent activation energy of* $E_a pp = 84.4$ *kJ/mol and a reaction order with respect to nitrogen monoxide* (NO) *of 1.48. Depending on the catalyst concentration (0.004–0.018 mol/L) and oxidation temperature, acidic 0.5–1.5 M solutions of iron(II) sulfate can be oxidized within a technologically feasible timeframe (1–3 hours). The oxidation of acidified ferrous sulfate suspensions resulted in 40 % iron(III) sulfate solutions, certified for use as coagulants in water treatment and wastewater purification processes. The addition of hydrolysis acid waste from the pigment* TiO_2 *production process, in which* $FeSO_4$ *had been pre-oxidized with oxygen, enhanced uranium extraction in leaching studies of refractory uranium ores from the Michurinsk deposit.*

Key words: *iron(II), iron(III), sulfate, oxygen oxidation, nitric oxide, catalyst.*

UDC 661.531: 544.478
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/35

Kontsevoy A. L.
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Kontsevoi S. A.
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

THE INFLUENCE OF DEPOSITION CONDITIONS ON THE ACTIVITY OF THE IRON-CHROME CATALYST

The article is devoted to optimization of technological parameters of the process of manufacturing a precipitated medium-temperature catalyst for steam conversion of carbon (II) oxide. A feature of the manufacture of an iron-chromium catalyst within the framework of this article is the use of a solution of iron and chromium salts obtained by leaching the spent catalyst with a solution of nitric acid. By draining the solution of nitrates and ammonia water, a precipitate is obtained – a mixture of iron and chromium hydroxides. To characterize the properties of the precipitate, the value of the specific resistance during filtration (SRF) was used, on which the filtration speed and the choice of filtration equipment depend. The aim of the work was determined: to study the dependence of the SRF of the precipitate, the specific surface area and the activity of the catalyst obtained from the precipitate on the precipitation parameters: the concentration of the salt solution, which is determined by the concentration of nitric acid Z_1 (from 20 to 40 %) during leaching of the spent catalyst, the concentration of ammonia water Z_2 (from 5 to 20 %) and the aging time of the precipitate Z_3 (from 3 to 90 minutes). Using the Excel LINEST function, a second-order equation was obtained, for example, to estimate the catalyst activity (rate constant): $K_{calc} = 0.91576 + 0.133555 \cdot Z_1 - 0.01079 \cdot Z_2 - 0.01529 \cdot Z_3 - 0.00253 \cdot Z_1^2 - 0.00063 \cdot Z_2^2 + 0.00012 \cdot Z_3^2$. Using the Excel Solver add-in, the optimal (maximum rate constant) conditions for precipitation were found: Z_1 = 26.4 %, Z_2 = 5 %, Z_3 = 3 min. A similar processing of experimental data was carried out for the specific surface area of the catalyst and the SRF of the precipitate. The calculation determined the conditions for the maximum specific surface area: Z_1 = 21.9 %, Z_2 = 5 %, Z_3 = = 3 min. and the minimum specific resistance of the precipitate: Z_1 = 20 %, Z_2 = 5 %, Z_3 = 27 min. The obtained data indicate the need to use 20–26 % nitric acid when leaching the spent catalyst, 5 % ammonia water and the minimum aging time of the precipitate after precipitation. The closeness of the values of the optimal parameters Zi for the three objective functions is confirmed by the close relationship between them: the pair correlation coefficients are in the range of 0.83–0.98. Taking into account the fact that the best dissolution of the spent catalyst occurs in 40 % acid, the resulting nitrate solution must be diluted twice before precipitation.

Key words: *catalyst, activity, deposition, specific resistivity, specific surface area, mathematical model, optimal conditions.*

Formulation of the problem. Modern ammonia production technologies involve a number of sequential processes, one of which is the steam conversion of carbon (II) oxide in two stages on medium- and low-temperature catalysts: $CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2 + Q$.

Medium-temperature catalysts (MTC: up to 90 % Fe_2O_3 and up to 8 % Cr_2O_3) are prepared, as a rule, by the method of precipitation of iron carbonate or hydroxide from a solution of iron (II) sulfate with ammonium carbonate or ammonium hydroxide. Then the precipitate is filtered, a chromium compound is added, dried, calcined and formed. The service life of iron-chromium catalysts for CO steam reforming is up to 4 years. A feature of the manufacture of an iron-chromium catalyst within the framework of this article is the use of a salt solution obtained by leaching spent MTC with a solution of nitric acid. By draining a solution of metal nitrates and ammonia water, a precipitate is obtained – a mixture of iron and chromium hydroxides:

$$Fe(NO_3)_3 + 3NH_3 + 2H_2O = FeOOH + 3NH_4NO_3$$

$$Cr(NO_3)_3 + 3NH_3 + 3H_2O = Cr(OH)_3 + 3NH_4NO_3.$$

Analysis of recent research and publications. Iron-chromium catalysts for steam conversion of CO are widely used in the production of process gas for ammonia synthesis. Physicochemical properties and technology of their production are given, for example, in manuals [1, p. 183; 2, p. 108]. The search for new methods of manufacturing MTC continues. Thus, method [3] involves the use of chlorides of starting

metals as raw materials. The deposition process largely determines the properties of the resulting catalyst. The main parameters that determine the properties of deposited catalysts are the temperature and pH of deposition, the concentrations of starting reagents, the aging time of the precipitate, the order and rate of reagent discharge. The authors of the article [4] investigated the influence of the pH of precipitation on the properties of the catalyst. It was found that at pH = 5 the specific surface area of chromium phosphate is 81 m^2/g, at pH = 7 the specific surface area of chromium phosphate is 79 m^2/g. An increase in pH to 9 leads to an increase in the specific surface area of chromium phosphate to 170 m^2/g. In the work [5] the concentration parameters of the starting salts and the precipitant were determined: catalyst samples were prepared by co-precipitation from concentrated nitrate salts of zinc, chromium and copper with ammonium carbonate at pH = = 7.1–7.4. The concentration of aqueous solutions was: zinc nitrate: 240–250 g/l; nitric acid chromium: 220–230 g/l; copper nitrate: 210–220 g/l; ammonium carbonate: 200–250 g/l. The properties of the obtained precipitate determine the quality of the catalyst. The influence on the filtration rate of the suspension is also important – the stage that determines the period of sediment dehydration and the type of equipment (vacuum filter or press filter). The properties of the precipitate are characterized by the specific resistance during filtration. The authors of [6] determined the value of the electrolyte dose to obtain a precipitate with a minimum specific resistance during filtration. The influence of the reagent concentration was studied in [7]. It was found that the specific resistance during filtration decreases with increasing $CaCl_2$ concentration. The authors [8] note that the accurate determination of the filtration rate of suspensions and the specific resistance of the filter cake layer as a function of pressure is a key factor for analyzing the efficiency of filtration operations. The study [9] of the filtration of calcium carbonate and talc minerals under different conditions of filtrate flow rate and suspension concentration presented a complete and understandable methodology for investigating the significance of the average resistance in subsequent filtration stages. The aim of the paper [10] was to study the filterability of sediments as a function of particle shape and particle size distribution. Different shapes of calcium carbonate and uranium oxalate particles (sphere, cube, needle and plate) were obtained by precipitation. The authors of [11] used well-known equations to calculate the specific volume resistance of the sediment as a function of the pressure drop during filtration.

Task statement. The purpose of the work was to study the dependence of the properties of the precipitate and the activity of the catalyst on the precipitation parameters: the concentration of the salt solution (determined by the concentration of nitric acid during leaching of the spent catalyst), the concentration of ammonia water, and the aging time of the precipitate.

Presentation of the main material. The starting solutions for the preparation of the catalyst were obtained by leaching the spent MTC catalyst with nitric acid. The kinetics of this process were considered by us in the article [12]. Previous experiments determined the rational conditions of precipitation: pH at the level of 7.2–7.6; temperature 353 K (80 °C); solution drain rate 200 cm^3/min. In order to determine the influence of precipitation parameters on the properties of the precipitate and the catalyst obtained from it, the following precipitation parameters were adopted: nitric acid with a concentration of 20 % to 40 % (factor Z_1, table 1) was used to prepare the starting solutions of iron and chromium nitrate, the concentration of ammonia water was from 5 % to 20 % (factor Z_2, table 1), the aging time of the precipitate was from 3 to 90 minutes (factor Z_3, table 1). The kinetics of filtration of co-precipitated iron and chromium hydroxides was studied at a pressure drop of 0.043 MPa (330 mm Hg), the filter material was belting fabric. During the filtration process, the filtrate volume Q was recorded over time and the final sediment height h. After calculating the specific amount of filtrate (with a filter surface F, m^2) $q = Q/F$ (m^3/m^2), a graph was constructed in the coordinates $\tau/q = f(q)$, where τ is the filtration time, seconds. A similar approach is described in the monograph [13, p. 45–46]. By processing the obtained straight line according to the well-known method of V. O. Zhuzhikov, the sediment resistance during filtration R and the average specific resistance of the sediment $r = R/h$ (sec/m^2) were calculated. The catalyst was prepared from the sediment: washing, drying, calcination and molding. The specific surface area of the obtained catalyst S (m^2/g) was determined by the BET method by adsorption of benzene vapor. The catalytic activity (rate constant K of the first-order equation, sec^{-1})) was determined on a flow-through installation at 623 K (350 °C) in the CO steam conversion reaction. The obtained experimental results are given in Table 1.

In order to describe the dependence of, for example, the rate constant on the deposition parameters by a second-order equation, the data in Table 1 are expanded in the form of Table 2. Using

Table 1

Conditions and results of experiments

№	Conditions			Results		
	Z_1	Z_2	Z_3	$r \cdot 10^{-6}$	S	K
1	40	20	90	27,56	23	1,4
2	40	10	90	8,91	28	1,63
3	30	15	45	5,04	36	1,9
4	20	10	90	3,56	36,5	1,95
5	40	20	3	8,97	27,5	1,65
6	20	20	3	3,37	37,5	2,05
7	40	10	3	4,91	37	2
8	35	5	3	1,11	42	2,4
9	30	10	3	1,02	42,5	2,42
10	20	13	3	0,89	42,5	2,35

the Excel LINEST function, the following equation was obtained:

$$K_{розр} = 0{,}91576 + 0{,}133555 \cdot Z_1 - 0{,}01079 \cdot Z_2 - 0{,}01529 \cdot Z_3 - 0{,}00253 \cdot Z_1^2 - 0{,}00063 \cdot Z_2^2 + 0{,}00012 \cdot Z_3^2. \quad (1)$$

The quality of the description is assessed by the deviation of the calculated values of the rate constant K_{calc} from the experimental K – the last column. The average deviation is 1.53 %.

According to equation (1), the optimal parameters (maximum rate constants) were determined using the Excel add-in "Solution Search": Z_1 = 26.4 %, Z_2 = = 5 %, Z_3 = 3 min., K_{opt} = 2,57 s^{-1}.

To identify the dependence of the specific surface area of the catalyst on the deposition conditions, table 3 was created.

A dependence was obtained that describes the experimental data with an average deviation of 1.85 %:

$$S = 35{,}784 + 1{,}09788 \cdot Z_1 - 0{,}15623 \cdot Z_2 - 0{,}08468 \cdot Z_3 - 0{,}02511 \cdot Z_1^2 - 0{,}01785 \cdot Z_2^2 + 0{,}0000236 \cdot Z_3^2. \quad (2)$$

According to equation (2), the optimal parameters (maximum specific surface area) were determined using the Excel add-in "Solver Add-in": Z_1 = 21.9 %, Z_2 = 5 %, Z_3 = 3 min, S_{opt} = 46.3 m^2/g.

Similarly to the above, the filtration data for the specific resistance of the sediment were processed. Despite the low quality of the description of the obtained dependence, the optimal parameters (minimum specific resistance) were determined: Z_1 = 20 %, Z_2 = 5 %, Z_3 = 27 min.

Thus, the obtained data indicate the need to use 20–26 % nitric acid when leaching the spent catalyst,

Table 2

Matrix for calculating the coefficients of the second-order equation (objective function: rate constant)

№	Z_1	Z_2	Z_3	Z_1^2	Z_2^2	Z_3^2	K	K_{calc}	% dev.
1	40	20	90	1600	400	8100	1,4	1,34	4,13
2	40	10	90	1600	100	8100	1,63	1,64	0,56
3	30	15	45	900	225	2025	1,9	1,90	0,00
4	20	10	90	400	100	8100	1,95	2,00	2,50
5	40	20	3	1600	400	9	1,65	1,70	3,29
6	20	20	3	400	400	9	2,05	2,06	0,68
7	40	10	3	1600	100	9	2	2,00	0,06
8	35	5	3	1225	25	9	2,4	2,38	0,76
9	30	10	3	900	100	9	2,42	2,43	0,56
10	20	13	3	400	169	9	2,35	2,29	2,76

Table 3

Matrix for calculating the coefficients of the second-order equation (objective function: specific surface area)

№	Z_1	Z_2	Z_3	Z_1^2	Z_2^2	Z_3^2	S	S_{calc}	% dev.
1	40	20	90	1600	400	8100	23	21.83	5.08
2	40	10	90	1600	100	8100	28	28.75	2.67
3	30	15	45	900	225	2025	36	36.0	0.0
4	20	10	90	400	100	8100	36.5	36.92	1.15
5	40	20	3	1600	400	9	27.5	29.01	5.48
6	20	20	3	400	400	9	37.5	37.18	0.86
7	40	10	3	1600	100	9	37	35.92	2.91
8	35	5	3	1225	25	9	42	41.97	0.07
9	30	10	3	900	100	9	42.5	42.52	0.05
10	20	13	3	400	169	9	42.5	42.4	0.24

5 % ammonia water and a minimum aging time of the precipitate after precipitation. The closeness of the values of the optimal parameters for the three objective functions is confirmed by the close relationship between them: the pair correlation coefficients are in the range of 0.83–0.98. The results of the study [12] indicate better dissolution of the spent catalyst in 40 % acid. Therefore, the resulting nitrate solution must be diluted twice before precipitation.

Conclusions. The relationship between the specific resistance of the precipitate during filtration, the specific surface area and the activity of the catalyst obtained from the precipitate with the precipitation conditions, namely the concentration of the starting solutions and the aging time, has been established and described by a second-order equation. The search method in Excel has found the optimal conditions for the precipitation process of a mixture of iron and chromium hydroxides, which ensure maximum catalyst activity and minimum specific resistance of the precipitate during filtration.

Bibliography:

1. Черненко Я. М. Каталізатори та сорбенти : навч. посібник / Я. М. Черненко, М. Д. Волошин, Л. П. Ларичева. Кам'янське : ДДТУ, 2017. 317 с. https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/7/5-7-byk1.pdf

2. Технологія неорганічних речовин. Частина 1. Технологія газів. Навчальний посібник для студентів спеціальності 7.91602. Хімічна технологія неорганічних речовин / Волошин М. Д., Шестозуб А. Б, Черненко Я. М., Зеленська Л. О. Дніпродзержинськ : 2009. 313 с. https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/7/2-7-b4.pdf

3. Гармаш Б. К., Лобойко О. Я., Мороз М. О., Іващенко М. Ю. Спосіб приготування залізохромового каталізатора середньо температурної конверсії оксиду вуглецю. 2012. https://patents.google.com/patent/UA81030U/uk

4. Секереш К. Ю., Гомонай В. І., Голуб Н. П., Баренблат І. О. Дослідження зв'язку каталітичної активності фосфатних каталізаторів з умовами їх виготовлення. Вісник УжНУ. Серія Хімія. Випуск 14. 2005, с. 149–151. https://surl.li/rmggwu

5. Трипольський А. І. Розроблення каталізаторів одержання вищих вуглеводнів з діоксиду вуглецю. Каталіз та нафтохімія, 2022, № 33, с. 10–19. https://doi.org/10.15407/kataliz2022.33.010

6. Chih Chao Wu, D. J. Lee, Chihpin Huang. Determination of the optimal dose of polyelectrolyte sludge conditioner considering particle sedimentation effects. Advances in Environmental Research. Volume 4, Issue 3, August 2000, Pages 245–249. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1093019100000253

7. L. W. Arimieari, J. O. Ademiluyi. Sludge Filtration Resistance Model Based on Electrical Resistance Analogy. Journal of Environmental Protection Vol. 9 No.1, January 2018. https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=81724

8. S. V. Tkachenko, E. V. Stychynskyi, V. V. Petrenko, T. Sheiko, L. M. Khomichak. Determination of the filtration speed under suspensions pressure in the sugar processing. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. Volume 7, June 2023, 100336. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016423000415

9. Faiz M. Mahdi*, Timothy N. Hunter and Richard G. Holdich. A Study of Cake Filtration Parameters Using the Constant Rate Process. Processes 2019, *7*(10), 746. https://www.mdpi.com/2227-9717/7/10/746

10. D. Bourcier, J. P. Féraud, D. Colson, K. Mandrick, D. Ode, et al.. Influence of particle size and shape properties on cake resistance and compressibility during pressure filtration. Chemical Engineering Science, 2016, 144, pp. 176–187. https://centralesupelec.hal.science/hal-01279589/document

11. Башта (Шеремет) А. О., Лагода В. А. Дослідження фільтрувальних властивостей суспензії гідролізату, одержаного із пшениці. 2005 р. https://dspace.nuft.edu.ua/items/e2f816ab-574b-4ff0-84a2-a6220b1dfaa9

12. Kontsevoy, A. Development of a kinetic model of magnetite leaching. Technology Audit and Production Reserves, (2023), 1/3 (69)), 6–9. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.273349

13. A. Rushton, A. S. Ward, R. G. Holdich. Solid-Liquid Filtration and Separation Technology. WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69469 Weinheim (Federal Republic of Germany), 1996.

Концевой А. Л., Концевой С. А. ВПЛИВ УМОВ ОСАДЖЕННЯ НА АКТИВНІСТЬ ЗАЛІЗО-ХРОМОВОГО КАТАЛІЗАТОРУ

Стаття присвячена оптимізації технологічних параметрів процесу виготовлення осадженого середньо температурного каталізатору парової конверсії карбону (II) оксиду. Особливістю виготовлення залізо-хромового каталізатору в рамках даної статті є використання розчину солей заліза і хрому, отриманого вилуговуванням відпрацьованого каталізатору розчином нітратної кислоти. Зливом розчину нітратів і аміачної води отримують осад – суміш гідроксидів заліза і хрому. Для характеристики властивості осаду використано величину питомого опору при фільтруванні (ПОФ), від якої залежать швидкість фільтрування і вибір фільтрувального обладнання. Визначено

мету роботи: вивчення залежності ПОФ осаду, питомої поверхні і активності отриманого з осаду каталізатору від параметрів осадження: концентрації розчину солей, що визначається концентрацією нітратної кислоти Z_1 (від 20 до 40 %) при вилуговуванні відпрацьованого каталізатору, концентрації аміачної води Z_2 (від 5 до 20 %) і часу старіння осаду Z_3 (від 3 до 90 хвилин). З використанням функції ЛІНЕЙН середовища Excel отримано рівняння другого порядку, наприклад, для оцінки активності каталізатору (константи швидкості): $K_{розр} = 0{,}91576 + 0{,}133555 \cdot Z_1 - 0{,}01079 \cdot Z_2 - 0{,}01529 \cdot Z_3 - 0{,}00253 \cdot Z_1^2 - 0{,}00063 \cdot Z_2^2 + 0{,}00012 \cdot Z_3^2$. За допомогою надбудови «Пошук рішення» середовища Excel знайдено оптимальні (максимум константи швидкості) умови проведення осадження: $Z_1 = 26{,}4$ %, $Z_2 = 5$ %, $Z_3 = 3$ хв. Аналогічна обробка експериментальних даних проведена і для питомої поверхні каталізатору та ПОФ осаду. Розрахунком визначено умови для максимальної питомої поверхні: $Z_1 = 21{,}9$ %, $Z_2 = 5$ %, $Z_3 = 3$ хв. та мінімального питомого опору осаду: $Z_1 = 20$ %, $Z_2 = 5$ %, $Z_3 = 27$ хв. Отримані дані свідчать про необхідність використання 20–26 % нітратної кислоти при вилуговуванні відпрацьованого каталізатору, 5 % аміачної води і мінімального часу старіння осаду після осадження. Близькість значень оптимальних параметрів Z_i для трьох цільових функцій підтверджується тісним зв'язком між ними: коефіцієнти парної кореляції знаходяться в інтервалі 0,83–0,98. Враховуючи той факт, що краще розчинення відпрацьованого каталізатору відбувається у 40 % кислоті, отриманий розчин нітратів необхідно розбавляти вдвічі перед осадженням.

Ключові слова: *каталізатор, активність. осадження, питомий опір, питома поверхня, математична модель, оптимальні умови.*

УДК 628.162
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/36

Костенко Є. Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шахновський А. М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Обушенко Т. І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Толстопалова Н. М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сангінова О. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СОРБЕНТИ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ ФТОРИДІВ

Стаття присвячена критичному огляду сорбентів на основі заліза, що використовуються в сучасній практиці очищення природних і стічних вод, які містять сполуки фтору. Контроль присутності вказаних сполук у воді є важливим питанням, оскільки надмірний вміст фторид-іонів у воді становить серйозну загрозу для здоров'я людини та навколишнього середовища. В останні роки технологія адсорбційного очищення води від сполук фтору завдяки своїй високій ефективності та рентабельності посідає чільне місце серед решти використовуваних для цієї мети методів, зокрема, коагуляції та осадження, іонного обміну, мембранного поділу, діалізу, електродіалізу, електрокоагуляції тощо.

У роботі проаналізовано досягнення у сфері адсорбційного дефторування води. Показано, що метод адсорбції показує високу порівняльну ефективність у задачах для видалення фторидів з води через його широкий спектр застосування та екологічну безпечність. Розглянуто поширені сорбційні агенти, що використовуються в практиці водоочищення, зокрема, біосорбенти, мінеральні адсорбенти, цеоліти, вуглецеві адсорбенти. Досліджено властивості адсорбентів, як ключового компоненту технології адсорбційного очищення води. Вивчено дані щодо впливу на процес сорбції зовнішніх та внутрішніх умов, включаючи температуру, розмір пор адсорбенту, співіснуючі іони, pH і т.і., на ефективність сорбційного очищення води від фторидів. Сформульовано переваги й недоліки різних сорбентів з точки зору ефективності, доступності, вартості тощо. Особливу увагу приділено розгляду ефективності для дефторування води адсорбентів на основі заліза, як таких, що характеризуються високою швидкість адсорбції, адсорбційною ємністю та низькою питомою вартістю видалення сполук фтору з води. Особливості названих залізовмісних адсорбентів спричиняють значний обсяг публікацій щодо створення інноваційних підходів до видалення фторидів з води. В роботі проаналізовано особливості використання поширених залізовмісних сорбентів, що використовуються для видалення фторид-іонів.

Ключові слова: *очищення води, стічні води, дефторування, адсорбція.*

Постановка проблеми. Глобальна зміна клімату та чисельність населення світу зростають з кожним днем, і очікується, що до 2050 року населення майже подвоїться, і ці обидва фактори значною мірою пов'язані зі збільшенням потреби у водних ресурсах. З огляду на те, що сільське господарство використовує 70 % прісної води у світі для виробництва продовольства, спостерігається значне зростання попиту на прісну воду. Згідно з Доповіддю про розвиток світових водних ресурсів (WWDR), щорічно використовуються 64 мільярди кубометрів прісної води [1]. Водні ресурси є одними з основних ресурсів людства. Ресурси прісної води на Землі вкрай обмежені,

а тиск промислового розвитку поступово погіршує водне середовище, що призводить до серйозного забруднення поверхневих вод. Зростання населення, що прискорюється, і підвищення рівня життя призвели до встановлення суворих стандартів якості питної води. В останні роки якість води різко впала у зв'язку з надлишковим рівнем фториду. Концентрація розчинених речовин у воді зростає через певні види промислової діяльності, наприклад, побічних продуктів виробництва алюмінію, добрив та залізняку [2]. Забруднення ґрунтових вод фторидами нині є серйозною проблемою у всьому світі. Фториди залишаються у зв'язаному стані, наприклад, CaF_2 (фторид кальцію), $Ca_5(PO_4)_3F$ (фторапатит) та Na_3AlF_6 (кріоліт). Промислові відходи, такі як відходи електронної та металургійної промисловості, є джерелом фториду. Коли ці відходи розчиняються у ґрунті, вони забруднюють ґрунтові води. На відміну від ґрунтових вод, де концентрація фторид-іонів може перевищувати 20 мг/дм^3, поверхневі води мають вміст фториду від 0,1 до 5 мг/дм^3. Тому забруднення фторидом поступово стає значною проблемою довкілля та соціальної охорони здоров'я [1]. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) стверджує, що найкращий діапазон концентрації фториду у питній воді становить 0,5–1,5 мг/дм^3 [2]. Високі концентрації фторид-іонів у воді становлять серйозну загрозу для здоров'я людини та навколишнього середовища. Окрім цього, фторид-іони можуть негативно впливати на нервову систему, викликаючи когнітивні порушення, зниження інтелектуальних здібностей та проблеми з пам'яттю. Високий вміст фторидів також може бути причиною захворювань щитоподібної залози, порушень у роботі нирок і печінки. Надлишок фторид-іонів у природних водоймах шкодить екосистемам, оскільки вони накопичуються в ґрунтах, рослинах і організмах тварин. Це може спричиняти порушення росту рослин, загибель водних організмів та зниження біорізноманіття. Саме тому важливо досліджувати методи очищення води від фторид-іонів, щоб забезпечити її безпеку для здоров'я людей та захистити довкілля від його шкідливого впливу.

У світі проводиться велика кількість досліджень із застосування технології дефторування стічних вод, і досягнуто значних успіхів у галузі дефторування. Зазвичай використовувані методи видалення фториду включають осадження, адсорбцію, електрохімічну технологію, технологію мембранного поділу та інші. Осадження – простий метод, який часто використовується. Однак через додавання хімічних агентів вартість очищення збільшується, та іони фтору у воді після видалення фториду перевищують норми викидів забруднюючих речовин для неорганічної хімічної промисловості. Електрохімічний метод має високу швидкість видалення фториду, але є проблеми з високими витратами на встановлення та обслуговування обладнання [4]. Мембранна фільтрація має перевагу у вигляді високої якості очищених вод при видаленні фториду, але недоліком є забруднення мембран, надмірне споживання енергії та висока вартість [5].

Метод адсорбції має переваги наявності багатьох видів адсорбентів, значну продуктивність, високу швидкість і малу кількість забруднюючих продуктів [6], але довкілля та його фактори (pH, співіснуючі іони, температура, розмір пор адсорбенту тощо) значно впливають на результати видалення фториду.

Пошук інноваційних технологій, які можуть подолати недоліки, пов'язані з традиційними методами, залишається ключовим напрямом у зусиллях з підвищення ефективності та стійкості видалення фториду з джерел води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Алюмінієві оксиди та гідроксиди, такі як активований оксид алюмінію (Al_2O_3) та гідроксид алюмінію ($Al(OH)_3$), широко використовуються для адсорбції фторид-іонів. Вони мають високу адсорбційну ємність завдяки електростатичній взаємодії між фторид-іонами та поверхневими групами алюмінію. Проте, основними недоліками цих сорбентів є зниження ефективності при високих значеннях pH води та потенційний ризик вторинного забруднення води іонами алюмінію, що може бути небезпечним для здоров'я [7].

Залізовмісні сорбенти, зокрема оксид заліза (Fe_2O_3), гідроксид заліза ($Fe(OH)_3$) та змішані залізооксидні матеріали, демонструють високу ефективність у видаленні фторидів з води. Механізм сорбції базується на електростатичній взаємодії та утворенні комплексів між фторид-іонами та поверхневими гідроксильними групами залізовмісних сполук. Основними перевагами таких сорбентів є [8]:

– висока ефективність у широкому діапазоні pH;

– екологічна безпечність, оскільки залізо є природним елементом;

– можливість модифікації для підвищення адсорбційної ємності;

– стійкість до вторинного забруднення.

До природних сорбентів, здатних до сорбції фторидів, належать цеоліти, глинисті мінерали,

гідроксилапатит та боксити. Вони є доступними та екологічно безпечними матеріалами, що можуть забезпечувати адсорбцію фторидів за рахунок іонообмінних механізмів. Однак, їхня ефективність зазвичай нижча порівняно із залізовмісними або алюмінієвими сорбентами, а також може змінюватися залежно від мінералогічного складу та характеристик води [9].

Вибір залізовмісних сорбентів для видалення фторидів зумовлений їх високою ефективністю, стабільністю та екологічною безпечністю. На відміну від алюмінієвих сорбентів, вони не викликають ризику вторинного забруднення токсичними іонами, а також забезпечують ефективну адсорбцію у широкому діапазоні pH. Порівняно з природними сорбентами, залізовмісні матеріали демонструють вищу адсорбційну ємність та можуть бути модифіковані для покращення сорбційних властивостей [10].

Мінеральні та вуглецеві адсорбенти мають перевагу в тому, що вони економічні, але їхня ефективність адсорбції не дуже висока, і трохи ускладнене видалення цих сорбентів. Тому, щоб підвищити економічну ефективність, дослідники та вчені розробили адсорбенти на основі заліза для дефторування. Основними перевагами адсорбентів на основі заліза є їхня висока швидкість адсорбції, велика адсорбційна ємність та низька вартість поділу адсорбентів з водного розчину. Переваги адсорбентів заліза в останні роки привертають все більшу увагу, що призвело до створення інноваційних підходів до видалення фториду з води [11].

Постановка завдання. Метою статті є огляд залізовмісних сорбентів для видалення фторид-іонів з води.

Виклад основного матеріалу. В роботі [12] автори одержували активований $FeCl_3$ вуглець, отриманий із відходів шкірки цитрусових, який використовується для видалення фторид-іонів, що є екологічно чистим підходом до очищення підземних вод і переробки біовідходів. Зразки, отримані при різних температурах, позначали як AC-CLP250 і AC-CLP500. Дослідження показали, що збільшення початкової концентрації фтору знижувало ефективність видалення з 94,7 % до 5,0 % для AC-CLP250 і з 94,8 % до 33,3 % для AC-CLP500. Обидва вуглецевих матеріали мали подібну ефективність, але AC-CLP500 мав значні магнітні властивості, на відміну від AC-CLP250. Найвища ефективність видалення для обох сорбентів спостерігалася при нейтральному pH 6,6, що підходить для практичного очищення в польових умовах. Кінетика адсорбції відповідала моделі псевдодругого порядку, а ізотерма адсорбції узгоджувалась з моделлю Ленгмюра (значення R^2 становили 0,9964 для AC-CLP250 і 0,9776 для ACCLP500). Максимальна ємність для моношару, згідно з моделлю Ленгмюра, становила 4,926 мг/г для AC-CLP250 і 9,709 мг/г для AC-CLP500 при оптимальних умовах (1,0 г/дм^3 сорбенту, 240 хв контакту і температура 25 °C). Процес дефторування визначався як плівковою зовнішньою дифузією, так і внутрішньочастинковою дифузією. Розраховані термодинамічні параметри свідчать, що процес дефторування є ендотермічним і спонтанним у дослідженому температурному діапазоні. Це дозволяє зробити висновок, що AC-CLP може ефективно застосовуватись для видалення фторид-іонів з водного середовища.

Авторами [13] синтезовано залізозаміщені гідроксиапатитні наноматеріали методом співосадження. Процес синтезу включав осадження чистого гідроксиапатиту та гідроксиапатиту, заміщеного залізом у різних концентраціях (0,1 %, 0,3 %, 0,5 % та 0,7 %), на основі співвідношень Ca/P та (Ca + Fe)/P, рівних 1,67. Виявлено, що швидкість адсорбції для обох матеріалів була високою в перші 60 хвилин і поступово знижувалася, досягаючи рівноваги через 180 хвилин. Показано, що зі збільшенням кількості фторидів до 10 мг/дм^3, ефективність видалення зростала, однак після цієї позначки відсоток видалення дещо знижувався, при цьому адсорбційна ємність зростала далі. Висока адсорбційна здатність при низьких концентраціях фтору вказує на обмежену кількість енергетичних центрів у матеріалі. Адсорбційна ємність обох матеріалів зростає з підвищенням температури, що пояснюється збільшенням пористості адсорбенту.

Залізозаміщені гідроксиапатитні наноматеріали показали високу ефективність у видаленні фторид-іонів з водних розчинів, що обумовлено їх розвиненою поверхнею, оптимальними умовами адсорбції та підвищеною селективністю до фтору. Основною перевагою цього сорбенту є значна адсорбційна ємність, особливо при додаванні заліза, що робить його конкурентоспроможним у порівнянні з чистими гідроксиапатитами та іншими адсорбентами, такими як активоване вугілля чи природні мінерали. Крім того, він здатний до регенерації та повторного використання з незначною втратою ефективності, що знижує витрати на його застосування. Однак сорбент має певні обмеження, такі як зниження ефективності у присутності карбонат-іонів, що може усклад-

нити його використання у водах з високим вмістом цих іонів. Також його ефективність падає в лужних умовах, що може обмежити застосування у специфічних середовищах.

Модифіковані залізом частинки кремнезему синтезували автори роботи [14]. Експерименти з періодичної десорбції показали, що сорбент зберігає високу ефективність навіть після п'яти циклів адсорбції-десорбції. Як десорбуючий агент використано 0,1 M NaOH. Ефективність адсорбції незначно зменшувалася з кожним циклом, що свідчить про можливість багаторазового використання сорбенту без значної втрати його ефективності. Підвищення дози сорбенту з 0,2 до 1,0 г призводить до збільшення видалення фтору з 56,4 % до 85,8 %, що пояснюється більшою кількістю активних сорбційних центрів та більшою площею поверхні. Однак подальше підвищення дози сорбенту до 2,5 г не має значного впливу на сорбційну ємність, ймовірно, через агломерацію частинок або перекриття активних центрів. Було виявлено, що сорбція фтору відбувається швидко на початку процесу, досягаючи 84,5 % вже через 45 хвилин, що обумовлено наявністю великої кількості вакантних активних центрів. Після цього швидкість поглинання фториду стабілізується, що може бути пов'язано зі зменшенням кількості активних ділянок та концентрації фториду в розчині. Для інтерпретації даних адсорбції використовували моделі Фрейндліха і Ленгмюра. Дані краще узгоджувалися з ізотермою Фрейндліха ($R^2 = 0{,}989$), що вказує на багатошарову адсорбцію на гетерогенній поверхні адсорбенту. Значення параметра 1/n (0,419) та n (2,384) підтверджують міцність зв'язку між адсорбатом і адсорбентом. Низьке значення константи Ленгмюра (K_L = 0,277 дм^3/мг) вказує на низьку теплоту адсорбції, а значення R_L 0,15 (між 0 і 1) свідчить про сприятливі умови для адсорбції. Максимальна сорбційна ємність за моделлю Ленгмюра складає 8,913 мг/г. Функціоналізовані залізом частинки кремнезему демонструють високу ефективність у видаленні фтору з води, що робить їх перспективним сорбентом для очищення водних ресурсів. Основні переваги включають здатність до багаторазової регенерації без значної втрати ефективності, що сприяє економічній доцільності його використання, а також високу сорбційну здатність навіть при відносно невеликих дозах сорбенту. Завдяки можливості досягнення високих показників адсорбції за короткий час контакту цей сорбент є особливо привабливим для оперативного очищення. Недоліком можна вважати обмежену ефективність на стадії насичення активних сорбційних центрів при великих дозах матеріалу, що знижує рентабельність при інтенсивнішому застосуванні. Попри це, сорбент здатний конкурувати з аналогічними сорбентами завдяки високим адсорбційним властивостям, стабільності в експлуатації та придатності для регенерації, що дозволяє рекомендувати його для видалення фторидів з води.

Досліджено [15] гематитовий біокомпозит α-Fe_2O_3 для видалення фториду з води. Сорбент синтезовано золь-гель методом з використанням крохмалю маніоки як м'якого шаблону. Сорбційна рівновага досягалася за 100 хв при початковій концентрації фториду 10 мг/дм^3 і температурі 298 К. Для аналізу сорбційних даних застосовували моделі псевдопершого і псевдодругого порядків, а також моделі внутрішньочастинкової дифузії Вебера-Морріса та Еловича, що дозволило оцінити ефективність сорбенту і визначити поведінку фторид-іонів на поверхні біокомпозиту α-Fe_2O_3. За допомогою рентгенівської дифрактометрії, SEM-EDS, TEM-EDS та аналізу площі поверхні і пористості виявлено, що композит α-Fe_2O_3 має пористу структуру і є стабільним у воді з мінімальним вилуговуванням металів. Він показав високу ефективність у видаленні іонів фтору при pH 6–8, хоча ефективність знижувалася у присутності PO_4^{3-} та HCO_3^-. Згідно з результатами, оптимальними умовами для досягнення 85,26 % ефективності видалення фтору є доза сорбенту 0,55 г, початкова концентрація фториду 55 мг/дм^3, pH 7,5 та час контакту 95 хвилин. Ізотерма сорбційної рівноваги свідчить про багатошарову адсорбцію на гетерогенній поверхні з різною спорідненістю до фториду. Найкраще кінетика сорбції описується моделлю псевдодругого порядку (R^2 = 0,9764), що вказує на те, що швидкість процесу лімітована сорбцією. Термодинамічні параметри свідчать про те, що сорбція фториду на біокомпозиті α-Fe_2O_3 є спонтанною, екзотермічною та ентропійно керованою. Дослідження показали, що синтезований біокомпозит α-Fe_2O_3 є перспективним сорбентом для видалення фториду та інших забруднювачів з води. Його головні переваги включають стабільність у воді, високу сорбційну здатність у нейтральному діапазоні pH (6–8) та здатність до багатошарової адсорбції. Крім того, композит є економічним і екологічним завдяки використанню природних компонентів і мінімальному вилуговуванню металів, що робить його безпечним для водного середовища. Серед недоліків сорбенту – чутливість до деяких іонів, таких як фосфати і бікарбонати, які

знижують його ефективність, що може обмежувати його застосування в умовах з високим вмістом цих аніонів.

Автори [16] використовували для видалення фториду з води відпрацьовану кавову гущу та залізний шлам. Дослідження показали, що для зниження фтору на 62,92 % при початковій концентрації 3 мг/дм^3 оптимальною дозою залізного шламу є 30 г/дм^3 з часом контакту 30 хвилин. При використанні кавової гущі найкращими умовами стали доза 60 г/дм^3 з часом перемішування 60 хв або 50 г/дм^3 з часом перемішування 90 хв, при яких концентрація фториду знижувалася на 56,67 %. Отримані результати вказують, що доза сорбенту більше впливає на ефективність зниження концентрації фториду, ніж час контакту. Двофакторний дисперсійний аналіз також підтвердив, що доза сорбенту (фактор А) має сильніший вплив, ніж час контакту (фактор В). У дослідженні встановлено статистично значущі відмінності між середніми значеннями концентрацій фториду для кавової гущі та залізного шламу, що свідчить про їх потенціал як ефективних адсорбентів для очищення води від фториду. Використання відпрацьованої кавової гущі та залізного шламу для видалення фториду з води показало обнадійливі результати. Обидва сорбенти продемонстрували здатність значно знижувати концентрацію фториду до рівнів, які відповідають допустимим нормам. Основною перевагою цих матеріалів є їхня доступність та екологічність, адже вони є вторинними продуктами, що сприяє зниженню витрат на очищення води та мінімізації відходів. Однак залізний шлам має більш високу ефективність при меншій дозі та меншому часу контакту в порівнянні з кавовою гущею, що робить його більш придатним у практичному застосуванні. Кавова гуща потребує вищих доз та довшого часу контакту, що може обмежити її конкурентоспроможність у порівнянні з іншими сорбентами. Водночас обидва сорбенти можуть скласти конкуренцію традиційним методам очищення завдяки своїм економічним та екологічним перевагам, особливо в умовах, де доступні вторинні ресурси, такі як кавова гуща та шлам.

Для видалення фториду з води [17] використовували первинну пемзу як адсорбент. У дослідженні впливу часу контакту на ефективність адсорбції було встановлено, що з його збільшенням кількість адсорбованого фториду також зростає, за умови постійного дозування пемзи та швидкості перемішування. Згідно з результатами, первинна пемза є доступним та економічно вигідним адсорбентом для видалення фториду з води. Ефективність цього матеріалу залежить від концентрації фториду у воді, дози адсорбенту та тривалості контакту з розчином. Виявлено, що ефективність адсорбції пемзи прямо пропорційна тривалості контакту, а також кількості сорбенту, проте зменшується при вищій початковій концентрації фториду. Значення R_L для ізотерми Ленгмюра становило 0,013, що підтверджує сприятливі умови для адсорбції. Первинна пемза продемонструвала гарні властивості для видалення фториду з води, особливо завдяки своїй низькій вартості та легкій доступності. Основною перевагою цього сорбенту є ефективне видалення фториду при відносно низьких дозах пемзи, що робить його економічно вигідним. Крім того, ефективність пемзи збільшується із часом контакту, що дозволяє досягти високих показників адсорбції навіть за короткі періоди. Проте, у цього сорбенту є певні обмеження, зокрема зниження ефективності при підвищенні початкової концентрації фториду, що пов'язано з конкуренцією іонів за активні центри. Також існує тенденція до агломерації частинок при підвищенні дози, що знижує доступність активних зон. Незважаючи на це, пемза може конкурувати з іншими адсорбентами завдяки своїм економічним перевагам і простоті використання, особливо в регіонах, де вона доступна в природному вигляді.

Синтезовано [18] композитний оксид Fe/Al/Ni, при змішуванні $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ та $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ у молярному співвідношенні 1:1:1. Композитний адсорбент охарактеризовано за допомогою різних методів, включаючи РЕМ, РФА, ІЧ-спектроскопію, дзета-потенціал та електронографію, щоб детально дослідити його структуру і властивості по вілношенню до дефторування. Кінетика адсорбції відповідала моделі псевдодругого порядку, а ізотерма адсорбції фториду – моделі Фрейндліха, що вказує на багатошарову адсорбцію на гетерогенній поверхні. При початковій концентрації фториду 200 мг/дм^3 максимальна адсорбційна здатність композиту досягала 59,5 мг/г, згідно з моделлю Ленгмюра. Оптимальні умови для видалення фториду (93,6 %) досягалися при pH 7 і концентрації фтору 10 мг/дм^3. Дослідження впливу сторонніх аніонів показали, що хлорид, сульфат та нітрат майже не впливають на адсорбцію фтору, тоді як фосфат і карбонат значно знижують її ефективність. Композит Fe/Al/Ni зберігає високу адсорбційну здатність навіть при повторному використанні, що дозволяє здійснювати його регенерацію для подальших циклів очищення.

Загалом, Fe/Al/Ni-композит може конкурувати з аналогічними сорбентами, завдяки своїм високим показникам адсорбції та стабільності, і є перспективним вибором для довготривалого очищення води від фторидів.

В роботі [19] досліджували суперпарамагнітні наночастинки Fe_3O_4. Сорбент синтезовано за допомогою простого гідротермального методу. Адсорбційні характеристики наночастинок Fe_3O_4 щодо фториду виявилися відмінними, з максимальною адсорбційною здатністю 70,64 мг/г. Дані експерименту показали, що процес адсорбції фториду добре узгоджується з моделлю Фрейндліха та кінетикою псевдодругого порядку, що вказує на хімічну природу адсорбції. Оптимізація умов адсорбції показала, що найкращі результати досягаються при pH 7,0 і дозі адсорбенту 100 мг, навіть у присутності конкуруючих аніонів. Дослідження методом FT-IR, XPS та дзета-потенціалу підтвердили, що сульфат-аніони і гідроксильні групи на поверхні відіграють важливу роль у процесі видалення фториду з розчину. Крім того, можливість багаторазового використання сорбенту завдяки магнітним властивостям спрощує процес регенерації і знижує загальні витрати. Проте ефективність сорбенту може залежати від присутності специфічних функціональних груп на поверхні, таких як сульфат-аніони і гідроксильні групи, що може ускладнювати його застосування у деяких складних водних розчинах. Незважаючи на це, сорбент є конкурентоспроможним завдяки високій адсорбційній здатності та стабільності, що робить його перспективним вибором для очищення води від фторидів у порівнянні з традиційними методами.

Синтезовано [20] наночастинки $LaFeO_3$ гідротермальним методом. Дослідження показали, що різні початкові концентрації фториду (від 15 до 40 мг/дм^3) та час контакту (від 15 до 120 хв) впливають на ефективність видалення фториду наночастинками при pH 5. Оптимальні умови для адсорбції фтору становили: концентрація фтору 20 мг/дм^3, pH 5, доза $LaFeO_3$ 0,9 г/дм^3, температура 308 К і час контакту 60 хв. За цих умов досягнуто максимального видалення фториду – 94,75 %. Адсорбційна ємність моношару наночастинок $LaFeO_3$ склала 2,575 мг/г. Процес адсорбції добре узгоджується з моделями Фрейндліха, Кобле-Коррігана та кінетикою псевдодругого порядку, що свідчить про ефективність наночастинок $LaFeO_3$ для зниження концентрації фториду у водних середовищах. Основною перевагою цього сорбенту є здатність працювати в широкому діапазоні pH, що дозволяє адаптувати його до різних середовищ. Крім того, модель адсорбції, яка відповідає ізотермі Фрейндліха та кінетиці псевдодругого порядку, свідчить про надійну адсорбцію фториду навіть при відносно високих початкових концентраціях. Однак, адсорбційна ємність моношару в 2,575 мг/г є дещо обмеженою порівняно з іншими сучасними сорбентами. Це може вимагати вищих доз для досягнення необхідного рівня очищення в сильно забруднених водах, що може зменшувати економічну привабливість цього матеріалу. Попри це, $LaFeO_3$ завдяки стабільності та високій ефективності за оптимальних умов залишається конкурентоспроможним і може ефективно використовуватися для очищення води від фториду в різних умовах.

Автори роботи [21] синтезували композитний сорбент ETS4/Fe_3O_4, модифікований лантаном і залізом. Оптимальні значення адсорбційної ємності становили 260,69 мг/г для La-модифікованого сорбенту та 231,43 мг/г для залізо-модифікованого. Сорбент показав високу ефективність видалення фториду з води завдяки високій адсорбційній ємності і здатності швидко досягати рівноваги за 180 хв, а половина рівноважної ємності досягалася всього за 50 хв. Модель псевдодругого порядку та ізотерма Фрейндліха показали, що процес адсорбції був хемосорбційним, багатошаровим і гетерогенним. Магнітні властивості дозволяють легко вилучати сорбент з розчину, що робить його практичним у використанні, а регенерація відбувається просто за допомогою лужної обробки.

Досліджено [22] композитний матеріал ALCS-Fe-Al, що базується на утилізації заліза та алюмінію з осаду очищення питної води. У водному розчині з концентрацією фториду 10 мг/дм^3 композит знижував рівень фториду до менш ніж 1,50 мг/дм^3, що відповідає міжнародним стандартам якості питної води. Кінетичні дослідження показали, що адсорбція фториду на ALCS-Fe-Al узгоджується з кінетичною моделлю псевдопершого порядку, а ізотерма адсорбції відповідає моделі Ленгмюра з ємністю 30,49 мг/г. Велика кількість гідроксильних груп на поверхні ALCS-Fe-Al, а також Fe_3O_4/Al_2O_3 виступають активними центрами для адсорбції фториду. Механізм адсорбції фториду включає лігандний обмін, поверхневу координацію, електростатичну адсорбцію та іонний обмін, що забезпечує високу ефективність видалення фториду в діапазоні pH 4–9. Наявність аніонів у воді незначно впливає на ефективність адсорбції. Крім того, ALCS-Fe-Al можна регенерувати за допомогою

метанолу, зберігаючи високу ефективність навіть після 6 циклів регенерації. Композит ALCS-Fe-Al показав себе як ефективний і надійний сорбент для видалення фториду з питної води. Серед його головних переваг – висока адсорбційна ємність, стабільність у широкому діапазоні pH, легке відділення завдяки магнітним властивостям та здатність до багаторазової регенерації без втрати ефективності. Використання метанолу для регенерації робить цей процес зручним і економічним. Композит також демонструє стійкість до впливу інших іонів у воді, що дозволяє застосовувати його для різних типів води. Основним недоліком може бути потреба в попередньому синтезі з кількома етапами обробки, але в умовах масштабного виробництва цей сорбент здатен конкурувати з іншими адсорбентами завдяки низькій вартості вихідної сировини та довготривалому використанню.

Феригідрит, модифікований кальцієм синтезували шляхом осадження в роботі [23]. Модифікований феригідрит показав високу адсорбційну здатність завдяки обробці кальцієм, що покращило його ефективність для дефторування. Дослідження показали, що на адсорбцію незначно впливають аніони та органічні речовини, а наявність катіонів сприяє кращому вилученню фториду. Застосовані ізотерми адсорбції Ленгмюра і Фрейндліха показали високу відповідність експериментальним даним, що вказує на ефективне багатошарове поглинання фториду. Кінетика адсорбції відповідає моделі псевдодругого порядку, що свідчить про хемосорбційний механізм процесу. Крім того, адсорбція є ендотермічною, що означає підвищену ефективність при збільшенні температури. Його перевагою є стабільна адсорбційна здатність, а також нечутливість до впливу аніонів і органічних домішок при низьких концентраціях, що робить його зручним для застосування в різних умовах. Сорбент показує найкращі результати при pH 5,75 і температурі 25 °C, а також підтримує стабільність протягом кількох циклів регенерації. Вплив катіонів, які посилюють адсорбцію, є ще одним позитивним аспектом.

Висновки. Одже, обгрунтовано застосування адсорбції для ефективного видалення фторидіонів з природних та стічних вод. Серед відомих адсорбентів залізовмісні мають певні переваги. Вибір залізовмісних сорбентів для видалення фторидів зумовлений їх високою ефективністю, стабільністю та екологічною безпечністю. На відміну від алюмінієвих сорбентів, вони не викликають ризику вторинного забруднення токсичними іонами, а також забезпечують ефективну адсорбцію у широкому діапазоні pH. Порівняно з природними сорбентами, залізовмісні матеріали демонструють вищу адсорбційну ємність та можуть бути модифіковані для покращення сорбційних властивостей.

Список літератури:

1. Mariappan Santhi, V., Periasamy, D., Perumal, M., Sekar, P. M., Varatharajan, V., Aravind, D., Senthilkumar, K., Kumaran, S. T., Ali, S., Sankar, S., Vijayakumar, N., Boominathan, C., Krishnan, R. S. The Global Challenge of Fluoride Contamination: A Comprehensive Review of Removal Processes and Implications for Human Health and Ecosystems. *Sustainability*. 2024. V. *16*(24). P. 1–26. https://doi.org/10.3390/su162411056

2. Zhao X., Li Y., Carroll K. C., Li F., Qiu L., Huo Z. *Mesoporous goethite for rapid and high-capacity fluoride removal from drinking water. Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. V. *9*(4). P. 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105278

3. Bhatnagar A., Kumar E., Sillanpää M. Fluoride removal from water by adsorption – A review. *Chemical Engineering Journal*. 2011. V. 171(3), P. 811–840. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2011.05.028

4. Ahmad S., Singh R., Arfin T., Neeti K. Fluoride contamination, consequences and removal techniques in water: a review. *Environmental Science: Advances*. 2022. V. 1. P. 620–661. https://doi.org/10.1039/d1va00039j

5. El Messaoudi N., Franco D. S., Gubernat S., Georgin J., Şenol Z. M., Ciğeroğlu, Z., Allouss D., El Hajam M. Advances and future perspectives of water defluoridation by adsorption technology: A review. *Environmental research*. 2024. V. *252* Pt. 1. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118857

6. Berhane Desta Gebrewold, Adhena Ayaliew Werkneh, Pimluck Kijjanapanich, Eldon R. Rene, Piet N. L. Lens, Ajit P. Annachhatre, Low cost materials for fluoride removal from groundwater, Journal of Environmental Management. 2024. V. 370. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122937

7. Jing F., Hui B., Yudan X., Rui Z., Puli Z., Duo B., Zeng D., Wei L., Xuebin L. Recycling of iron and aluminum from drinking water treatment sludge for synthesis of a magnetic composite material (ALCS-Fe-Al) to remove fluoride from drinking water. *Groundwater for Sustainable Development*. V. 11. 2020. P.1–9. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100456

8. Sinharoy A., Chung C. M. Fluoride removal from wastewater and potential for resource recovery: Comparative studies between different treatment technologies. Environmental Engineering Research. 2024. V. 29(6). https://doi.org/10.4491/eer.2024.179

9. Zhao M., Wang Q., Krua L. S. N., Yi R., Zou R., Li X., Huang P. Application Progress of New Adsorption Materials for Removing Fluorine from Water. *Water*. 2023, V. *15*, № 4. 646. P. 1–17. https://doi.org/10.3390/w15040646

10. Patel D., Kulwant M., Shirin S., Varshney R., Pandey G., Yadav A. K. Fluoride Removal from Aqueous Solution Using Iron-Based Materials: Preparation, Characterization, and Applications. *Advanced Treatment Technologies for Fluoride Removal in Water*. Yadav A. K., Shirin S., Singh V. P. Water Purification. Springer Cham. 2023. P. 71–92. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38845-3_4

11. Ahmad K., Shah I. A, Ali S., Khan M. T., Qureshi M. B. A., Shah S. H. A., Ali A., Rashid W., Gul H. N. Synthesis and evaluation of Ca-doped ferrihydrite as a novel adsorbent for the efficient removal of fluoride. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. V. 29(4). P. 6375–6388. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16105-5

12. Siddique A., Nayak A. K., Singh J. Synthesis of FeCl3-activated carbon derived from waste Citrus limetta peels for removal of fluoride: An eco-friendly approach for the treatment of groundwater and bio-waste collectively. *Groundwater for Sustainable Development*. 2020. № 10. P. 1–14. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352801X1830290X

13. Adamu D. B., Zereffa E., Segne T. A., Razali M. H., Lemu B. R. Synthesis of iron-substituted hydroxyapatite nanomaterials by co-precipitation method for defluoridation. *Materials Research Express*. 2023. № 10. P. 1–18. https://doi.org/10.1088/2053-1591/acca65

14. Kiprono P., Kiptoo J., Nyawade E., Ngumba E. Iron functionalized silica particles as an ingenious sorbent for removal of fluoride from water. *Scientific Reports*. 2023. V. 13. P. 1–13. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34357-8

15. Ojok W., Ntambi E., P Bolender J., Wasswa J., Wanasolo W., Moodley B. Synthesis and characterization of hematite biocomposite using cassava starch template for aqueous phase removal of fluoride. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2022. V. 4. P. 100241–100257. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100241

16. Siaurusevičiūtė, I., Albrektienė, R. Removal of Fluorides from Aqueous Solutions Using Exhausted Coffee Grounds and Iron Sludge. *Water*. 2021. V. *13*(11). P. 1512. https://www.mdpi.com/2073-4441/13/11/1512

17. Singh S. K., Shweta S., Shrivastava Mansi, Aggarwal Shivankar. Fluoride removal from Drinking Water by pristine pumice as adsorbent. *RASAYAN Journal of Chemistry*. 2020. V. 13. № 4. P. 2603–2608. https://www.researchgate.net/publication/348390629

18. Sun B., Zhang J., Ding C., Xu F., Cheng Y., Tang Z., Pan F., Liu J., Zhu S. Synthesis and characterization of Fe-Al-Ni ternary composite metal oxides as highly efficient adsorbent for fluoride removal from water. *Desalination and Water Treatment*. 2021. № 229. P. 243–251. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S19443986240889

19. Kaisheng Z., Baisheng Z. Wu Y., Yong J., Peijuan J., Qiang Z., Lingtao K., Jinhuai L. Fluoride removal performance and mechanism of superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles. *Desalination and Water Treatment*. 2021. № 233. P. 281–291. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27541

20. Mesbah M., Hamedshahraki S., Ahmadi S., Sharifi M., Igwegbe C. A. Hydrothermal synthesis of $LaFeO_3$ nanoparticles adsorbent: Characterization and application of error functions for adsorption of fluoride. *MethodsX*. 2020. № 7. P. 1–15. https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100786

21. Esmaeeli N., Faghihian H. Synthesis and characterization of magnetized ETS-4 modified with lanthanum and iron for fluoride adsorption. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2020. № 39. P. 1–10. https://doi.org/10.1002/ep.13420

22. Jing F., Hui B., Yudan X., Rui Z., Puli Z., Duo B., Zeng D., Wei L., Xuebin L. Recycling of iron and aluminum from drinking water treatment sludge for synthesis of a magnetic composite material (ALCS-Fe-Al) to remove fluoride from drinking water. *Groundwater for Sustainable Development*. 2020. № 11. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352801X20300783

23. Ahmad K., Izaz S., Sharafat A., Muhammad K., Muhammad Q., Syed S., Asmat A., Rashid W., Hifza G. Synthesis and evaluation of Ca-doped ferrihydrite as a novel adsorbent for the efficient removal of fluoride. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. V. 29. P. 1-14. https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-021-16105-5

Kostenko Ye. G., Shakhnovsky A. M., Obushenko T. I., Tolstopalova N. M., Sanginova O. V.

IRON-BASED SORBENTS FOR FLUORIDE REMOVAL

This article is devoted to the critical review of iron-based sorbents employed in contemporary practices for the treatment of natural and wastewater containing fluoride compounds. Monitoring the presence of such compounds in water is of paramount importance, as excessive concentrations of fluoride ions pose a serious threat to both human health and the environment. In recent years, adsorption technologies for the removal

of fluoride from water have gained a leading position among other available methods – such as coagulation and precipitation, ion exchange, membrane separation, dialysis, electrodialysis, and electrocoagulation – due to their high efficiency and cost-effectiveness.

The study analyzes recent advancements in the field of water defluoridation through adsorption. It demonstrates that adsorption exhibits a high comparative efficiency in fluoride removal due to its broad applicability and environmentally friendly approaches. The paper reviews commonly used sorbent agents in water treatment, including biosorbents, mineral adsorbents, zeolites, and carbon-based materials. Particular attention is given to the properties of adsorbents as key components of adsorption-based water purification technologies. The influence of both external and internal factors – such as temperature, pore size of the adsorbent, coexisting ions, pH, etc. – on the effectiveness of fluoride adsorption is also examined. The advantages and limitations of various sorbents are outlined in terms of efficiency, availability, cost, and other relevant criteria.

Special emphasis is placed on the evaluation of iron-based adsorbents for water defluoridation, which are characterized by high adsorption rates, significant sorption capacities, and low specific costs for fluoride removal. These distinctive features of iron-containing sorbents have led to a substantial body of research focused on the development of innovative approaches to fluoride elimination. The article provides an in-depth analysis of the application features of widely used iron-based sorbents for fluoride ion removal.

Key words: *water treatment, wastewater, defluoridation, adsorption.*

УДК 664.286
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/37

Кучинська Д. А.
Київський національний університет технологій та дизайну

Іщенко О. В.
Київський національний університет технологій та дизайну

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗЧИНІВ НА ОСНОВІ КРОХМАЛЮ МОДИФІКОВАНОГО МОЛОЧНОЮ КИСЛОТОЮ

В статті надані дослідження реологічних кривих полімерних композицій на основі модифікованого крохмалю та полівінілового спирту, для потенційного використання у створенні біосумісних плівок. Досліджено ступень тиксотропного відновлення і встановлено залежності між напругою зсуву і швидкістю зсуву полімерних композицій. Вивчено вплив модифікації крохмалю молочною кислотою в кількості 0,5 моль/л та 1,0 моль/л на реологічні властивості. Встановлено, що процес модифікації крохмалю сприяє зміні структурної організації полімерних ланцюгів, що проявляється у зміні реологічних параметрів системи.

Значення реологічної константи K змінювалися в межах 6,84–8,01 Па·с залежно від складу та тривалості модифікації (1,5, 2,0, 2,5 год). Дослідження показало, що зі збільшенням вмісту полівінілового спирту в композиціях (відношення модифікований крохмаль/полівініловий спирт 25:75, 50:50, 75:25) спостерігається зниження показника плинності n до 0,55, що вказує на підвищену структурованість системи та її неньютонівську поведінку. Це свідчить про можливість регулювання механічних характеристик матеріалу шляхом варіювання співвідношення компонентів.

Визначено тиксотропність розчинів, показники знаходяться в діапазоні 87,1–96,8 %, що показало високий ступінь відновлення структури полімерної композиції. Висока тиксотропність є важливим параметром для забезпечення стабільності матеріалів під дією механічних навантажень, що є ключовим фактором при розробці біомедичних матеріалів, зокрема плівок для медичних застосувань. Крім того, отримані результати демонструють можливість прогнозованої зміни за рахунок контролю реологічних параметрів початкових розчинів.

Отримані результати можуть бути використані для розробки медичних плівок із заданими властивостями, що відкриває перспективи їх застосування у сфері регенеративної медицини, хірургії та створення біосумісних покриттів для ранових пов'язок.

Ключові слова: *крохмаль, полівініловий спирт, ранові пов'язки, реологія, тиксотропність.*

Постановка проблеми. Крохмаль, незважаючи на свою біосумісність та біодеградабельність, має певні обмеження при використанні для створення плівок медичного призначення. Чистий крохмаль часто характеризується недостатньою механічною міцністю, розчинністю та водостійкістю. Для подолання цих недоліків застосовують різноманітні методи модифікації, які дозволяють покращити функціональні властивості крохмалю. Однак, модифікація може вплинути на реологічні властивості полімерних розчинів, що, в свою чергу, впливає на процес формування плівок та їхні кінцеві властивості. Тому дослідження реологічних властивостей розчинів на основі модифікованого крохмалю є важливим етапом розробки нових біоматеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Структурні та функціональні властивості медичних плівок, такі як міцність на розрив, еластичність, водостійкість та пропускна здатність для лікарських речовин, значною мірою залежать від реологічних властивостей полімерних розчинів, з яких вони формуються. В'язкість, псевдопластичність та інші реологічні параметри впливають на процес формування плівки, її однорідність та пористість. Крім того, реологічні характеристики визначають взаємодію полімеру з розчинником, що впливає на швидкість випаровування та утворення полімерної матриці [1].

Для успішного виробництва плівок з передбачуваними властивостями необхідне глибоке розуміння реологічних характеристик використовуваних матеріалів. В'язкість, як один з ключових реологічних параметрів, безпосередньо впливає на процес формування плівки, її товщину, одно-

рідність та механічні властивості. За допомогою реометрів досліджують залежність в'язкості від температури, тиску та швидкості зсуву, що дозволяє підібрати оптимальні умови виробництва. Отримані дані часто апроксимують різними реологічними моделями, такими як модель Бінгема чи модель Гершель-Булклі, для більш точного опису поведінки матеріалу в широкому діапазоні умов.

Реологічні характеристики матеріалу тісно пов'язані з його кінцевими властивостями. Вимірювання в'язкості та інших реологічних параметрів дозволяє нам оцінити, як матеріал поводитиметься під час обробки та експлуатації. Це особливо важливо для таких продуктів, як медичні плівки, де від властивостей матеріалу залежить ефективність застосування. Реологічні дані допомагають нам прогнозувати такі характеристики, як міцність, гнучкість, адгезія та біосумісність кінцевого продукту [2].

Реологічні параметри плівкоутворюючого розчину, такі як в'язкість, пластичність та тиксотропія, визначають його поведінку під час нанесення та формування плівки. Зміни реологічних властивостей під час переходу від рідкого до твердого стану можуть призвести до утворення внутрішніх напружень, які в подальшому можуть викликати появу дефектів на поверхні покриття. Крім того, реологія впливає на рівномірність розподілу пігментів та наповнювачів у плівці, що також впливає на її зовнішній вигляд та експлуатаційні характеристики.

Для характеристики поведінки водорозчинних полімерів при течії найчастіше використовується емпіричне рівняння Оствальда-де-Вілла:

$$\tau = k \cdot \gamma^n.$$

Воно описує псевдопластичні властивості таких матеріалів, тобто зменшення їх в'язкості зі зростанням швидкості зсуву. При цьому, залежність напруги зсуву від швидкості зсуву в логарифмічних координатах набуває лінійного характеру, що значно спрощує обробку експериментальних даних. Параметри рівняння Оствальда-де-Вілла – коефіцієнт консистенції K та індекс течії n – мають фізичний зміст і характеризують реологічні властивості матеріалу. Зокрема, коефіцієнт K визначає загальний рівень в'язкості, а індекс течії n – ступінь відхилення від ньютонівської поведінки. Важливо зазначити, що значення цих констант залежать від температури та інших зовнішніх факторів, а також від діапазону швидкостей зсуву, в якому проводяться вимірювання.

Реологічні властивості плівкоутворюючих розчинів, зокрема в'язкість, мають вирішальний вплив на процес формування плівок та їхні властивості [3]. Однак, досі залишається недостатньо вивченим питання взаємодії різних компонентів у полімерних сумішах та їхній вплив на реологію системи. Крім того, механізми, що лежать в основі формування структури плівок з урахуванням реологічних характеристик розчинів, потребують подальшого дослідження.

Структура крохмалю та його похідних визначає широкий спектр їхніх властивостей, включаючи розчинність, в'язкість, здатність до утворення гелів та плівок. Модифікація крохмалю дозволяє контролювати ці властивості, однак часто призводить до зміни реологічних характеристик його розчинів. Недостатньо дослідженим питанням залишається вплив різних типів модифікації на реологічні властивості крохмалю та, як наслідок, на процес формування плівок та їхні механічні властивості. Розуміння цих зв'язків є необхідним для розробки нових біомедичних матеріалів на основі модифікованого крохмалю.

В'язкість розчину, що містить декілька компонентів та розчинених у низькомолекулярній рідині, є важливим показником, який визначає такі характеристики, як однорідність суміші, швидкість випаровування розчинника та, зрештою, властивості отриманого матеріалу [4].

Полівініловий спирт, завдяки своїй біосумісності та здатності утворювати гідрофільні гелі, полівініловий спирт знаходить широке застосування в фармацевтичній промисловості як допоміжна речовина, що впливає на реологічні характеристики лікарських форм та забезпечує пролонговане вивільнення активних фармацевтичних інгредієнтів [5–6].

Одним із прикладів фізичної модифікації полімерів є створення полімерних покриттів для регенеративної медицини. Залежно від призначення, такі покриття можуть бути у формі гелів, плівок, пластин або порошків. Їх отримують шляхом комбінування різних полімерів, що дозволяє регулювати властивості матеріалу в широкому діапазоні. Особливий інтерес представляють полімерні композити, що поєднують в собі полімери з різною хімічною природою та молекулярною масою. Така різноманітність композиційних матеріалів відкриває широкі можливості для створення покриттів з заданими властивостями, що забезпечують оптимальні умови для загоєння ран та опіків [7]. Серед природних полімерів, які активно використовуються для створення біомедичних матеріалів, варто відзначити крохмаль. Цей полісахарид, що складається з лінійних (амілоза) та розгалужених (амілопектин) лан-

цюгів глюкози, характеризується високою біосумісністю та біодеградабельністю. Залежно від типу модифікації, змінюється структура крохмалю, що впливає на його розчинність, в'язкість, здатність до утворення гелів та плівок [8–9]. Це відкриває широкі можливості для створення біоматеріалів з контрольованими властивостями, які можуть бути використані для регенеративної медицини.

Незважаючи на значний прогрес у дослідженні модифікованого крохмалю, залишається ряд невирішених питань. Зокрема, недостатньо вивчений вплив різних методів хімічної модифікації на реологічні властивості крохмалю та їхній взаємозв'язок з механічними властивостями отриманих плівок [10]. Математичне моделювання реологічних процесів також є перспективним напрямком досліджень, який дозволить оптимізувати процеси отримання плівок і прогнозувати їхню поведінку в експлуатації.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження та розробка рецептурного складу композиції на основі полівінілового спирту (ПВС) з додаванням крохмалю модифікованого (МК) молочною кислотою для подальшого виготовлення з неї плівок медичного призначення. Дослідження реології дозволить встановити умови для отримання плівок з необхідними механічними властивостями, а також контролювати процес вивільнення активних речовин. Це є актуальним завданням для розробки нових біомедичних матеріалів на основі крохмалю.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження були композиційні матеріали на основі полімерних розчинів, отриманих шляхом модифікації крохмалю молочною кислотою та подальшого комбінування з полівініловим спиртом. Метою дослідження було розроблення біосумісних плівок для потенційного застосування в медицині. Для одержання біосумісних плівок використовували картопляний крохмаль (CAS 9005-25-8), гліцерин, полівініловий спирт (ПВС 17-99, CAS: 9002-89-5). Картопляний крохмаль модифікували з використанням двох різних концентрацій розчину молочної кислоти (ДСТУ 4621:2006) 0,5 моль/л та 1,0 моль/л. Для кожної концентрації модифікацію проводили при постійній температурі 40 °C протягом 1,5; 2,0 та 2,5 годин. Для отримання плівок різного складу готували 10 % розчини модифікованого крохмалю і полівінілового спирту. Ці розчини змішували в трьох різних співвідношеннях (мас.ч.): 25:75, 50:50 і 75:25 (МК/ПВС). Як пластифікатор був використаний гліцерин (CAS 56-81-5) – 1 мас.ч. Для формування плівок з цих сумішей використовувався метод поливу з розчину, формувальний розчин наносили на поліпропіленову поверхню та сушили плівку при 40 °C протягом 24 год.

Для вимірювання в'язкості був обраний віскозиметр «Vevor NDJ-5D» (цифровий ротаційний віскозиметр) з температурним інтервалом 23–25 °C.

У ході проведених реологічних досліджень було отримано криві залежності в'язкості від швидкості зсуву для різних зразків розчину МК/ПВС. Графічні залежності наведені на рисунках 1 і 2. Аналіз отриманих кривих дозволяє визначити вплив кон-

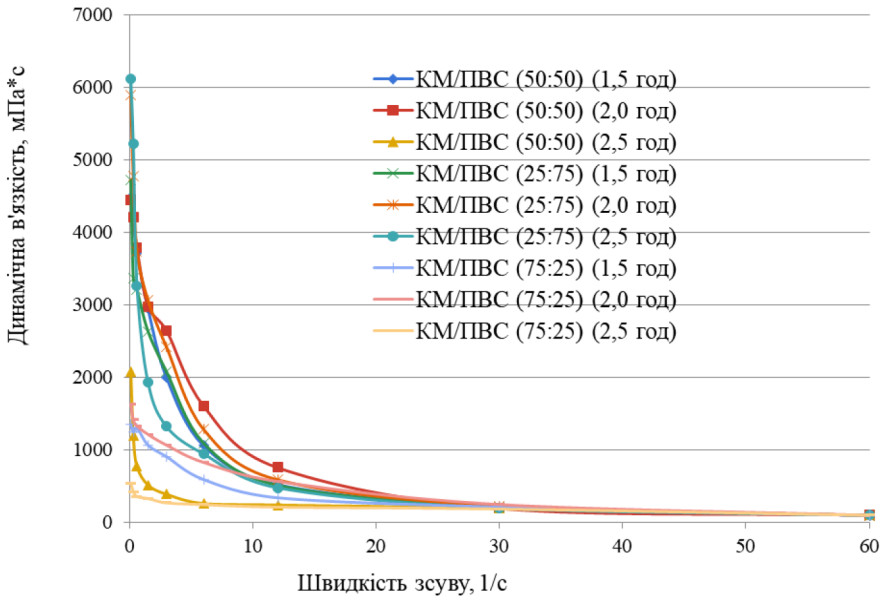


Рис. 1. Реологічні залежності для розчинів модифікований крохмаль/полівініловий спирт при концентрації молочної кислоти 1,0 моль/л

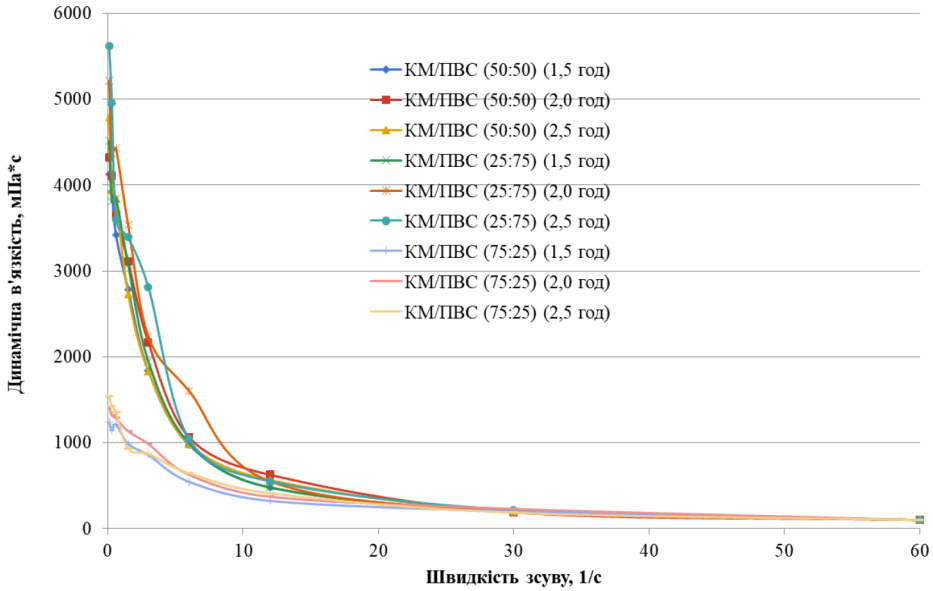


Рис. 2. Реологічні залежності для розчинів модифікований крохмаль/полівініловий спирт при концентрації молочної кислоти 0,5 моль/л

центрації молочної кислоти на реологічні властивості системи.

Після математичної обробки експериментальних даних було обчислено константи рівняння Оствальда-де-Вілля, що характеризують реологічну поведінку досліджуваних розчинів. Отримані значення представлені у таблиці 1.

В композиціях на основі полісахаридів, зі збільшення кількості ПВС спостерігається зниження константи рівняння n, що вказує на збільшення структурованості К.

Для полімерної композиції тиксотропні властивості є однією з основних характеристик, оскільки в виробничих умовах відбувається багатократна зміна деформаційних навантажень, що призводить до зміни в'язкості в системі. Величину ступеня тиксотропного відновлення в'язкості розраховували за формулою (1):

$$S = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\frac{\eta_{1i}}{\eta_{0i}}\cdot 100\,\%, \qquad (1)$$

де S – ступінь тиксотропного відновлення в'язкості розчинів; 1_i – в'язкість при і-тій швидкості зсуву, виміряна у режимі градієнту швидкості зсуву, що зменшується; 0_i – в'язкість при i-тій швидкості зсуву, виміряна у режимі градієнту швидкості зсуву, що збільшується; i – швидкість зсуву; n – число фіксованих значень градієнту швидкості зсуву.

Таблиця 1

Значення констант *К* та *n* для розчинів модифікованого крохмалю молочною кислотою та ПВС

Модифікація крохмалю	0,5 моль/л		1,0 моль/л	
Склад розчинів	*К*, Па · с	*n*	*К*, Па · с	*n*
Час модифікації – 1,5 год				
МК/ПВС (25:75)	7,69	0,37	7,69	0,38
МК/ПВС (50:50)	7,58	0,39	7,85	0,34
МК/ПВС (75:25)	6,72	0,61	7,61	0,37
Час модифікації – 2,0 год				
МК/ПВС (25:75)	7,84	0,36	7,71	0,38
МК/ПВС (50:50)	7,72	0,38	7,81	0,40
МК/ПВС (75:25)	6,74	0,59	6,94	0,41
Час модифікації – 2,5 год				
МК/ПВС (25:75)	7,80	0,36	7,67	0,34
МК/ПВС (50:50)	7,66	0,38	6,26	0,56
МК/ПВС (75:25)	6,84	0,58	5,81	0,78

Визначені показники тиксотропності за формулою (1) для розчинів полімерних композицій на основі крохмалю з ПВС наведено в табл. 2.

Встановлено високий ступінь тиксотропного відновлення в'язкості практично у всіх розчинах полімерних композицій.

Висновки. Вимірювання реологічних характеристик розчинів, зокрема в'язкості, є необхідним етапом у розробці медичних плівок. Саме в'язкість визначає, як рідина поводитиметься під час формування плівки, впливаючи на її товщину, однорідність та міцність. Таким чином, дослідження реології дозволяє нам оптимізувати процес виробництва плівок та отримати матеріали з потрібними властивостями.

Дослідження показали, що модифікація крохмалю молочною кислотою при концентраціях 0,5 моль та 1,0 моль і тривалості від 1,5 до

Таблиця 2

Величина ступеня тиксотропного відновлення в'язкості полімерних композицій на основі МК з додаванням ПВС

Склад полімерної композиції (мас.ч.)			Ступінь тиксотропності, %
Крохмаль (10 % розчин)			54,0
ПВС (10 % розчин)			97,0
Концентрація кислоти	**Час модифікації**	**МК/ПВС**	
0,5 моль/л	1,5 год	25:75	87,1
		50:50	94,7
		75:25	91,2
	2,0 год	25:75	87,3
		50:50	96,3
		75:25	92,7
	2,5 год	25:75	95,4
		50:50	97,4
		75:25	90,1
1,0 моль/л	1,5 год	25:75	99,9
		50:50	94,1
		75:25	91,0
	2,0 год	25:75	92,5
		50:50	98,8
		75:25	96,5
	2,5 год	25:75	95,2
		50:50	83,3
		75:25	69,2

2,5 годин впливає на реологічні властивості розчинів. Так, значення реологічної константи K для модифікованого крохмалю при концентрації кислоти 0,5 моль змінюються в межах 6,84–7,69 Па·с залежно від складу розчину та тривалості модифікації, тоді як для 1 моль значення K варіюють у діапазоні 7,65–8,01 Па·с.

Було виявлено, що зі збільшенням вмісту полівінілового спирту у композиції (МК/ПВС 25:75, 50:50 та 75:25) відзначається зниження показника n, що вказує на підвищену структурованість системи. Наприклад, при модифікації молочною кислотою (1 моль) протягом 2,5 годин показник n для розчину з відношенням 25:75 становив 0,55, що свідчить про більш виражені неньютонівські властивості системи.

Дослідження тиксотропного відновлення в'язкості показало, що ступінь тиксотропності для вихідного 10 % розчину крохмалю становить 54,0 %, тоді як для розчину ПВС – 97,0 %. У полімерних композиціях на основі модифікованого крохмалю та ПВС цей показник коливається в межах 87,1–96,8 %, що вказує на високий рівень структурованості системи.

Отримані результати демонструють перспективність використання модифікованого крохмалю у поєднанні з полівініловим спиртом для створення біосумісних полімерних плівок. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на детальніший аналіз структурних змін у розчинах при різних швидкостях зсуву, а також на встановлення зв'язку між реологічними характеристиками та формуванням плівок. Окрім того, важливим напрямом є вивчення стабільності отриманих систем та їх потенційного використання у медичних і біотехнологічних застосуваннях.

Список літератури:

1. Lemos PVF, Marcelino HR, Cardoso LG, Souza CO, Druzian JI. Starch chemical modifications applied to drug delivery systems: From fundamentals to FDA-approved raw materials. *Int J Biol Macromol*. 2021;184:218-234. doi:10.1016/j.ijbiomac.2021.06.077

2. Liu Y, Xu B, An F, Liu J. Physicochemical Properties of Cassava Starch-Konjac Glucomannan Composites. Starch – Starke. 2021;73(7–8). doi:10.1002/star.202000186.

3. Ishchenko O, Kuchynska D, Plavan V, Ostrauskaitė J. Wound Dressing Films Based on the Citric Acid Modified Starch. In: The 10th International Conference on Advanced Materials and Systems (ICAMS 2024); December 2024. doi:10.2478/9788367405805-014.

4. Plavan V, Ishchenko O, Resnytskyi I, Kuchynska D, et al. Modified Polysaccharides Application for Antiseptic Leather Processing. Technical Sciences and Technologies. 2019;4(18):209-214. doi:10.25140/2411-5363-2019-4(18)-209-214

5. Ahmed J, Dhull SB, Chandak A. Rheology and Rheological Measurements of Starch. In: Advances in Food Rheology and Its Applications; January 2023. doi:10.1016/B978-0-12-823983-4.00016-9

6. Shrestha B, Chapain K, Shah S, Pandit R. Starch/Polyvinyl Alcohol (PVA) Blend Bioplastics: Synthesis and Physicochemical Properties. 1 Journal of Nepal Chemical Society. 2023;43(2):103-109. doi:10.3126/jncs.v43i2.53349

7. Krishnamurthy A, Amritkumar P. Synthesis and Characterization of Eco-friendly Bioplastic from Low-cost Plant Resources. SN Applied Sciences. 2019;1(11). doi:10.1007/s42452-019-1460-x

8. Abdullah ZW, Dong Y. Biodegradable and Water Resistant Poly(vinyl) Alcohol (PVA)/Starch (ST)/Glycerol (GL)/Halloysite Nanotube (HNT) Nanocomposite Films for Sustainable Food Packaging. Frontiers in Materials. 2019;6:58. doi: 10.3389/fmats.2019.00058.

9. Ren J, Dang KM, Pollet E, Avérous L. Preparation and Characterization of Thermoplastic Potato Starch/Halloysite Nano-Biocomposites: Effect of Plasticizer Nature and Nanoclay Content. Polymers. 2018;10(8):808. doi: 10.3390/polym10080808.

10. Aslam M, Kalyar MMA, Raza ZA. Polyvinyl Alcohol: A Review of Research Status and Use of Polyvinyl Alcohol Based Nanocomposites. Polymer Engineering and Science. 2018;58(6). doi: 10.1002/pen.24855.

Kuchynska D.A., Ishchenko O.V. STUDY OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOLUTIONS BASED ON LACTIC ACID-MODIFIED STARCH

This article presents research on the rheological curves of polymer compositions based on modified starch and polyvinyl alcohol, for potential use in the creation of biocompatible films. The degree of thixotropic recovery was investigated, and the relationships between shear stress and shear rate of the polymer compositions were established. The influence of starch modification with lactic acid at concentrations of 0.5 mol/L and 1.0 mol/L on the rheological properties was studied. It was found that the starch modification process contributes to changes in the structural organization of polymer chains, which is manifested in changes in the rheological parameters of the system.

The values of the rheological constant K varied within the range of 6.84–8.01 Pa · s, depending on the composition and duration of modification (1.5, 2.0, 2.5 hours). The study showed that with an increase in the content of polyvinyl alcohol in the compositions (modified starch/polyvinyl alcohol ratios of 25:75, 50:50, 75:25), a decrease in the flow index n to 0.55 is observed, indicating an increased structuring of the system and its non-Newtonian behavior. This suggests the possibility of regulating the mechanical characteristics of the material by varying the component ratio.

The thixotropy of the solutions was determined, with indicators in the range of 87.1–96.8 %, which showed a high degree of recovery of the polymer composition structure. High thixotropy is an important parameter for ensuring the stability of materials under mechanical stress, which is a key factor in the development of biomedical materials, particularly films for medical applications. Furthermore, the results obtained demonstrate the possibility of predictable changes by controlling the rheological parameters of the initial solutions.

The obtained results can be used to develop medical films with desired properties, which opens up prospects for their application in the field of regenerative medicine, surgery, and the creation of biocompatible coatings for wound dressings.

Key words: *starch, polyvinyl alcohol, wound dressings, rheology, thixotropy.*

УДК 661.5:631.81+544.558
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/38

Петров С. В.
Інститут газу Національної академії наук України

Бондаренко С. Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Рошанпур Ш.
Плазма Дайнамікс ТОВ

Абрамова А. О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВДОСКОНАЛЕНА ПЛАЗМОВО ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ПЛАЗМОВО-АКТИВОВАНОЇ ВОДИ – РІДКИХ АЗОТНИХ ДОБРИВ

Азотні добрива відіграють життєво важливу роль у підвищенні продуктивності сільського господарства, що життєво необхідно для зростаючого населення планети. В даний час промислове виробництво аміаку і азотних добрив засноване на технології Габера-Боша, яка використовувалася та вдосконалювалася понад століття. Незважаючи на це, процес Габера-Боша є дороговартісним і вимагає інфраструктури великого заводу, проводиться при високих температурах і тиску, а також несприятливо впливає на навколишнє середовище через залежність від викопного палива. Таким чином, існує нагальна необхідність у розробці екологічно безпечної альтернативної технології виробництва азотних добрив. Плазмова газорідинна фіксація азоту при атмосферному тиску є дуже перспективною альтернативою традиційній азотфіксації бо азотне добриво виробляється шляхом вилучення азоту з атмосфери і не потребує невідновлюваної сировини та є легкодоступним для поглинання рослинами. У статті розглянуті питання використання плазмової технології для отримання плазмово-активованої води – рідких азотних добрив. Метою дослідження є розробка екологічної технології отримання плазмово-активованої води для її використання в сільському господарстві в якості рідких азотних добрив і з'ясуванні можливостей їх ефективного виробництва за допомогою гібридного електричного розряду в бульбашковій воді. У роботі запропонована нова плазмова система на основі гібридного електричного розряду (поєднує рівноважну та нерівноважну плазму), що працює в суміші повітря з водою, для прямого виробництва активованої води. Процес плазмохімічної обробки реалізується у плазмово-хімічному реакторі з пульсаційним режимом горіння електричного розряду у водному розчині. Електричний розряд в плазмовому реакторі горить по поверхні повітряних бульбашок в воді. Така система екологічна, оскільки не використовує додаткових хімікатів (як сировина використовується повітря, вода та електрика) і не виробляє відходів. Визначено, що оптимальна форма розряду забезпечується при напрузі пробою 3000 В та амплітуді струму 12 А, де на кожному імпульсі відбувається пробій розрядного проміжку з наступним переходом до дугової форми. З використанням розробленої плазмової системи, отримана плазмово-активована вода з високим вмістом стабільних активних форм кисню та азоту (NO_3^-, NO_2^-, H_2O_2, O_3 *тощо). Така плазмово-активована вода має високий потенціал для ефективного використання в сільському господарстві, оскільки довгоживучі активні сполуки, що знаходяться в ній, можуть брати участь у метаболізмі рослин і служити поживними речовинами для них. Продуктивність плазмової установки дозволяє її використання для забезпечення потреб у плазмово-активованій воді невеликих та середніх господарств. Енергоспоживання на виробництво плазмово-активованої води може бути компенсоване інтеграцією з відновлюваними джерелами енергії.*

Ключові слова: *плазмово-активована вода, азотні добрива, гібридна плазма, плазмохімічний реактор, зростання рослин, активні форми азоту, активні форми кисню.*

Постановка проблеми. Виробництво сполук азоту, для потреб різних галузей народного господарства, є одним з найважливіших напрямків роботи хімічної промисловості. Основною сферою застосування сполук азоту є сільське господарство, де вони використовуються для виробництва азотних добрив. Азотні добрива життєво необхідні для забезпечення розвитку сільськогосподарських культур і відповідно харчування населення, кількість якого на планеті безперервно зростає. Чисельність населення у 2050 році може досягти 9 мільярдів і тому сільськогосподарським виробникам потрібно буде суттєво збільшити обсяги виробництва продовольчої продукції. Вирощування будь-яких культур потребує збалансованого живлення, бо без поповнення поживних елементів, неможливо отримати високі та стабільні врожаї. Азотні же добрива суттєво поліпшують умови вирощування зернових та інших сільськогосподарських культур, сприяють росту листової та інших наземних частин рослин. Для підвищення врожайності виробники сільськогосподарських культур купують штучно зв'язаний азот у вигляді мінеральних добрив. Технічна фіксація азоту в промислових масштабах базується на синтезі аміаку в процесі Габера-Боша (Haber-Bosch). Процес передбачає виробництво аміаку шляхом реакції азоту та водню у присутності залізного каталізатора при високих тиску та температурі. Для найкращого виходу кінцевого продукту слід ретельно керувати умовами реакції та використовувати спеціальне обладнання, що працює в складних умовах і відповідно потребує великих капіталовкладень.

У теперішній час у світі виробляється близько 200 мільйонів тонн аміаку на рік. Загальний розмір світового ринку оцінюється в понад 100 мільярдів доларів. Сценарій сталого розвитку Міжнародного енергетичного агентства (Sustainable Development Scenario, SDS) передбачає, що до 2050 року попит на аміак зросте удвічі, а можливо і більше [1]. При цьому більше за 80 % виробленого промисловістю аміаку використовується у сільському господарстві для виробництва добрив і відповідно у глобальному ланцюжку виробництва продуктів харчування.

Більше за 90 % аміаку виробляється за технологією Габера-Боша з невідновлюваних ресурсів. Як зазначено в роботі [2], близько 96 % водню (H_2), необхідного для виробництва аміаку за допомогою процесу Габера-Боша, одержують з викопного палива. Тому ціна аміаку за цією технологією істотно залежить від видобутку вугілля та природного газу. Найбільше аміаку виробляють з газу (70–75 %) і вугілля (майже 25 %) [1]. Приблизно 3–5 % природного газу, що видобувається у світі, використовується для виробництва аміаку за допомогою процесу Габера-Боша [3].

Недоліком технології Габера-Боша є високий рівень викидів парникових газів і велика кількість енергії, що споживається, – більше за 30 ГДж на тонну NH_3 [4] та потреба у великій кількості викопного палива. Прямі викиди вуглецю при виробництві однієї тонни аміаку складають: 1,8 тонн для технології Steam Methane Reforming (паровий риформінг метану) та 1,6 тонн для технології Autothermal reforming (автотермічний риформінг метану) [1]. Також великомасштабний процес Габера-Боша потребує великих капітальних витрат і не підходить для дрібномасштабного та децентралізованого виробництва.

З огляду стійких технологій виробництва аміаку та азотних добрив йде неперервний пошук нових технологій і у теперішній час критично розглядаються технології, що включають електрохімічні та плазмохімічні процеси, які без використання викопних ресурсів зможуть забезпечити виробництво азотних добрив в промисловому масштабі.

На сьогоднішній день, незважаючи на величезні зусилля щодо дослідження електрохімічних підходів, залишається актуальною проблема їх низької ефективності та високих витрат на виробництво, які притаманні процесу Габера-Боша [5].

Плазмовий синтез NO_x за допомогою процесу Біркеланда-Ейде (Birkeland–Eyde) був одним з перших і конкуруючих промислових процесів на початку виробництва азотних добрив. Плазмові синтези Біркеланда-Ейде і Паулінга у газовій фазі використовували в своїй реалізації термічну дугову плазму для синтезу NO_x і характеризувались низьким коефіцієнтом конверсії та низькою енергоефективністю. Однак у теперішній час взаємодія нерівноважної плазми та рідини стає привабливою технологією для конверсії N_2 в NO_x. Плазмова газорідинна фіксація азоту при атмосферному тиску є дуже перспективною альтернативою традиційній азотфіксації бо азотне добриво виробляється шляхом вилучення азоту з атмосфери і не потребує невідновлюваної сировини та є легкодоступним для поглинання рослинами.

Останнім часом фіксація азоту за допомогою технологій нерівноважної плазми, які сумісні з відновлюваною електроенергією набула значного інтересу також і через появу недорогої відновлюваної електроенергії [6].

У світлі необхідності заміни промислових процесів азотфіксації на вуглеводневому паливі альтернативними, більш стійкими методами, нова плазмова технологія азотфіксації залишається одним з найбільш перспективних варіантів, враховуючи як теоретичні, так і експериментальні аспекти. Децентралізація виробництва азотних добрив з можливістю їх отримання та застосування на місці і при використанні в якості сировини N_2, H_2O та електроенергії усуває не тільки великі викиди CO_2 але й витрати, що пов'язані з транспортуванням, як сировини так і готової продукції.

Тому напрямки з розроблення, впровадження та вдосконалення плазмових технологій отримання азотних добрив без використання викопних ресурсів є **актуальними**.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Взаємодія плазми з водою призводить до отримання нового продукту з помітною та різноманітною активністю, який називається плазмово-активована вода (ПАВ) [7].

Плазмовий процес отримання ПАВ імітує в своїй реалізації спалахи блискавок, які відбуваються на планеті близько ста разів кожну секунду. У спалаху блискавки повітря перетворюється з газової фази в плазмову фазу, тим самим розщеплюючи молекули N_2 і O_2 на активні радикали (рис. 1). Ці радикали потім створюють оксиди азоту, що контактують з водою, в якій вони остаточно розчиняються у вигляді різних сполук. Будучи продуктом взаємодії атмосферної плазми і води, ПАВ включає в себе різні реактивні форми кисню і азоту, фундаментально змінюючи хімічний склад води. У такій формі так звана «плазмова вода» може використовуватися як добриво, щоби вносити безпосередньо доступний нітрат у ґрунт [8, 9].

Хімічні реакції, що відбуваються при взаємодії атмосферної плазми і води показані в роботі [10]: при контакті з водою утворюються гідроксил радикали OH^*, які швидко рекомбінуються в перекис водню H_2O_2:

$$OH^* + OH^* \rightarrow H_2O_2$$

газоподібний NO_2 розчиняється у воді, утворюючи нітрити NO_2^- і нітрати NO_3^-:

$$NO_2 + NO_2 + H_2O \rightarrow NO_2^- + NO_3^- + 2H^+$$

$$NO + NO + H_2O \rightarrow 2NO_2^- + 2H^+$$

кислому середовищі, NO_2^- може бути окислений до NO_3^-

$$3NO_2^- + 4H^+ + H_2O \rightarrow 2NO + NO_3^- + 3H_2O^+$$

або він реагує з H_2O_2 з утворенням проміжної сполуки – пероксиазотистої кислоти (peroxynitrous acid):

$$3NO_2^- + 4H^+ + H^+ \rightarrow O = NOOH + H_2O$$

яка є нестабільним продуктом і з часом розкладається або на NO_3^- або на радикали NO_2^* та OH^*:

$$O = NOOH \rightarrow NO_2^* + OH^*$$

Рис. 1. Природне отримання плазмово-активованої води

$$O{=}NOOH \rightarrow NO_3^- + H^+$$

Отримані реактивні частинки розчиняються у воді та виробляють плазмово активовану воду – ПАВ. У такому вигляді суміш довгоживучих активних форм кисню та азоту (H_2O_2, NO_2^-, NO_3^- та інших) вважається чистою та стійкою альтернативою хімічним добривам [10].

Використання ПАВ в якості рідких добрив, що легко засвоюються сільськогосподарськими культурами і є запобіжниками хвороб, приваблює виробників сільськогосподарської продукції. Підвищення засвоюваності азоту рослинами є важливим рішенням для скорочення надмірного використання хімічних добрив.

У світі невпинно зростає кількість публікацій, що присвячені методам і технологіям отримання ПАВ, механізмам активації води під впливом плазми, характеристикам отриманої води внаслідок її плазмової обробки та сферам застосування плазмово-активованої води. Основні сфери застосування ПАВ наведені на рис. 2.

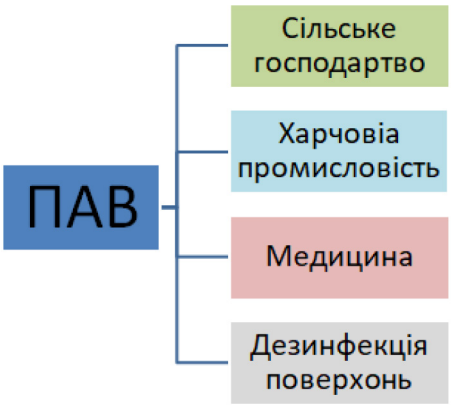


Рис. 2. Основні сфери застосування ПАВ

У контексті сільського господарства застосування ПАВ безпосередньо цікавить виробників продукції для обробки і пророщування насіння, стимулювання вирощування розсади, стимуляції росту сільськогосподарських культур з підвищенням загальної врожайності, боротьби з патогенами, знезаражування ґрунтів тощо. Це призводить до збільшення числа дослідницьких груп у всьому світі, які розробляють інновації, пов'язані із застосуванням ПАВ у сільському господарстві.

В роботі [11] автори проводили обробку двох доз насіння коралової сочевиці (доза складала 100 насінин) необробленою водопровідною водою та активованою плазмою водопровідною водою. Кожну дозу помістили в пророщувач з дренажними отворами. Протокол обробки складався з двох фаз: замочування (першу дозу замочували у водопровідній воді, а другу – у активованій плазмою водопровідній воді) та зрошення двічі на день однаково кількістю відповідної води. Експерименти проводили за кімнатної температури (22,5 ± 0,5 °C) при відносній вологості в діапазоні від 35 до 45 %. Авторами було продемонстровано, що активована плазмою водопровідна вода показала значний та позитивний вплив на зростання коралової сочевиці зі збільшенням довжини рослини.

Аналогічні результати при дослідженні впливу ПАВ на розсаду томатів отримані вченими Каліфорнійського університету у Девісі [12]. На рис. 3 можна побачити різницю між рослинами томатів, що оброблені ПАВ та звичайною водопровідною водою.

Рис. 3. Рослини томатів у контейнерах, у яких програма фертигації була доповнена водопровідною водою або ПАВ [12]

Результати дослідження [13] показують, що ПАВ діє як індуктор як для зростання саджанців томатів (Solanum lycopersicum), так і компонентів, що пов'язані з їх захистом. Автори роботи спостерігали зміни на фізіологічному, біохімічному та молекулярному рівні у саджанцях томатів, що оброблені ПАВ, порівняно з контрольними саджанцями без такої обробки. Це перше дослідження, яке показує, що обробка ПАВ індукує вироблення захисного гормону, а також інших транскриптів у розсаді та діє як імунний індуктор.

В роботі [14] повідомлено про ефект стимулювання росту розсади у редису (Raphanus sativus), томату (Solanum lycopersicum) та солодкого перцю (Capsicum annum) при обробці ПАВ. Також відмічається, що іони нітриту та нітрату в складі ПАВ діють як азотні добрива та сприяють посиленню росту розсади.

Дослідження, що проведені в роботі [15] показують, що зрошення томатів ПАВ може посилити

непрямі механізми стійкості рослини до павутинних кліщів. Це дозволяє значно уникнути заселення і знизити відкладення яєць двоплямистими павутинними кліщами на листових дисках рослин, зрошених ПАВ. Автори роботи вважають, що додаткове зрошення, високою мірою сумісно з іншими тактиками боротьбі зі шкідниками, і має розглядатися як інноваційний та стійкий компонент у такій боротьбі.

Отримані результати [12] свідчать про те, що ПАВ може ефективно стимулювати зростання проростків пшениці та позитивно впливати на їхній метаболізм особливо у ґрунті з низьким вмістом поживних речовин. Насіння, що вирощене із застосуванням ПАВ на ранніх стадіях росту під час імбібіції та проростання взаємодіє в основному з H_2O_2, в той час як NO_2^- і NO_3^- метаболізуються вже після того, як насіння починає проростати. В роботі [16] було визначено вплив ПАВ на властивості зерен пшениці (Triticum aestivum L.). Вплив ПАВ збільшив схожість, довжину пагонів, а також свіжу та суху вагу пагонів. Довжина кореня і співвідношення між підземною та надземною довжинами проростків пшениці, трохи зменшилися, тоді як інші параметри змінилися лише нерегулярно або взагалі не змінилися. Зерна, штучно інокульовані Escherichia coli, були практично дезактивовані лише через одну годину впливу ПАВ, в той час як дезактивація Saccharomyces cerevisiae вимагала замочування протягом 24 годин.

Компанія VitalFluid B.V. від Eindhoven University позиціонується як світовий лідер у галузі застосування плазмово-активованої води [17]. Компанія створила органічний живильний розчин відповідно до норм USDA (U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE) при використанні плазмово-активованої води та протестувала його в пілотній системі виробництва. В результаті проведеного тепличного експерименту (площа вирощування культури томатів складала 120 м^2), де половина ділянки була відведена під застосування азотних добрив у вигляді ПАВ (VF), було визначено, що врожай томатів, вирощений на VF, явно мав достатньо нітратів для зростання, тоді як еталонна культура (BIO) мала дефіцит азоту, що призвело до зниження продуктивності (рис. 4) [18].

Компанія VitalFluid також провела тестування таких культур, як цибуля, морква, салат і капуста, на вплив таких видів патогенів, як Alternaria, Aspergillus, Botrytis, Cladosporium, Fusarium та Xanthomonas [16]. Тести з використанням ПАВ для видалення цих хвороб, що передаються через насіння, показали значне зниження грибкових та бактеріальних забруднень. В окремих випадках було досягнуто 100 % видалення патогенів після процесу санітарії з ПАВ без значного негативного впливу на схожість. У деяких випадках після дезінфекції насіння квітів з високим рівнем зараження загальними грибками схожість рослин покращувалась до 130 % порівняно з необробленим контрольним насінням [16].

Технології отримання ПАВ побудовані на застосуванні в своєму складі плазмово-хімічних реакторів, в яких копіюються природні процеси взаємодії плазми з повітрям і водою. В даний час нерівноважна плазма атмосферного тиску (НПАТ) для сільськогосподарських цілей оцінюється як можлива заміна традиційній азотфіксації, оскільки вона фіксує атмосферний азот у вигляді оксиду азоту (NO), нітритів (NO_2), нітратів (NO_3), триоксиду азоту (N_2O_3), пентаоксиду азоту (N_2O_5), та аміаку (NH_3) [19, 20]. Плазму, що використовується в таких додатках, називають нетепловою

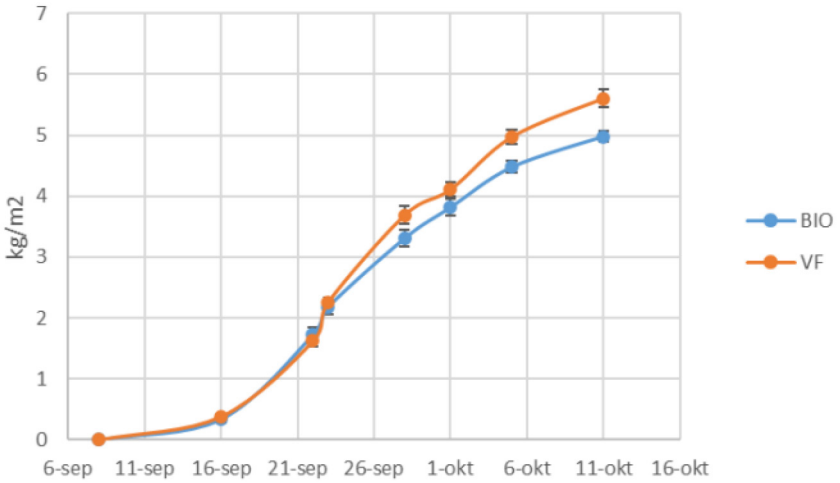


Рис. 4. Кумулятивний вихід томатів (кг/м^2) для VitalFluid (VF) та еталонного живлення (BIO) [18]

(НТП) або холодною атмосферною плазмою, оскільки під час обробки немає значного нагрівання об'єкта [21]. Нетеплова плазма зазвичай класифікується як напіврівноважна плазма, в якій існує локальна термодинамічна рівновага між такими видами, як електрони та молекули газу, та нерівноважна плазма, в якій електрони мають вищі температури, а молекули газу мають помірні температури (ледве вище за кімнатну температуру) з нижчими температурами для всієї системи [22–24]. Високоенергетичні електрони стикаються із речовинами, що знаходяться в плазмовому середовищі з утворенням реактивних хімічних видів, таких як радикали, збуджені молекули та іони. Завдяки цьому деякі інертні молекули можуть бути активовані у плазмі (наприклад, азот, кисень), а термічно або кінетично несприятливі реакції можуть бути легко реалізовані в умовах навколишнього середовища. Також, завдяки відносно низькій температурі газу можливе пригнічування небажаних каналів реакцій. Це певною мірою дозволяє контролювати селективність виробництва енергетично ефективним способом. Також холодна плазма вимагає набагато меншої вхідної потужності (0,5–1 МДж/моль енергії для утворення NO), на відміну від теплової плазми, яка потребує більш високої вхідної потужності (при цьому споживається приблизно 2–5 МДж/моль) [25]. І хоча для генерації плазми потрібна електроенергія, її можна отримувати з відновлюваних джерел енергії, що забезпечує багато переваг цього методу. В роботі [26] відмічено, що споживання енергії при фіксації азоту нерівноважною плазмою може бути нижчою, ніж при стандартному синтезі аміаку, що визначається термодинамікою.

Генерацію плазми можна досягти різними методами. Кожен із цих методів має певні переваги та може бути адаптований до конкретних сільськогосподарських потреб [21]. При отриманні ПАВ досліджені плазмові реактори, де в якості джерела атмосферної плазми в сільськогосподарських додатках застосовуватись:

– діелектричний бар'єрний розряд (DBD), котрий передбачає розміщення двох електродів з діелектричним непровідним матеріалом (бар'єром) між ними [11, 21, 27–30];

– плазмовий струмінь, де потік плазми, що генерується з газу під високою напругою, спрямовується безпосередньо у воду або над нею [15, 21, 27, 28, 31–33];

– коронний розряд, де високовольтний електрод створює електричний розряд – корону, яка взаємодіє з навколишнім повітрям, утворюючи плазму [21, 27, 28, 34–36];

– та інші, зокрема: тліючий розряд, дуговий розряд, іскровий розряд, радіочастотний розряд, мікрохвильовий розряд, імпульсний коронний розряд тощо [21, 27, 28, 34, 35, 37, 38].

Серед них DBD і плазмовий струмінь є двома формами генерації холодної плазми, що найчастіше використовуються. В основному це пов'язано з простотою конструкції та можливістю реконфігурації установок для виконання багатьох цілей та вимог щодо обробки води [28]. При цьому плазмовий струмінь, що використовують для генерації PAW, вважаються прямим джерелом плазми, бо забезпечує прямий контакт між плазмою та водою.

Взаємодія холодної плазми та води в плазмово-хімічному реакторі змінює фізико-хімічні властивості води, що пов'язано з утворенням у ній реактивних форм кисню та азоту (reactive oxygen-nitrogen species) – RONS та інших, які мають в своєму складі вільні радикали, іони і збуджені молекули, а також ультрафіолетове випромінювання. Ефективність ПАВ суттєво залежить від двох основних груп реактивних часток, а саме реактивних форм кисню (ROS) та азоту (RON), які утворюються за рахунок складних фізичних та хімічних процесів, що відбуваються при взаємодії плазми з водою (рідинами), і є джерелом короткота довгоживучих хімічних видів. ROS, що утворюються в ПАВ, такі як перекис водню – H_2O_2, гідроксильний радикал – OH^*, озон – O_3, супероксид – O_2^- та інші, є сильними окиснювачами і знаходять застосування в дезінфекції, знезаражуванні насіння, боротьбі з патогенами тощо [15, 27]. Ці види відіграють важливу роль в ініціюванні хімічних реакцій у біологічному матеріалі. Так при застосуванні ПАВ для пророщуванні насіння ROS відіграють важливу роль у регулюванні рівнів фітогормонів, цим запускаючи процес метаболізму клітин [40]. Проте надмірні концентрації ROS в ПАВ можуть викликати високий окисний стрес, який буде інгібувати процес проростання [41 – 43]. RNS, що присутні в ПАВ (нітрит – NO_3^-, нітрат – NO_2^- тощо) слугують джерелом живлення для рослин та регулюють клітинний окислювально-відновний статус, сприяючи розвитку клітин [44]. Серед RONS довгоживучих активних форм є перекис водню, нітрат, нітрит і озон. Концентрація активних видів у ПАВ, дає розчин з більш високими окислювально-відновним потенціалом і електропровідністю та зазвичай нижчим pH ніж необроблена плазмою вода

[45–47]. Зниження pH води пояснюється утворенням різних кислот (таких як азотна кислота), коли реактивні види азоту розчиняються у воді. Це є однією із основних причини антимікробної активності ПАВ. Збільшення електропровідності обумовлено більш високою концентрацією іонів (зокрема нітрату та нітриту), які є продуктами розчинення оксидів азоту у воді. З тих видів ROS, які утворюються в ПАВ, перекис водню головним чином бере участь в окисно-відновних реакціях, де він поводитися як окиснювач (концентрація розчиненого O_3 зазвичай значно нижча у порівняні з H_2O_2 і озон досить легко і швидко розкладається в певних умовах) [46, 47]. Плазмова обробка води також значно підвищує вміст нітратів у воді, що має вирішальне значення для застосування ПАВ для сільськогосподарських цілей. При цьому кількість іонів NO_3^- в ПАВ значно вище, ніж – NO_2^- іонів [47]. Синергетичні ефекти RONS у ПАВ обумовлюють її властивості та мотивують численні застосування [45]. Хімічні реакції, що протікають при утворенням у ПАВ реактивних форм кисню та азоту детально розглянуті в роботі [48].

Кількість реактивних хімічних видів у ПАВ та їх концентрація значно залежать від умов приготування ПАВ, включаючи організацію електричного розряду, типу плазми, складу робочого газу, часу обробки тощо.

Розряд, що активує воду, можна організувати в газовій фазі над поверхнею рідини (рис. 5, *а*) та безпосередньо в рідині (рис. 5 *б*). Також використовується організація розрядів у багатофазних середовищах, до яких можна віднести розряди у бульбашках усередині рідини (рис. 5, *в*) або розряди, в газовій фазі при контакті з рідкими бризками або піною [39, 49].

Активні частинки (зазвичай, ті що характеризуються коротким терміном життя) спочатку генеруються за допомогою плазми в газовій фазі над поверхнею рідини і згодом розчиняються/накопичуються в рідкій фазі. В результаті протікання хімічних реакцій рідка фаза насичується довго живучими і більш стабільними RONS (такі як перекис водню і нітрит/нітрат), що змінює фізико-хімічні властивості води. Плазма (зазвичай плазмовий струмінь), що працює над рідиною може торкатися рідини (пряма взаємодія) або працювати за відсутністю дотику (непряма взаємодія). У стані за відсутністю торкання немає прямого контакту між видимою частиною плазмового факелу та поверхнею рідини, а у стані торкання плазма перебуває у прямому контакті з рідиною [39, 49]. Утворення реактивних видів значно посилюється у цьому стані, оскільки збуджені/іонізовані частинки поєднуються як з молекулами навколишнього газу, так і молекулами води [39, 50]. Великі відстані обробки, залежно від джерела плазми, можуть знизити концентрацію RONS в рідині, бо деякі реактивні види, що утворюються в газовій фазі, не можуть потрапити у рідину через межу розділу газ-рідина протягом свого короткого часу життя. Не зважаючи на те, що багато систем отримання ПАВ використовують розряди на поверхні води цей метод втрачає кілька короткоживучих газоподібних RONS і часто використовується для активації невеликих кількостей води [51].

На відміну від розрядів над поверхнею рідкої фази (води або розчину), розряди, що відбуваються у рідині значно збільшують площу контакту між плазмою та рідиною та сприяють розчиненню газоподібних RONS [51]. При цьому розряди всередині рідини вимагають сильнішого електричного поля (~ 1 МВ/см), ніж розряди в газах, через зіткнення електронів з більш щільним середовищем (частинкам у воді рухатися складніше, ніж

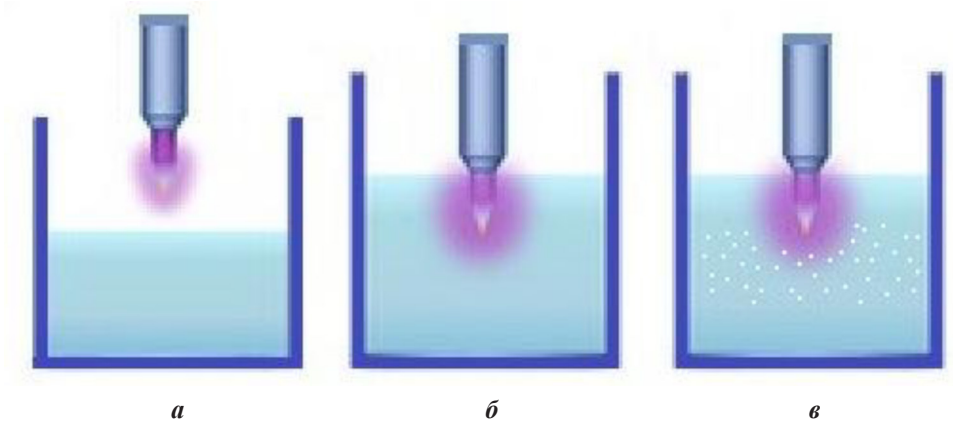


Рис. 5. Організація розряду при отриманні ПАВ: *а* – електричний розряд над поверхнею рідини; *б* – електричний розряд під поверхнею рідини; *в* – розряд у бульбашковому середовищі в рідині

у повітрі) та розходженнями між силами розриву в газовій та рідинній фазах [39]. Це потребує збільшення енерговитрат. Отримані RONS в ПАВ при індукції плазми безпосередньо у рідину відрізняються від тих, що утворюється над рідиною. У той час як гідроксильні радикали та оксиди азоту зазвичай утворюються при взаємодії плазми з повітрям, нітрити, нітрати та H_2O_2 з відносно великим часом життя утворюються при взаємодії плазми з рідиною [52]. В роботах [53, 54] було виявлено, що при тривалому часі генерації плазми всередині рідкого середовища отримують більшу кількість реактивних видів азоту та меншу кількість активних форм кисню.

Для підвищення швидкості хімічних реакцій плазмово-індукованих видів, що взаємодіють з рідиною, і для сприяння масоперенесенню цих видів з газоподібної фази в рідку фазу використовується багатофазна плазма [39, 49, 55]. Здебільшого активація рідини холодною плазмою покращується за допомогою плазмового розряду що контактує з мікробульбашками усередині рідин або з рідкими розпилювачами (дрібні аерозольні краплі розпилюються безпосередньо через активну плазмову зону) чи пінами в газовій фазі [39, 49, 55].

Такі системи застосовуються для поліпшення продуктивності існуючих плазмових систем, що сприяє утворенню великого об'єму плазми у воді, зменшують час «пробою» (сприяють запалюванню), а також підвищують енергоефективність процесу отримання ПАВ. Тому інжекції або барботування газу в рідині активно використовуються. Примусова інжекція бульбашок у воду для отримання плазми досліджена в роботі [56].

Вибір робочого газу (газ, що підтримує плазму – плазмо утворюючий газ) відіграє важливу роль у створенні різноманітності RONS у ПАВ. В якості робочого газу зазвичай використовуються: повітря, гелій (He), аргон (Ar), кисень (O_2), азот (N_2), або суміш цих газів [57]. Використання суміші різних газів, може змінити концентрації реактивних видів в отриманій ПАВ. Авторами роботи [58] проаналізовано вплив використовуваного робочого газу та суміші газів на утворення основних видів RONS у ПАВ (рис. 6).

У попередніх дослідженнях перевагу надавали гелію і аргону, в основному, через легкість їх розпаду, здійснення плазмового розряду при відносно нижчих напругах та їх використання з плазмовими струменями. При виробництві ПАВ у великих масштабах їх застосування буде комерційно недоцільним і непрактичним [59]. В роботі [39] автори відмічають, що при застосуванні в якості робочого газу суміші O_2 + N_2 можна отримати ПАВ з високим вмістом RON при низькому відсотковому вмісті O_2 або з високим вмістом ROS при високому відсотковому вмісті O_2. Останнім часом в літературних джерелах прослідковується чітка тенденція до використання повітря в якості робочого газу. Документально підтверджено, що при використанні повітря як робочого газу при отри-

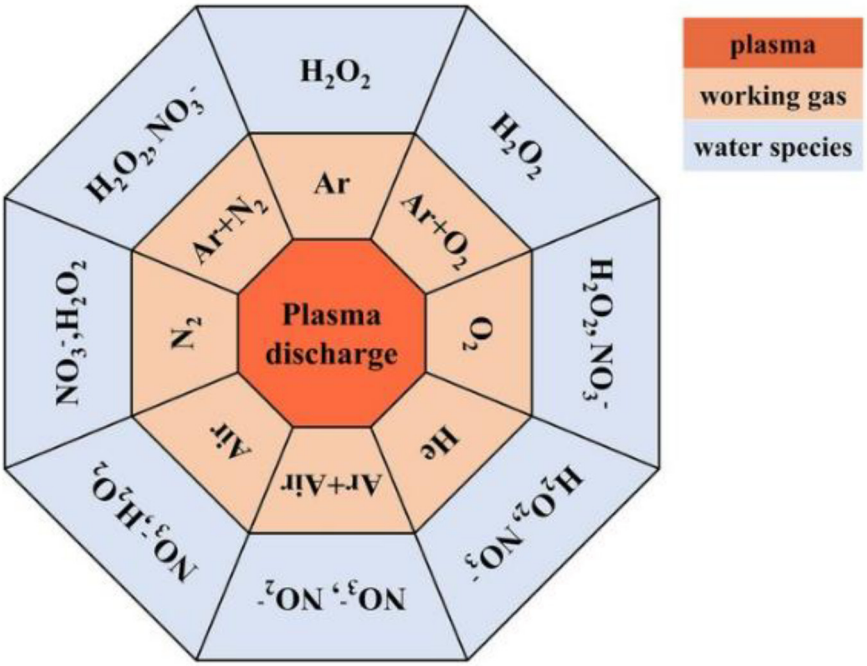


Рис. 6. Вплив робочого газу на утворення основних видів RONS у ПАВ [58]

манні ПАВ утворюється більша різноманітність RONS, ніж при використанні інших газів, таких як аргон (Ar), кисень (O_2) та азот (N_2) [60]. Повітря вважається найбільш поширеним технологічним газом з низькою вартістю і діє як відмінне джерело кисню (O_2) та азоту (N_2).

Окрім складу робочого газу на результати плазмово-хімічного синтезу суттєво впливає час обробки в реакторі. Концентрація основних важливих довгоживучих видів RONS значно зростає зі збільшенням часу обробки (рис. 7) [39].

Автори роботи [39] повідомляють, що кожна точка є середнім з дев'яти отриманих значень. Збільшення концентрації RONS має нелінійний характер. При цьому простежуються два етапи: за початковим швидким збільшенням концентрацій слідує більш повільне збільшення (після 30-хвилинної обробки).

Аналогічні результати отримані авторами роботи [61]. В роботі досліджували не тільки залежності концентрацій RONS від часу, а і вплив складу робочого газу на отриманні RONS в ПАВ (рис. 8) [61].

В дослідженнях водопровідна вода об'ємом V = 100 мл була оброблена за допомогою DBD розряду. Концентрації довгоживучих ROS/RNS в ПАВ контролювався в залежності від часу обробки. Як видно з рис. 9 концентрації всіх видів RONS в обробленій воді збільшуються з часом обробки плазмою. При використанні в якості робочого газу повітря та N_2 в ПАВ присутні NO_2^-, NO_3^- та H_2O_2. При цьому при використанні повітря (рис. 9, *а*) концентрації RONS більші ніж при використанні N_2 (рис. 9, *б*). Автори пов'язують цей факт з O_2, що міститься в повітрі, і який є альтернативним джерелом ROS шляхом іонізації O_2. Утворення надлишку ROS, який реагує зі сполуками азоту, призводить до утворення більшої кількості нітратів та нітритів. При використанні в якості робочого газу O_2 в ПАВ присутня тільки H_2O_2 (ROS) і відсутні RNS, що узгоджується з відсутністю джерела азоту.

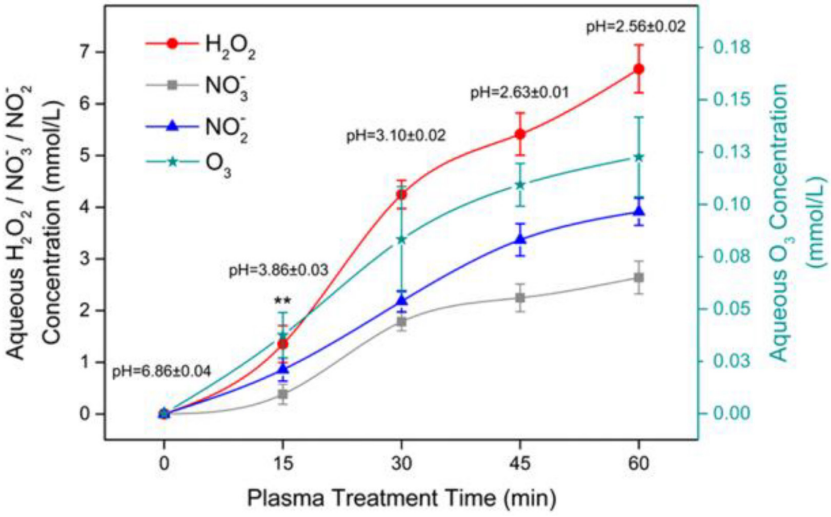
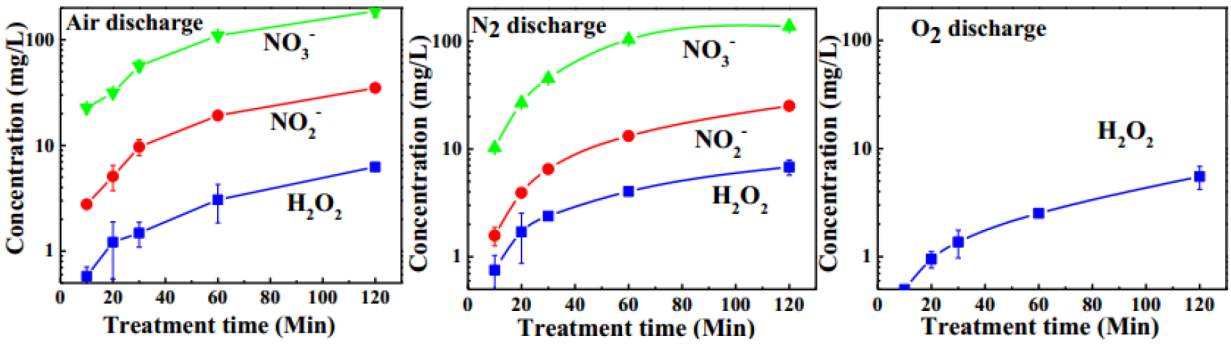


Рис. 7. Концентрації чотирьох видів репрезентативних довгоживучих водних реактивних видів RONS: H_2O_2, NO_3^-, NO_2^- і O_3 в активованій плазмою воді, що оброблена повітряною плазмою в залежності від часу обробки [39]



а *б* *в*

Рис. 8. Концентрація NO_2^-, NO_3^- та H_2O_2 в залежності від часу обробки (хв.) в обробленій ПАВ при використанні в якості робочого газу: *а* – повітря, *б* – N_2 та в – O_2 [61]

Проведений аналіз показує, що ПАВ отримана з використанням води, повітря та електрики за відповідних умов і вимог може містити ROS та RNS в кількості необхідній для різних застосувань. Так більш високі концентрації нітритів та нітратів у ПАВ можуть бути кращими для прискорення росту рослин або проростання насіння в сільському господарстві. А ПАВ з високим рівнем ROS (H_2O_2, O_3 тощо) буде корисним для цілей знезараження в багатьох застосуваннях. Як екологічно чиста альтернатива традиційним сільськогосподарським та санітарним методам ПАВ, що вироблена без використання будь-яких токсинів або хімікатів з води та повітря, має ряд переваг у сільському господарстві завдяки своїм відмінним фізичним та хімічним властивостям. Реактивні види кисню та азоту у воді не призводять до токсичності та не забруднюють навколишнє середовище. ПАВ може змінити парадигму застосування азотних добрив у сільському господарстві і бути для них якісною альтернативою. Однак досі дослідження та огляди, пов'язані з отриманням і застосуванням ПАВ для різноманітних потреб (рис. 1) в основному проводилися в лабораторних масштабах і в даний час підготовлено перехід від суто академічних досліджень до дослідно-промислових установок. Важливим на сьогоднішній час є переведення результатів лабораторних або досліджень на пілотних установках у промислові великомасштабні програми та технології.

Постановка завдання. Метою статті є розробка ефективної екологічно чистої технології отримання плазмо-активованої води для її використання в сільському господарстві в якості рідких азотних добрив. Це дасть можливість отримати азотні добрива без використання будь-яких хімікатів, викопних ресурсів і забруднення навколишнього середовища. Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання: розробити та реалізувати плазмово-хімічний реактор для фіксації атмосферного азоту при гібридному електричному розряді у водно-бульбашковому середовищі для технології отримання плазмо-активованої води; визначити параметри роботи системи, що забезпечують ефективність отримання сполук азоту у проточному плазмовому реакторі з гібридним режимом роботи електричного розряду. Об'єктом дослідження є процес отримання плазмо-активованої води.

Виклад основного матеріалу. Можливості використання ПАВ в сільському господарстві від насіння до поля наведені на рис. 9.

Вода, що оброблена плазмою, позитивно впливає на проростання насіння та зростання розсади, а рослини, що зрошуються ПАВ, дають підвищену врожайність. При цьому ПАВ може виступати як імунний індуктор і сприяти зростанню, розвитку та захисту рослин.

Загальний процес плазмової фіксації азоту включає реакцію азоту з киснем, що призводить до утворення оксидів азоту (азотної кислоти). Для створення плазмового оксиду азоту самою поширеною та доступною сировиною є повітря. Розробка авторів базується на розширеному механізмі Зельдовича (хімічний механізм, що описує окислення азоту та утворення NO_x). Головною рушійною силою у цьому механізмі є електронно та коливально збуджені молекули азоту. Згідно механізму:

$$N_2 + O^* \xleftrightarrow{k_1} NO + N^* \quad (1)$$

$$N^* + O_2 \xleftrightarrow{k_2} NO + O^* \quad (2)$$

$$N^* + OH^* \xleftrightarrow{k_3} NO + H^* \quad (3)$$

де k_1, k_2, k_3 – константи швидкостей реакцій.

Рис. 9. Використання ПАВ в сільському господарстві

Третя реакція доповнює перші дві за присутності води. При дисоціації води утворюються гідроксильні радикали (OH^*), які є високореакційним видом з сильною окислювальною здатністю у водних та газорідинних середовищах. Радикали OH^* є короткоживучими, але вони відіграють важливу роль проміжної ланки в утворенні інших короткоживучих та довгоживучих вторинних видів. При цьому реакція (3) має константу швидкості реакції приблизно один порядок вище, ніж реакція (2) [62].

Далі, отриманий NO може бути окислений радикалами кисню або озоном до утворення NO_2 при проходженні наступних реакцій [62, 63]:

$$O^* + NO \rightarrow NO_2 \quad (4)$$

$$2NO + O_2 \rightarrow NO_2 \quad (5)$$

$$NO + O_3 \rightarrow O_2 + NO_2 \quad (6)$$

Реакція (6) вимагає присутності озону, який не є стабільним і може утворюватись в результаті реакції: $O^* + O_2 \rightarrow O_3$

Шляхи утворення інших активних речовин визначені в роботі [48]. Так нітрат NO_3 може бути отриманий про проходженні реакцій:

$$NO_2 + OH^* \rightarrow NO_3 + H^*$$

$$NO_2^- + O_3 \rightarrow NO_3^- + O_2,$$

$$2NO_2 + H_2O \rightarrow NO_2^- + NO_3^- + H^*$$

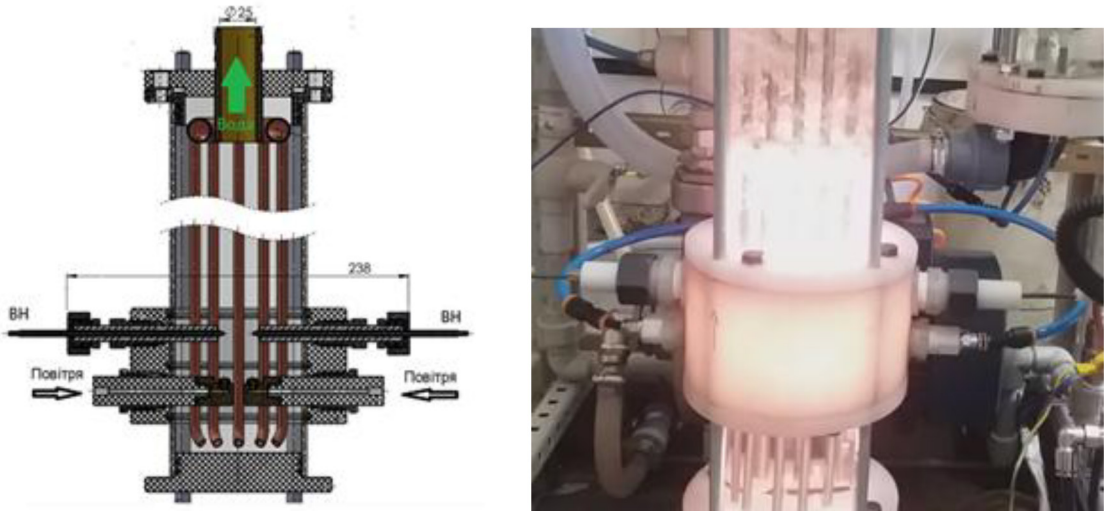
Отримання H_2O_2 відбувається за реакцією:

$$OH^* + OH^* \rightarrow H_2O_2$$

Для реалізації поставлених задач авторами виконано комплекс досліджень по отриманню ПАВ для потреб сільського господарства. Для цього спроектована і розроблена нова електродугова плазмова система, що працює при використанні гібридної плазми (поєднує рівноважну – теплову і нерівноважну – холодну плазму) в суміші повітря з водою. Застосування поєднання рівноважної плазми (всі її складові: хімічні види, електрони та іони існують у термодинамічній рівновазі, а плазма характеризується високою щільністю енергії та забезпечує ефективну продуктивність) та нерівноважної плазми (у нерівноважному стані електрони існують при високих енергіях і температурах, що підсилює хімічні процеси, які впливають на хімічний зв'язок молекул у плазмі, у той час як масивніші іони і нейтральні частинки залишаються близькими до температури навколишнього середовища) дозволяє об'єднати їх переваги. Ковзна дуга є одним з типів гібридної плазми. Технічно ковзна дуга є єдиною плазмою з тим фактом, що вона має властивості як термічної (рівноважної), так і нетермічної (нерівноважної) плазми [64]. Автори роботи [65] визначили, що ковзна дугова плазма може ефективно генерувати NO_x з суміші N_2 та O_2 або повітря з низьким споживанням енергії та високою продуктивністю.

Розроблена реакторна плазмова система включає до свого складу плазмово-струменевий реактор з пульсаційним режимом горіння електричного розряду у водному розчині, який забезпечено рекуперативною системою охолодження-підігріву, джерелом живлення, системами подачі води та повітря та контрольно-вимірювальною апаратурою (рис. 10).

Електричний розряд в плазмово-хімічному реакторі горить по поверхні повітряних бульба-



а *б*

Рис. 10. Плазмовий реактор: *а* – загальний вигляд; *б* – в роботі

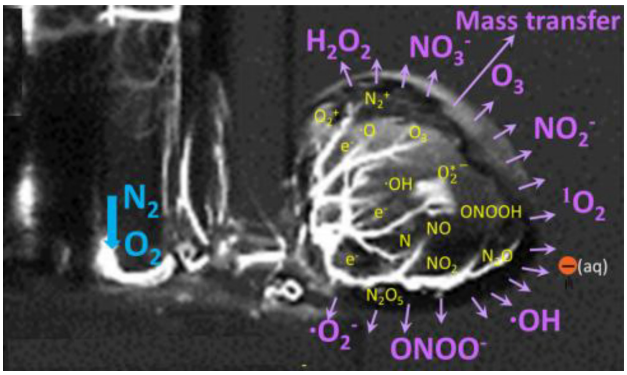


Рис. 11. Утворення реакційноздатних частинок у плазмовій бульбашці з подальшим масоперенесенням їх в середину рідини [39]

шок в воді. Технологічний варіант багатофазної плазми з безперервною рідкою фазою з переривчастою газовою фазою (бульбашки) приводить до отримання сильно невпорядкованої суміші двох фаз, коли турбулентний газ сильно перемішується з рідиною. При цьому електричні поля всередині бульбашок досить сильні. Стримери спалахують всередині газових пухирців. Це призводить до деформації і руйнування пухирців і утворення нових пухирців й генерується велика кількість RONS, що сприяє масоперенесенню активних видів з газоподібної фази в рідку.

Утворення активних частинок у плазмовому пухирці, що генерується плазмою всередині рідкого мікробульбашкового середовища показано на рис. 11 [39].

Система електроживлення електричного розряду побудована на базі напівмостового резонансного тиристорного інвертора потужністю до 20 кВт. Передбачено варіювання частоти в межах 5–100 кГц (рис. 12). До електродів плазмово-хімічного реактора підводяться різнополярні імпульси з амплітудою напруги 4000 В.

Для розрахунку потужності плазми вимірювали миттєві напругу та струм, що проходять через розряд. Для цього використовували двоканальний цифровий осцилограф DSO3202A Digital Storage Oscilloscope 200 MHz зі смугою пропускання 200 МГц і високою швидкістю вибірки.

В роботі досліджували ефективність виробництва NO_x у широкому діапазоні співвідношень струмів розряду – до 15 А при потужності до 10 кВт, для гібридного режиму роботи дуги: імпульсному розряді, що встановився, у бульбашках повітря у воді.

Сформована шлейфна оболонка розряду займає об’єм у сотні разів більше за розрядний канал і утворює нерівноважну плазму, в якій відбуваються всі плазмохімічні реакції.

Оптимальна форма розряду забезпечується залежністю, наведеною на осцилограмі (рис. 13). Оптимальна осцилограма отримана при напрузі пробою 3000 В та амплітуді струму 14 А.

Аналізу попередніх результатів дозволив авторам запропонувати наступну схему плазмово-хімічного отримання ПАВ (рис. 14).

В плазмово-хімічнний реактор 1 за допомого компресора 8 подається повітря (робочій газ). Вода в реактор надходить за допомогою насоса 14 з ємності 7. В схемі передбачена можливість використання водопровідної води. Електроживлення електричного розряду здійснюється за допомогою блока живлення 2. У воді, що продувається повітрям і обробленою імпульсним розрядом, відбувається сильне підкислення з утворенням реактивних форм азоту. Основними продуктами, що насичують ПАВ стають NO_2^- та NO_3^-, а також H_2O_2 у невеликій кількості. Разом з ПАВ на виході плазмово-хімічного реактора присутні також і гази, в яких залишається NO, який у воді не розчиняється.

Для розділення ПАВ та газу в схемі встановлений сепаратор 3. Далі газ, що містить NO, змішується з озоном в змішувачі 4 для повного окислення до NO_2 з подальшим розчиненням ПАВ в барботері 5. Отримана ПАВ направляється в ємність 6 для подальшого використання. Як одна з можливостей корегування складу отрима-

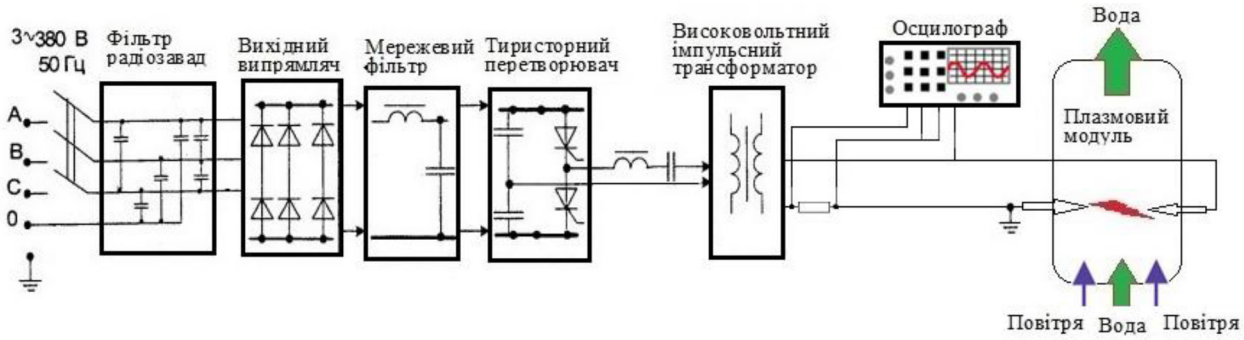


Рис. 12. Система електроживлення електричного розряду

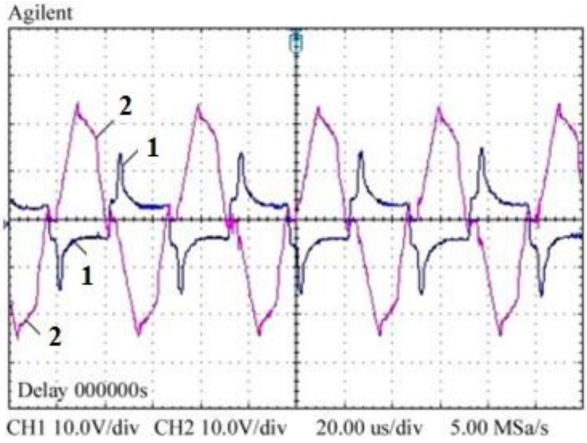


Рис. 13. Типова осцилограма напруги (1) та струму (2) для оптимальної форми розряду (напруга пробою 3000 В та амплітуда струму 14 А)

ної ПАВ є зміна складу робочого газу. Для цього в схемі передбачено отримання газової суміші – повітря + додатковий робочий газ.

Авторами проведені експериментальні дослідження з метою апробації розробленої технології. В експериментальних дослідженнях використовували водопровідну воду, максимальна витрата якої складала до 2 тонн на годину. Як робочій газ використовували повітря та балонний азот підвищеної чистоти – 99,99 %. Витрати повітря і азоту не перевищували 5 м^3/год. Потужність електроживлення не перевищували 10 кВт. Для живлення електричного розряду використовували інверторні перетворювачі потужністю до 20 кВт, які генерували різнополярні імпульси на частоті 5–100 кГц. Струм розряду змінювали до 15 А Для отримання озону застосовували озонатор OZON-Prom з продуктивністю до 15 г/год озону. Насичення води бульбашками повітря становило приблизно 50 %.

Характерні результати досліджень при використанні повітря та азоту, як робочого газу, при озонуванні і без використання озону наведено у таблиці 1.

Визначення показників отриманої ПАВ здійснювали методом іонної хроматографії на компактному IC-флексометрі 930 фірми Thermo Scientific із захисною колонкою DionexIonPac AG9-HC та аналітичною колонкою DionexIonPac AS9-HC та вимірювальним приладом Horiba NO3-LAQUAtwin. pH розчину контролювали приладом pH meter D-51 HORIBA, електропровідність – COND5021ST Sato Shouji Inc. Аналіз вмісту NO і NO_2 у газах, що відходять, виконували газоаналізатором Testo 340. Для експрес аналізів використовували індикаторні тест смужки фірми QUANTOFIX®. В дослідженні всі вимірювання проводилися відразу після плазмової обробки (до 5 хвилин) для обмеження впливу подальших реакцій з NO_2^- та H_2O_2 в рідкій фазі.

Як показують результати досліджень, що наведені у табл. 1, установка з гібридним плазмовим розрядом забезпечує досить високі показники концентрації RONS в ПАВ. Отримані нами результати свідчать, що розроблена плазмова система може використовуватися для прямого високопродуктивного виробництва плазмово-активованої води.

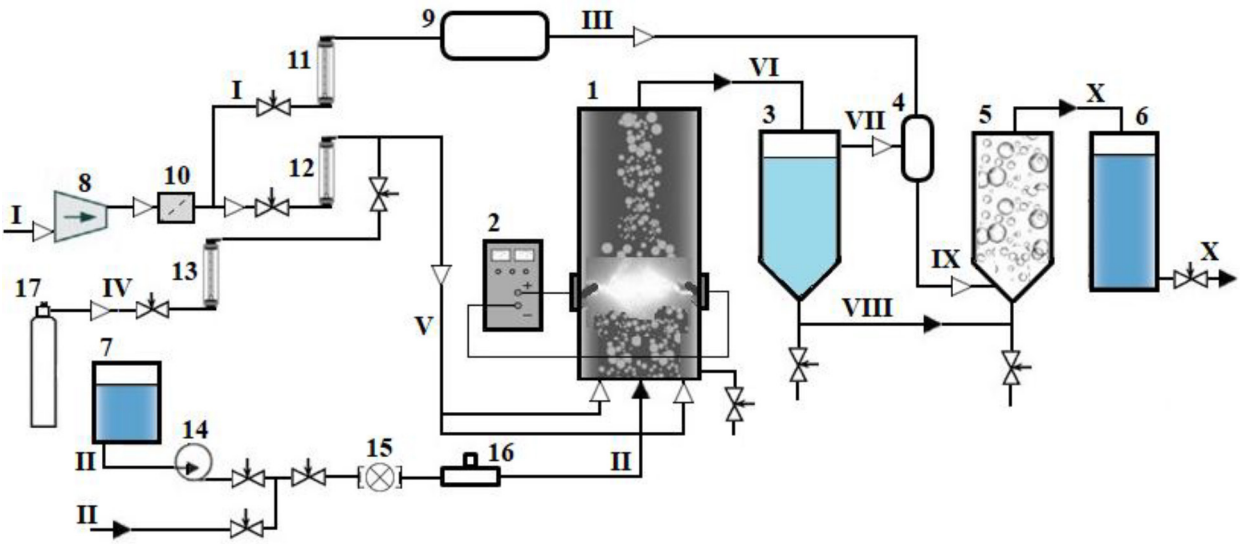


Рис. 14. Технологічна схема виробництва ПАВ: 1 – плазмово-хімічний реактор; 2 – блок живлення; 3 – сепаратор; 4 – змішувач; 5 – барботер; 6 – ємність з ПАВ; 7 – ємність з водою; 8 – компресор; 9 – озонатор; 10 – фільтр; 11, 12, 13 – ротаметри; 14 – насос; 15 – лічильник; 16 – датчик протоку; 17 – балон з додатковим робочім газом; I – повітря; II – вода; III – озон; IV – додатковий робочій газ; V – робочій газ; VI – ПАВ + газ; VII – газ, VIII – ПАВ; IX – газова суміш; X – готова ПАВ

Таблиця 1

Результати досліджень

№	Потужність, кВт	Витрата газу, м³/час	Витрата води, л/год	Витрата озону, г/год	Ел. пров. води, мкСим/см	NO Ppm	NO_3^- Мг/л	NO_2^- Мг/л	O_2 мг/л
робочий газ – повітря									
1	4,3	0,8	240	–	240/500	2200	150	30	7
2	4,3	0,8	240	10	240/530	330	180	40	7
робочий газ – азот									
3	4,3	0,8	240	–	240/400	2000	50	10	0

Досліджували вплив часу зберігання на стабільність фізико-хімічних властивостей отриманої ПАВ. Зміну фізико-хімічних властивостей ПАВ оцінювали через зміну концентрації RONS, присутніх у ПАВ, таких як NO_2^-, NO_3^- та H_2O_2. За дві доби зберігання при кімнатній температурі концентрація NO_2^- знизилась на 15 %, NO_3^- – на 1,2 %, а H_2O_2 – на 2,5 %. Результати дещо відрізняються від роботи [47], де показано, що за двотижневий термін зберігання ПАВ концентрація NO_2^- знизилась на 40,2 %, NO_3^- – на 5 %, та роботи [66], в якій зазначено, що за двотижневий термін зберігання ПАВ концентрація H_2O_2 знизилась на 20,1 %. Але автори цих робіт зберігали зразки ПАВ при температурі 4 °C.

На рис. 15 наведена плазмова установка, що використовувалась для отримання ПАВ в польових умовах.

Система масштабується до 100 кВт за продуктивності до 20 т/год.

Висновки. Аналіз сучасного стану застосування плазмово-активованої води в сільському господарстві показав, що вона сприяє поліпшенню багатьох ключових показників рослинництва. Підвищена увага до цих досліджень зумовлена високим попитом на інтенсифікацію виробництва сільськогосподарських продуктів, яку відкриває застосування плазмових технологій у сільському господарстві. Основною проблемою на сьогоднішній час є перехід від лабораторних умов до промислових масштабних програм та технологій. Високопродуктивне виробництво ПАВ має гарні перспективи на розвиток при використанні гібридного плазмового розряду, що поєднує нерівноважний та рівноважний (дуговий) розряди при поєднанні плазми з водою в бульбашковому середовищі. Одним із найцікавіших застосувань плазми у воді є її потенціал для створення багатих азотом рідких добрив для сільськогосподарських потреб. Експериментально доведено, що запропонована технологія отримання ПАВ з об'ємним генеруванням гібридної плазми для отримання активованої води дозволяє виробляти активовану воду з високим вмістом активних речовин у ній. Генерація плазми всередині бульбашок покращує масоперенесення і дозволяє знижувати напругу пробою, що зменшує енерговитрати на утворення хімічних активних речовин. Активована плазмою вода може бути альтернативою хімічним добривам у сільському господарстві та задовольняти ряд інших потреб. Виконані дослідження показали, що використання озонування підвищує

Рис. 15. Технологічна установка для виробництва ПАВ та плазмово-хімічний реактор з контрольно-вимірювальними приладами та системою керування

ефективність процесу на 4–29 % з допомогою доокиснення NO. Ця технологія полегшує децентралізоване виробництво рідких азотних добрив, яке може використовувати дешеву відновлювальну електроенергію. Можливість виробництва безпосередньо на місці застосування ПАВ з використанням повітря та води як сировини усуває проблеми викидів CO_2та витрати, що пов'язані як з транспортуванням сировини, так і з розподілом добрив і втратою продукції. Отримані результати відкривають нові можливості для розуміння сталого та децентралізованого виробництва рідких азотних добрив та практичному застосуванню плазмової хімічної фіксації азоту. Проте потрібна розробка нормативів для широкого застосування в рослинництві для різних культур.

Список літератури:

1. Потенціал аміаку: не лише добриво, а й чиста енергія. URL: https://www.epravda.com.ua/columns/2023/03/2/697594/ (дата звернення: 12.112.2024).

2. Parkinson B., Tabatabaei M., Upham D. C., Ballinger B., Greig C., Smart S., McFarland E. Hydrogen production using methane: techno-economics ofdecarbonizing fuels and chemicals. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018. Vol. 43, № 5. P. 2540–2555. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.081

3. Wang L., Xia M., Wang H., Huang K., Qian C., Maravelias C. T. Greening ammonia toward the solar ammonia refinery. *Joule*, 2018. Vol. 2, № 6. P. 1055–1074. DOI: 10.1016/j.joule.2018.04.017

4. Ghavam S., Vahdati M., Wilson I. A. G., Styring P. Sustainable ammonia production processes. *Frontiers in Energy Research*, 2021. Vol. 9, 580808. DOI: 10.3389/fenrg.2021.580808

5. Wu S., Thapa B., Rivera C., Yuan Y. Nitrate and nitrite fertilizer production from air and water by continuous flow liquid-phase plasma discharge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021. Vol. 9, № 2. 104761. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104761

6. Rouwenhorst K. H. R., Jardali F., Bogaerts A., Lefferts L. From the Birkeland–Eyde process towards energy-efficient plasma-based NO_x synthesis: A techno-economic analysis. *Energy & Environmental Science*, 2021. Vol. 14, № 5. P. 2520–2534. DOI: http://dx.doi.org/10.1039/D0EE03763J

7. Zhou R., Zhou R., Wang P., Xian Y., Mai-Prochnow A., Lu X., Cullen P. J., Ostrikov K. K., Bazaka K. Plasma-activated water: generation, origin of reactive species and biological applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020. Vol. 53, № 30. 303001. DOI: 10.1088/1361-6463/ab81cf

8. Noxon J. F. Atmospheric nitrogen fixation by lightning. *Geophysical Research Letters*, 1976. Vol. 3, № 8. P. 463–465. DOI: https://doi.org/10.1029/GL003i008p00463

9. Петров С. В., Бондаренко С. Г., Рошанпур Ш. Плазмово активована вода у зростанні та розвитку рослин. *Scientific Progress & Innovations*, 2024. № 27(2). С. 154–163. DOI: 10.31210/spi2024.27.02.27

10. Kučerová K., Henselová M., Slováková Ľ., Hensel K. Effects of plasma activated water on wheat: Germination, growth parameters, photosynthetic pigments, soluble protein content, and antioxidant enzymes activity. *Plasma Process and Polymers*, 2019. Vol. 16, № 3. 1800131. DOI: 10.1002/ppap.201800131

11. Judée F., Simon S., Bailly C., Dufour T. Plasma-activation of tap water using DBD for agronomy applications: Identification and quantification of long lifetime chemical species and production/consumption mechanisms. *Water Research*, 2018. № 133, P. 47–59. DOI: https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.035

12. MMJ DAILY. Plasma activated water in CEA. URL: https://surl.li/wgrsba (дата звернення: 10.11.2024).

13. Adhikari B., Adhikari,M., Ghimire B., Park G., Choi E. H. Cold atmospheric plasma-activated water irrigation induces defense hormone and gene expression in tomato seedlings. *Scientific Reports*, 2019. Vol. 9, № 1. 16080. DOI: 10.1038/s41598-019-52646-z

14. Sivachandiran L., Khacef A. Enhanced seed germination and plant growth by atmospheric pressure cold air plasma: combined effect of seed and water treatment. *RSC Advances*, 2017. Vol. 7, № 4. P. 1822–1832. DOI: 10.1039/C6RA24762H

15. Savi P. J., Mantr A., Khodaverdi H., Zou Y., de Moraes, G. J., Nansen, C. Indirect efects of plasma-activated water irrigation on Tetranychus urticae populations. *Journal of Pest Science*, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10340-024-01791-0

16. Jirešová J., Scholtz V., Julák J., Šerá, B. Comparison of the Effect of Plasma-Activated Water and Artificially Prepared Plasma-Activated Water on Wheat Grain Properties. *Plants*, 2022. № 11(11), P. 1471. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11111471

17. VitalFluid. Plasma activated water. URL: https://vitalfluid.com/plasma-activated-water/ (дата звернення: 10.10.2024).

18. Plasma Activated Water in USDA-organic fertilization. Update 20/10/2021; number 2. URL: https://surl.li/zamnwl (дата звернення: 10.10.2024).

19. Peng P., Chen P., Min,M., Cheng Y., Zhang Y., Anderson E., Zhou N., Schiappacasse C., Hatzenbeller R., Fan,L., Liu S., Chen D., Liu J., Liu Y., Ruan, R. Correction: In situ plasma-assisted atmospheric nitrogen fixation using

water and spray-type jet plasma. *Chemical Communications*, 2018. № 54. P. 12658–12658. DOI: https://doi.org/10.1039/c8cc90458h

20. Zjup W., Chen H., Yuan D., Wu A., Lin X., Li X. Review of low temperature plasma nitrogen fixation technology. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 2021. № 3. P. 201–217. DOI: https://doi.org/10.1007/s42768-021-00074-z

21. Konchekov E.M., Gusein-zade N., Burmistrov D.E., Kolik L.V., Dorokhov A.S., Izmailov A.Yu., Shokri B., Gudkov S.V. Advancements in Plasma Agriculture: A Review of Recent Studies. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023. Vol. 24(20), 15093. DOI: 10.3390/ijms242015093

22. Liao X., Liu D., Xiang Q., Ahn J., Chen S., Ye X., Ding T. Inactivation Mechanisms of Non-Thermal Plasmaon Microbes: A Review. *Food Control*, 2017. Vol. 75, P. 83–91. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.12.021

23. Mandal R., Singh A., Singh A. P. Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 2018. Vol. 80, P. 93–103. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.014

24. Rathod N.B., Kulawik P., Ozogul Y., Ozogul F., Bekhit A.E-D. Recent developments in non-thermal processing for seafood and seafood products: Cold plasma, pulsed electric field and high hydrostatic pressure. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022. Vol. 57(2). P. 774–790. DOI: 10.1111/ijfs.15392

25. Moreau M., Orange N., Feuilloley M.G.J. Non-thermal plasma technologies: new tools for bio-decontamination. *Biotechnology Advances*, 2008. Vol. 26, № 6. P. 610–617. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.08.001

26. Chen H., Yuan D., Wu A.,·Lin X., Li X. Review of lowtemperature plasma nitrogen fixation technology. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 2021. № 3. P. 201–217. DOI: https://doi.org/10.1007/s42768-021-00074-z

27. Wong K.S., Chew N.S.L., Low M., Tan M.K. Plasma-Activated Water: Physicochemical Properties, Generation Techniques, and Applications. *Processes*, 2023. Vol. 11(7), 2213. DOI: https://doi.org/10.3390/pr11072213

28. Bourke P., Ziuzina D., Han L., Cullen P.J., Gilmore B.F. Microbiological interactions with cold plasma. *Journal of Applied Microbiology*, 2017. Vol. 123(2). P. 308–324. DOI: 10.1111/jam.13429

29. Ji S-H., Choi K-H., Pengkit A., Im J. S., Kim J.S., Kim Y.H., Park Y., Hong E.J., Jung S.k., Choi E-H., Park G. Effects of high voltage nanosecond pulsed plasma and micro DBD plasma on seed germination, growth development and physiological activities in spinach. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2016. Vol. 605, № 1. P. 117–128. DOI: https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.02.028

30. Mohajer M.H., Monfaredi M., Rahmani M., Martami M., Razaghiha E., Mirjalili M.H., Hamidi A., Ghomi, H.R. Impact of dielectric barrier discharge plasma and plasma-activated water on cotton seed germination and seedling growth. *Heliyon*, 2024. Vol. 10, № 19. e38160. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38160

31. Wende K., Williams P., Dalluge J., Gaens W.V., Aboubakr H., Bischof J., von Woedtke T., Goyal S.M., Weltmann K.D., Bogaerts A., Masur K., Bruggeman P. Identification of the biologically active liquid chemistry induced by a nonthermal atmospheric pressure plasma jet. *Biointerphases*, 2015. Vol. 10, 029518. DOI: 10.1116/1.4919710

32. Ito T., Uchida G., Nakajima A., Takenaka K., Setsuhara Y. Control of reactive oxygen and nitrogen species production in liquid by nonthermal plasma jet with controlled surrounding gas. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016. Vol. 56:01AC06. DOI: 10.7567/JJAP.56.01AC06

33. Kutasi K., Popović D., Krstulovic N., Milošević S. Tuning the composition of plasma-activated water by a surface-wave microwave discharge and a kHz plasma jet. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019. Vol. 28. № 9. P. 095010. DOI: 10.1088/1361-6595/ab3c2f

34. Rehbein N., Cooray V. NO production in spark and corona discharges. *Journal of Electrostatics*, 2001. Vol. 51, № 1. P. 333–339. DOI: 10.1016/S0304-3886(01)00115-2

35. Li K., Javed H., Zhang G. Calculation of Ozone and NOx Production under AC Corona Discharge in Dry Air Used for Faults Diagnostic. 2nd International Conference on Machinery, Materials Engineering, Chemical Engineering and Biotechnology. *Atlantis Press: Amsterdam, The Netherlands*, 2016. P. 461–466. DOI: 10.2991/mmeceb-15.2016.91

36. Medvecká V., Omasta S., Klas M., Mošovská S., Kyzek S., Zahoranová A. Plasma activated water prepared by different plasma sources: physicochemical properties and decontamination effect on lentils sprouts. *Plasma Science and Technology*, 2021. Vol. 24, № 1. 015503. DOI: 10.1088/2058-6272/ac3410

37. Kim T., Song S., Kim J., Iwasaki R. Formation of NOx from Air and N2/O2 Mixtures Using a Nonthermal Microwave Plasma System. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010. Vol. 49, № 12. 126201. DOI: 10.1143/JJAP.49.126201

38. Van Alphen S., Vermeiren V., Butterworth T.D., van den Bekerom D.C., van Rooij G.J., Bogaerts A. Power Pulsing to Maximize Vibrational Excitation Efficiency in N2 Microwave Plasma: A Combined Experimental and Computational Study. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019. Vol 124, № 3, P. 1765–1779. DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b06053

39. Mai-Prochnow A., Zhou R., Zhang T., Ostrikov K.K., Mugunthan S., Rice S.A., Cullen P.J. Interactions of plasma-activated water with biofilms: inactivation, dispersal effects and mechanisms of action. *NPJ Biofilms Microbiomes*. 2021. Vol. 7(1):11. DOI: 10.1038/s41522-020-00180-6

40. Kumar P.J., Chintagunta A.D., Reddy Y.M., Rajjou L., Garlapati V.K., Agarwal D.K., Siddegowda R.P., Simal-Gandara J. Implications of reactive oxygen and nitrogen species in seed physiology for sustainable crop productivity under changing climate conditions. *Current Plant Biology*, 2021. Vol. 26, 100197. DOI: 10.1016/j.cpb.2021.100197

41. Wong, K.S., Hung, Y.M. & Tan, M.K. Hybrid treatment via MHz acoustic waves and plasma to enhance seed germination in mung bean. *EEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*. 2021. Vol. 68, № 11. P. 3438–3445. DOI: 10.1109/TUFFC.2021.3091155

42. Fan L., Liu X., Ma Y., Xiang Q. Effects of plasma-activated water treatment on seed germination and growth of mung bean sprouts. *Journal of Taibah University for Science*, 2020. Vol. 14(1), P. 823–830. DOI: 10.1080/16583655.2020.1778326

43. Yemeli G.B.N., Švubová R., Kostolani,D., Kyzek S., Machala, Z. The effect of water activated by nonthermal air plasma on the growth of farm plants: Case of maize and barley. *Plasma Process. Polymers*, 2021. Vol. 18, № 1. 2000205. DOI: 10.1002/ppap.202000205

44. Islam S., Omar B.O., Sajib S.A., Roy N.C., Reza A., Hasan M., Talukder M.R., Kabir A.H. Effects of LPDBD plasma and plasma activated water on germination and growth in rapeseed (Brassica napus). *Gesunde Pflanzen*, 2019. Vol. 71, № 3. P. 175–185. DOI: 10.1007/s10343-019-00463-9

45. Henniker PlasmaPlasma. Plasma Activated Water [PAW] Application Note. URL: https://surl.li/pcckkz (дата звернення: 19.11.2024).

46. Thirumdas R., Kothakota A., Annapure U., Siliveru,K., Blundell R., Gatt R., Valdramidis V.P. Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. *Trends in Food Science & Technology*, 2018. Vol. 77, P. 21–31. DOI: 10.1016/j.tifs.2018.05.007

47. Rathore V., Nema S.K. Optimization of process parameters to generate plasma activated water and study of physicochemical properties of plasma activated solutions at optimum condition. *Journal of Applied Physics*, 2021. Vol. 129, 084901. DOI: 10.1063/5.0033848

48. Mai-Prochnow A., Zhou R., Zhang T., Ostrikov,K. (K.), Mugunthan S., Rice S.A., Cullen P.J. Interactions of plasma-activated water with biofilms: inactivation, dispersal effects and mechanisms of action. *Biofilms and Microbiomes*, 2021. Vol. 7(1), № 11. DOI: https://doi.org/10.1038/s41522-020-00180-6

49. Bruggeman P.J., Kushner M.J., Locke B.R., Gardeniers J.G.E. Graham, W. G., Graves D.B., Hofman-Caris R.C.H.M., Maric D., Reid J., Ceriani E., Fernandez Rivas, D., Foster J.E., Garrick S.C., Gorbanev Y., Hamaguchi S., Iza, F., Jablonowski H., Klimova E., Kolb J., Zvereva G. Plasma-Liquid Interactions: A Review and Roadmap. *Plasma Sources Science and Technology*, 2016. Vol. 25(5), 053002. DOI: https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002

50. Kaushika N.K., Ghimirea B., Lia, Y., Adhikaria M., Veeranaa M., Kaushika N., Jhaa N., Adhikari B., Lee S-J., Masur K., von WoedtkeT., Weltmann K.-Di, Choi E.H. Biological and medical application of plasma-activated media, water and solutions. *Biological Chemistry*, 2018. Vol. 400(1). P. 39–62. DOI: 10.1515/hsz-2018-0226

51. Xiao A., Liu D., Li Y. Plasma-Activated Tap Water Production and Its Application in Atomization Disinfection. *Applied Sciences*, 2023. Vol. 13(5), 3015. DOI: https://doi.org/10.3390/app13053015

52. Braný D., Dvorská D., Halašová E., Škovierová H. Cold Atmospheric Plasma: A Powerful Tool for Modern Medicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020. Vol. 21(8):2932. DOI: 10.3390/ijms21082932

53. Zhang Q., Ma R., Tian Y., Su B., Wang K., Yu S., Zhang J., Fang J. Sterilization efficiency of a novel electrochemi-cal disinfectant against Staphylococcus aureus. *Environmental Science and Technology*, 2016. Vol. 50(6). P. 3184–3192. DOI: 10.1021/acs.est.5b05108

54. Chen Z., Krasik Y., Cousens S., Ambujakshan A., Corr, C, Dai X. Generation of underwater discharges inside gasbubbles using a 30-needles-to-plate electrode. *Journal of Applied Physics*, 2017. Vol. 122(15), 153303. DOI: 10.1063/1.4993497

55. Bo L. Non-thermal atmospheric pressure plasma interacting with water for biological applications. *Université Paris Saclay (COmUE)*, 2019. 254 p. NNT: 2019SACLX049

56. Tachibana K., Takekata Y., Mizumoto Y., Motomura H., Jinno M. Analysis of a pulsed discharge within single bubbles in water under synchronized conditions. *Plasma Sources Science and Technology*, 2011. Vol. 20, № 3. 034005. DOI: https://doi.org 10.1088/0963-0252/20/3/034005

57. Milhan N.V.M., Chiappim W., Sampaio A.G.,Vegian M.R.C., Pessoa R.S., Koga-Ito C.Y. Applications of Plasma-Activated Water in Dentistry: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022. Vol. 23(8), 4131. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms23084131

58. Guo D., Liu H., Zhou L., Xiea J., He C. Plasma-activated water production and itsapplication in agriculture. Journal of The Science of Food and Agriculture, 2021. Vol. 101(12), P. 4891–4899. DOI: 10.1002/jsfa.11258

59. Cullen P. J., Lalor J., Scally L., Boehm D., Milosavljević V., Bourke P., Keener, K. Translation of plasma technology from the lab to the food industry. *Plasma Processes and Polymers*, 2017. Vol. 15(2), 1700085. DOI: 10.1002/ppap.201700085

60. Sarinont T., Katayama R., Wada Y., Koga K., Shiratani M. Plant Growth Enhancement of Seeds Immersed in Plasma Activated Water. *MRS Advances*, 2017. Vol. 2(18), P. 1–6. DOI: 10.1557/adv.2017.178

61. Liu B., Honnorat B., Yang H., Arancibia J., Rajjou L., Rousseau A. Non-thermal DBD plasma array on seed germination of different plant species. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018. Vol. 52, № 2. 025401. DOI: 10.1088/1361-6463/aae771

62. Mahaleh M. A. S., Narimisa M., Nikiforov A., Gromov M., Gorbanev, Y., Bitar R., Morent R., Geyter N. D. Nitrogen Oxidation in a Multi-Pin Plasma System in the Presence and Absence of a Plasma/Liquid Interface, *Applied Science*. 2023. Vol. 13, № 13. 7619. DOI: https://doi.org/10.3390/app13137619

63. Klimek A., Piercey D. G. Nitrogen Fixation via Plasma-Assisted Processes: Mechanisms, Applications, and Comparative Analysis – A Comprehensive Review. *Processes*, 2024. Vol. 12(4), 786. DOI: https://doi.org/10.3390/pr12040786

64. Kusano R., Kusano Y. Hybrid Plasmas for Materials Processing. *Materials*, 2023. Vol. 16(11), 4013. P. 1–25. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16114013

65. Chen H., Wu, A., Mathieu S., Gao P., Li X., Xu B.Z., Yan J., Tu, X. Highly Efficient Nitrogen Fixation Enabled by an Atmospheric Pressure Rotating Gliding Arc. *Plasma Processes and Polymers*, 2021. Vol. 18(7), 2000200. DOI: https://doi.org/10.1002/ppap.202000200

66. Julák J., Hujacová A., Scholtz V., Khun J., Holada K. Contribution to the Chemistry of Plasma-Activated Water. *Plasma Physics Reports*, 2018. Vol. 44, № 1. P. 125–136. DOI: 10.1134/S1063780X18010075

Petrov S. V., Bondarenko S. G., Roshanpour Sh., Abramova A. O. IMPROVED PLASMA CHEMICAL TECHNOLOGY FOR PRODUCING PLASMA-ACTIVATED WATER – LIQUID NITROGEN FERTILIZERS

Nitrogen fertilizers play a vital role in increasing agricultural productivity, which is vital for the growing global population. Currently, industrial production of ammonia and nitrogen fertilizers is based on the Haber-Bosch process, which has been used and refined for over a century. Despite this, the Haber-Bosch process is expensive and requires large plant infrastructure, is carried out at high temperatures and pressures, and has adverse effects on the environment due to its dependence on fossil fuels. Thus, there is an urgent need to develop an environmentally friendly alternative technology for the production of nitrogen fertilizers. Atmospheric pressure plasma gas-liquid nitrogen fixation is a very promising alternative to traditional nitrogen fixation, since nitrogen fertilizer is produced by extracting nitrogen from the atmosphere and does not require non-renewable raw materials and is easily available for uptake by plants. The article discusses the use of plasma technology to produce plasma-activated water – liquid nitrogen fertilizers. The aim of the study is to develop an ecological technology for obtaining plasma-activated water for its use in agriculture as liquid nitrogen fertilizers and to clarify the possibilities of their efficient production using a hybrid electric discharge in bubble water. The paper proposes a new plasma system based on a hybrid electric discharge (combining equilibrium and nonequilibrium plasma), operating in a mixture of air and water, for the direct production of activated water. The plasma-chemical treatment process is carried out in a plasma-chemical reactor with a pulsating mode of combustion of an electric discharge in an aqueous solution. The electric discharge in the plasma reactor burns along the surface of air bubbles in water. Such a system is environmentally friendly, since it does not use additional chemicals (air, water and electricity are used as raw materials) and does not produce waste. It was determined that the optimal discharge shape is ensured at a breakdown voltage of 3000 V and an amplitude of 12 A current, where a breakdown of the discharge gap occurs at each pulse with a subsequent transition to an arc shape. Using the developed plasma system, plasma-activated water with a high content of stable active forms of oxygen and nitrogen (NO_3^-, NO_2^-, H_2O_2, O_3, *etc.*) *was obtained. Such plasma-activated water has a high potential for effective use in agriculture, since the long-lived active compounds contained in it can participate in plant metabolism and serve as nutrients for them. The productivity of the plasma installation allows it to be used to meet the needs of small and medium-sized farms for plasma-activated water. Energy consumption for the production of plasma-activated water can be offset by integration with renewable energy sources.*

Key words: *plasma-activated water, nitrogen fertilizers, hybrid plasma, plasma-chemical reactor, plant growth, reactive nitrogen species, reactive oxygen species.*

УДК 641.1:543.2:543.4
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/39

Пилипенко Т. М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Єфімова В. Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Качоровська О. П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мохно В. О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ ТА ВИЯВЛЕННЯ В НИХ НАТРІЙ НІТРИТУ ЯК ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ Е 250

До складу продуктів харчування входять різні компоненти (їх суміші), в тому числі й харчові добавки з відповідною Е-кодифікацію (Е-номером, кодом). Уживаним складником харчових продуктів є натрій нітрит $NaNO_2$*, харчова добавка Е 250. Визначення якості та безпечності продуктів харчування – актуальне завдання сьогодення. Наразі все більше споживачів задаються питаннями щодо складу продуктів харчування, представлених у широкому асортименті на споживчих полицях України, функціональної дії наявних у них складників, їх якості та безпечності.*

Мета дослідження – проаналізувати складники продуктів харчування, представлені на споживчому ринку України, визначити їх функціональні властивості та безпечність використання. Основне завдання полягало в дослідженні складу відібраних продуктів, виявленні в них натрій нітриту $NaNO_2$ *як харчової добавки Е 250, визначенні її вмісту.*

У статті проаналізовано склад трьох різних м'ясопродуктів вітчизняного та закордонного виробництва: 1) Сосиски вищого сорту «Дитячі», виробник – Україна; 2) Ковбаса Чорізо Екстра, виробник – Іспанія; 3) Хамон Серано, виробник – Іспанія.

Аналіз відібраних продуктів показав, що до їх складу, зазначеного на пакуваннях, входять компоненти (суміші складників) як неорганічного, так і органічного походження, в тому числі, й харчова добавка Е 250 (натрій нітрит $NaNO_2$*). У складі сосисок вищого сорту «Дитячі» нараховано 11 компонентів, ковбаси Чорізо Екстра – 12, хамону Серано – 6.*

За результатами проведених досліджень встановлено, що складники відібраних м'ясопродуктів характеризуються відповідною функціональною дією. Показано, що у складі досліджених продуктів наявні безпечні (сіль кухонна, цукор, паприка, часник, мускатний горіх, перець духмяний, Е 301 (натрій аскорбат), олія соняшникова, м'ясна сировина, вода питна), умовно безпечні (Е 450 (пірофосфати), Е 316 (натрій ізоаскорбат), білок соєвий, білок молочний, лактоза, меланж рідкий, Е 120 (кармін)) та потенційно небезпечні компоненти (Е 250 (натрій нітрит), Е 252 (калій нітрит)). Визначено незначний вміст натрій нітриту $NaNO_2$ *як харчової добавки Е 250, складника відібраних продуктів, що знаходиться в межах допустимої норми.*

Ключові слова: *продукти харчування, склад, складники, натрій нітрит, харчова добавка, функціональна дія, безпечність, якісний та кількісний аналіз.*

Постановка проблеми. На споживчому ринку України представлено широкий асортимент продуктів харчування як вітчизняного, так і закордонного виробництва. Це ставить споживачів перед вибором, яким харчовим продуктам віддати перевагу. Виникають запитання щодо якості та безпечності продуктів, їх складників, зазначених на пакуванні, компонентів із відповідною

Е-кодифікацією (Е-номером, кодом) [1–3]. Важливі питання – функціональна дія (властивості) пронумерованих речовин (їх сумішей) [4; 5], які є харчовими добавками, частиною продуктів харчування, наявність широко уживаного натрій нітриту $NaNO_2$ як харчової добавки Е 250.

Оцінювання якості та безпечності продуктів харчування включає багато етапів [6; 7]. Серед них – дослідження складників, зазначених на пакуванні, визначення потенційно небезпечних компонентів, у тому числі й харчових добавок, виявлення уживаної виробниками харчової добавки Е 250, встановлення їх якісного та кількісного складу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У виробництві продуктів харчування використовуються різні складники, в тому числі й харчові добавки [1–5]. Вони надають харчовим продуктам відповідних функціональних властивостей [1]. Подовжують термін зберігання, захищають від псування, формують текстуру, регулюють смак, покращують зовнішній вигляд, посилюють колір, виконують іншу функціональну дію.

Харчові добавки мають відповідну Е-кодифікацію [1], відповідний Е-номер (Е-код). Позначення «Е» і порядковий номер (Е-кодифікація) застосовуються для харчових добавок, які в харчовій промисловості є складниками продуктів. Це, наприклад, консерванти, стабілізатори, підсилювачі смаку, загусники, розпушувачі тощо. Є серед них складники абсолютно нешкідливі, а є небезпечні чи дуже небезпечні [6; 7].

Натрій нітрит (Е 250) – важлива, широко уживана харчова добавка, яка використовується в харчовій промисловості як консервант, фіксатор кольору, стабілізатор [2]. Основна функція натрій нітриту як харчової добавки Е 250 полягає у збереженні якості та безпечності харчових продуктів [9], зокрема м'ясних і рибних виробів, завдяки характерній здатності пригнічувати розвиток небезпечних мікроорганізмів, що викликають ботулізм [7].

Натрій нітрит $NaNO_2$ – складник, який зберігає харчові продукти, сприяє збереженню рожево-червоного відтінку м'яса та забезпечує тривалий термін його зберігання. Попри позитивну дію натрій нітриту, його використання викликає значне занепокоєння через можливий вплив на організм людини. Надмірна кількість нітритів в організмі може спричинити утворення метгемоглобіну, що знижує здатність крові переносити кисень, а також сприяє утворенню нітрозамінів, потенційно канцерогенних сполук [6].

Харчова добавка Е 250 використовується у виробництві різних видів ковбас, сосисок, сардельок, шинки, консервованих м'ясних продуктів, копченостей тощо. Як складник продуктів харчування натрій нітрит $NaNO_2$ підлягає суворому контролю. Його концентрація у харчових продуктах обмежена регуляторними нормами. У Європейському Союзі та в Україні встановлено допустимі рівні додавання нітритів у харчові продукти, які зазвичай не перевищують 50–150 мг/кг продукту [3].

Численні дослідження показали, що нітрити здатні вступати у взаємодію з амінами та амідами, утворюючи нітрозаміни, сполуки, які потенційно небезпечні для здоров'я людини через канцерогенний ефект [8]. Для зменшення ризику та збереження здоров'я споживачам рекомендується дотримуватись збалансованого раціону харчування, а виробникам – використовувати антиоксиданти, що запобігають утворенню нітрозамінів.

Наразі в харчовій промисловості приділяється значна увага дослідженням інноваційних хімічних технологій, які дозволять знизити використання нітритів або замінити їх без шкоди для якості та безпечності продуктів харчування. Так, у співпраці виробників і науковців, досліджуються природні замінники [4; 9], наприклад, екстракти рослин із антимікробними властивостями, що сприяє розвитку більш безпечних методів консервування.

Постановка завдання. Зважаючи на широкий асортимент продуктів харчування, представлених на споживчому ринку України, завдання дослідження – проаналізувати склад відібраних харчових продуктів, виявити в них натрій нітрит $NaNO_2$ як харчову добавку Е 250, визначити її вміст.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження складу продуктів харчування відібрано зразки трьох різних м'ясопродуктів, представлених на споживчому ринку України: 1) Сосиски вищого сорту «Дитячі», виробник – Україна; 2) Ковбаса Чорізо Екстра, виробник – Іспанія; 3) Хамон Серано, виробник – Іспанія.

Аналіз відібраних продуктів показав, що до їх складу, зазначеного на пакуванні, входять різні компоненти (суміші складників) як неорганічного, так і органічного походження, в тому числі, й харчова добавка Е 250 (натрій нітрит $NaNO_2$). У складі сосисок вищого сорту «Дитячі» нараховано 11 компонентів, ковбаси Чорізо Екстра – 12, хамону Серано – 6. Складники досліджуваних продуктів та їх можлива функціональна дія [1] описані в таблиці 1.

Безпечність [7; 9] виявлених складників у відібраних продуктах за їх функціональною дією представлено в таблиці 2. Оцінювання проаналі-

Таблиця 1

Складники досліджуваних продуктів, зазначені на пакуванні, та їх можлива функціональна дія

Харчовий продукт	Складник	Функціональна дія
Хамон Серано	Свинячий окіст	Основний складник продукту, джерело білка та жиру
	Сіль	Консервант, підсилювач смаку
	Цукор	Регулятор, підсилювач смаку
	Консервант Е 250 (натрій нітрит)	Консервант, антибактеріальний агент, діє швидко, використовується в процесі виробництва
	Консервант Е 252 (калій нітрат)	Консервант, антибактеріальний агент, діє повільно, активується під час зберігання продукту
	Антиоксидант Е 301 (натрій аскорбат)	Антиоксидант, регулятор кислотності, покращує забарвлення продукту
Ковбаса Чорізо Екстра	Свинина	Основний складник продукту, джерело білка та жиру
	Сіль	Консервант, підсилювач смаку
	Паприка	Пряність, надає специфічний смак і колір
	Часник	Природний ароматизатор, антибактеріальний агент
	Лактоза	Молочний цукор, покращує текстуру та смак
	Білок соєвий	Замінник м'яса, стабілізатор структури
	Декстроза	Підсолоджувач, загусник, стабілізатор, розм'якшувач, протеолітичний фермент, що допомагає розщеплювати білки
	Білок молочний	Казеїн, емульгатор, стабілізує структуру
	Емульгатор Е 450 (пірофосфати)	Стабілізатор, регулятор кислотності, розпушує, утримує вологу, входить до складу емульгаторів, комплексоутворювачів та підсилювачів
	Консервант Е 250 (натрій нітрит)	Консервант, антибактеріальний агент
	Антиоксидант Е 301 (натрій аскорбат)	Антиоксидант, регулятор кислотності, покращує забарвлення продукту
	Барвник Е 120 (кармін)	Надає продукту червоного кольору
Сосиски вищого сорту «Дитячі»	М'ясна сировина	Основний складник, джерело білка та жиру
	Вода питна	Забезпечує необхідну консистенцію продукту
	Олія соняшникова рафінована	Жирова речовина, що поліпшує текстуру та смакові якості
	Меланж яєчний	Поліпшує текстуру, зв'язує компоненти
	Молоко коров'яче сухе знежирене	Покращує загальний смак і колір м'ясних продуктів, утримує вологу
	Сіль	Консервант, підсилювач смаку
	Цукор	Регулятор, підсилювач смаку
	Антиоксидант Е 316 (натрій ізоаскорбат)	Підкислювач, стабілізатор забарвлення, регулятор кислотності
	Мускатний горіх мелений	Натуральний ароматизатор
	Перець духмяний мелений	Натуральний ароматизатор
	Стабілізатор Е 250 (натрій нітрит)	Стабілізуючий, антибактеріальний агент, консервант

зованих харчових компонентів записано наступним чином. Безпечні складники: Сіль кухонна, цукор; Паприка, часник, мускатний горіх, перець духмяний; Е 301 (натрій аскорбат); Олія соняшникова, м'ясна сировина, вода питна. Умовно безпечні складники: Е 450 (пірофосфати), Е 316 (натрій ізоаскорбат); Білок соєвий, білок молочний; Лактоза, меланж рідкий; Е 120 (кармін). Потенційно небезпечні складники: Е 250 (натрій нітрит); Е 252 (калій нітрит).

У відповідності до державного стандарту ДСТУ 4436:2005 [10] вміст (масова частка) натрій нітриту $NaNO_2$ є одним із нормованих фізико-хімічних показників м'ясопродуктів (варених ковбас, сосисок, сардельок різних гатунків). Масова частка натрій нітриту в м'ясопродуктах не повинна перевищувати $5 \cdot 10^{-3}$ %. Це вказує на його допустиму норму.

Підготовка проб досліджуваних продуктів до аналізу [2].

1. Приготування водної витяжки з відібраних зразків.

У склянках зважуємо 5 г подрібнених продуктів, наливаємо 30 мл підігрітої до 60 °С дистильованої води та перемішуємо впродовж 10 хв. Підготовлені суміші відстоюємо 1 год.

Таблиця 2

Безпечність складників досліджуваних продуктів за їх функціональною дією

Складник	Функціональна дія	Безпечність
Лактоза	Покращує текстуру та смак	Безпечна для більшості людей, але може бути небезпечною для осіб з непереносимістю білків молока
Казеїн (молочний білок)	Емульгатор, стабілізує структуру продукту	Безпечний для більшості, але може викликати алергію в осіб із непереносимістю білків молока
Декстроза	Підсолоджувач, загусник, стабілізатор, розм'якшувач, допомагає розщеплювати білки	Безпечна в невеликих кількостях, надмірна кількість може впливати на рівень глюкози в крові
Антиоксидант Е 316	Стабілізатор забарвлення, регулятор кислотності	Безпечний для здоров'я, але у великих дозах може подразнювати слизову оболонку шлунку
Натрій аскорбат (Е 301)	Антиоксидант, регулятор кислотності, захищає продукт від окиснення, покращує забарвлення	Безпечний, але у великих кількостях може викликати подразнення шлунку
Пірофосфати (Е 450)	Стабілізатор, регулює кислотність, утримує вологу, покращує текстуру продукту	Надмірна кількість може порушувати баланс кальцію та фосфору в організмі
Кармін (Е 120)	Барвник, надає продукту насиченого червоного кольору	Загалом безпечний, але може спричиняти алергічні реакції у чутливих осіб
Калій нітрат (Е 252)	Консервант, антибактеріальний агент, активується під час зберігання продукту	У дозволених нормах безпечний, але може утворювати нітрити, які сприяють утворенню нітрозамінів
Натрій нітрит (Е 250)	Консервант, антибактеріальний агент, стабілізатор кольору	У дозволених нормах безпечний, але може сприяти утворенню нітрозамінів, що є потенційно канцерогенними

2. Осадження білків.

До складу досліджуваних продуктів входять білки. Натрій нітрит $NaNO_2$ при взаємодії з білком набуває властивостей барвника, що характеризується «фарбуванням» [3]. Звідси й апетитний, «натуральний» рожевий колір у досліджуваних продуктах. Для подальших досліджень проводимо осадження білків.

Суміші продуктів переносимо у мірні колби ємністю 50 мл, доводимо об'єми до мітки, змиваючи залишки досліджуваних наважок, та перемішуємо. У склянки піпетками відбираємо 20 мл водних витяжок м'ясопродуктів, додаємо 10 мл 0.1 н розчину натрій гідроксиду NaOH, 40 мл насиченого розчину цинк сульфату $ZnSO_4$, перемішуємо.

Склянки з розчинами нагріваємо на водяній бані за температури 100 °С упродовж 10 хв. Розчини охолоджуємо, фільтруємо у мірні колби ємністю 100 мл, додаємо 4 мл реактиву Грісса (суміш рівних об'ємів розчинів 1 % розчину сульфанілової кислоти у 12 % розчині оцтової кислоти (100 мл) та 0.1 % розчин α-нафтиламіну в 12 % розчині оцтової кислоти (100 мл)), доводимо до мітки та перемішуємо. Таким чином, маємо підготовлені проби досліджуваних продуктів, які далі аналізуємо.

Із підготовленими пробами проводимо якісний хімічний аналіз [8] по виявленню катіону натрію Na^+ та нітрит-іону (аніону) NO_2^-.

Ідентифікація катіону натрію Na^+ [2; 8].

1) При внесенні в полум'я пальника змочених досліджуваними пробами графітових стержнів спостерігаємо забарвлення полум'я в жовтий колір.

2) Мікрокристалоскопічна реакція. При обробці на предметному склі краплі підготовлених проб краплею насиченого спиртового розчину пікринової кислоти $C_6H_2(NO_2)_3OH$, з наступним висушуванням, спостерігаємо утворення осаду у вигляді голчастих кристалів характерної форми.

Ідентифікація нітрит-іону (аніону) NO_2^- [2; 8].

1) Розчин дифеніламіну $(C_6H_5)_2NH$ за наявності нітрит-іону (аніону) NO_2^- у сильно кислому середовищі утворює сполуку синього кольору – бензидинову синь (фіолетову форму дифенілбензидину).

Для проведення аналізу на предметні скельця крапаємо 2 мл підготовлених проб, додаємо краплю 1 % розчину дифеніламіну $(C_6H_5)_2NH$ у концентрованій сульфатній кислоті H_2SO_4. Спостерігаємо появу блідо-фіолетової барви – утворення бензидинової сині (фіолетової форми дифенілбензидину), наявність якої свідчить про низький вміст натрій нітриту $NaNO_2$ як харчової добавки Е 250 у досліджуваних пробах [6].

2) Взаємодія розбавленої сульфатної кислоти H_2SO_4 з досліджуваними пробами. Відбувається

виділення газів – безбарвного нітроген (II) оксиду NO та бурого нітроген (IV) оксиду NO_2:

$$2NO_2^- + 2H^+ = NO\uparrow + NO_2\uparrow + H_2O.$$

У пробірки піпеткою вносимо 2 мл підготовлених проб, додаємо стільки ж розбавленої H_2SO_4 і нагріваємо. Над пробірками тримаємо змочений дистильованою водою індикаторний папірець. Він набуває рожевого відтінку, оскільки нітроген (IV) оксид NO_2 при взаємодії з водою, утворює суміш нітритної HNO_2 та нітратної HNO_3 кислот відповідно:

$$2NO_2 + H_2O = HNO_2 + HNO_3.$$

Низький вміст натрій нітриту $NaNO_2$ як харчової добавки Е 250 у відібраних продуктах підтверджено кількісним аналізом (спектрофотометричним методом) у підготовлених очищених пробах. Кількісно визначено, що вміст натрій нітриту $NaNO_2$ в них дорівнює $3 \cdot 10^{-3}$ – $4 \cdot 10^{-3}$ % і не перевищує нормованого значення $5 \cdot 10^{-3}$ % [10].

Висновки. Встановлено, що до складу відібраних продуктів харчування, представлених на споживчому ринку України, входять різні компоненти (суміші складників) з відповідною функціональною дією, наприклад, консерванти, стабілізатори, які подовжують термін їх зберігання, стабілізують консистенцію та колір.

Показано, що у складі досліджених харчових продуктів наявні безпечні, умовно безпечні та потенційно небезпечні компоненти, серед яких натрій нітрит $NaNO_2$, харчова добавка Е 250.

Визначено незначний вміст натрій нітриту $NaNO_2$ як харчової добавки Е 250, складника досліджених продуктів, що знаходиться в межах допустимої норми і свідчить про безпечність використання.

Список літератури:

1. Ластухін Ю. О. Харчові добавки. Е-коди. Будова. Одержання. Властивості: навч. посіб. Львів : Центр Європи, 2009. 836 с.

2. Пилипенко Т. М., Єфімова В. Г., Хрокало Л. А., Воробйова В. І. Хімічні методи аналізу харчових добавок та косметичних засобів: Лабораторний практикум: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Хімічні технології косметичних засобів та харчових добавок» спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія». К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 72 с.

3. Технічний аналіз харчових добавок та косметичних продуктів: підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», освітньо-професійної програми «Хімічні технології косметичних засобів та харчових добавок» / В. І. Воробйова та ін. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 345 с.

4. Мансурова А. В., Пилипенко Т. М. Дослідження складників продукту жувальних драже. *Сучасні аспекти та перспективні напрямки розвитку науки*: матеріали міжнар. студ. наук. конф. (Кропивницький, 16 жовтня 2021 р.). Кропивницький, 2021. С. 16–18.

5. Combined Compendium of Food Additive Specification. Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Analytical methods, test procedures and laboratory solutions used by and referenced in the food additive specifications. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 2016. 296 p.

6. Методи визначення фальсифікації товарів: підручник / А. А. Дубініна та ін. К. : Видавничий дім «Професіонал», 2010. 272 с.

7. Димань Т. М., Мазур Т. Г. Безпека продовольчої сировини і харчових продуктів: підручник. К. : ВЦ «Академія», 2011. 520 с.

8. Бутченко Л. І., Хохотва О. П., Терещенко О. М., Глушко О. В. Аналітична хімія. Якісний хімічний аналіз: метод. вказівки до вивчення дисципліни для студентів усіх напрямків підготовки. К. : НТУУ «КПІ», 2013. 136 с.

9. Мансурова А. В., Пилипенко Т. М. Безпечність харчових добавок у продуктах харчування. *Пріоритетні напрямки та вектори розвитку світової науки*: матеріали міжнар. студ. наук. конф. (Миколаїв, 21 травня 2021 р.). Миколаїв, 2021. С. 190–191.

10. ДСТУ 4436:2005. Ковбаси варені, сосиски, сардельки, хліби м'ясні. Загальні технічні умови. К. : Держспоживстандарт України, 2006. 32 с.

Pylypenko T. M., Yefimova V. G., Kachorovskaya O. P., Mokhno B. O. INVESTIGATION OF THE COMPOSITION OF FOOD PRODUCTS AND DETECTION OF SODIUM NITRITE AS FOOD ADDITIVE E 250

The composition of food products includes various components (their mixtures), among which are food additives identified by corresponding E-numbers (E-codes). A commonly used component in food products is sodium nitrite ($NaNO_2$), *classified as food additive E 250. Ensuring the quality and safety of food products remains a pressing issue today. Increasingly, consumers are raising questions such as: "What is included in*

the composition of food products available in a wide assortment on Ukrainian store shelves? What are the functional properties, quality, and safety of their components?".

The aim of this study was to investigate the components of food products available on the Ukrainian consumer market, determine their functional properties, and assess the safety of their use. The primary objective of the research was to analyze the composition of selected products, detect the presence of sodium nitrite ($NaNO_2$) *as food additive E 250, and quantify its content.*

The article analyzes the composition of three different meat products of domestic and foreign origin: 1) Premium-grade sausages "Dytyachi" (manufacturer – Ukraine); 2) Chorizo Extra sausage (manufacturer – Spain); 3) Jamón Serrano (manufacturer – Spain).

The analysis of the selected products revealed that their compositions, as stated on the packaging, include various components (mixtures of ingredients) of both inorganic and organic origin, including food additive E 250 (sodium nitrite, $NaNO_2$*). The composition of "Dytyachi" sausages was found to include 11 ingredients, Chorizo Extra sausage – 12 ingredients, and Jamón Serrano – 6 ingredients.*

The results of the study established that the selected meat products available on Ukrainian store shelves contain various components (their mixtures) with corresponding functional properties. It was demonstrated that the investigated products include safe components (salt, sugar, paprika, garlic, nutmeg, allspice, E 301 (sodium ascorbate), sunflower oil, meat raw materials, drinking water), conditionally safe components (E 450 (pyrophosphate), E 316 (sodium erythorbate), soy protein, milk protein, lactose, liquid egg melange, E 120 (carmine)), and potentially hazardous components (E 250 (sodium nitrite), E 252 (potassium nitrite)), among which sodium nitrite ($NaNO_2$)*, food additive E 250, is present.*

A low content of sodium nitrite ($NaNO_2$) *as food additive E 250 was determined in the selected products, within permissible limits.*

Key words: *food products, composition, components, sodium nitrite, food additive, functional properties, safety, qualitative analysis, quantitative analysis.*

УДК 678.675
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/40

Поліщук Б. В.
Український державний хіміко-технологічний університет

Мітіна Н. Б.
Український державний хіміко-технологічний університет

ПИТАННЯ ЩОДО РОЗРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

В статті теоретично розглянуто важливе значення термостійких полімерів у різних галузях промисловості, включаючи авіацію, автомобілебудування, електроніку, металургію та нафтохімічну сферу. Унікальна стійкість до високих температур та хімічного впливу робить термостійкі полімери незамінними для багатьох критично важливих застосувань. А саме, використання термостійких полімерів дозволить суттєво знизити коефіцієнт тертя, підвищити зносостійкість та збільшити термін експлуатації вузлів тертя. У статті опрацьовано основні методи розроблення термостійких полімерів, їх властивості, модифікацію та переваги використання в умовах високих температур та інтенсивного тертя. Розглянуто значні переваги термостійких полімерів перед традиційними матеріалами завдяки їх високій термостійкості, хімічній інертності та легкості. Проаналізовано підвищення ефективності та надійності технологічних процесів при використанні термостійких полімерів в різних галузях промисловості, включаючи металургію. Порівняльні дослідження антифрикційних властивостей поліаміда та полікапраміда показали, що перший при меншому значенні коефіцієнта тертя може працювати при значно великих швидкостях та загрузках. З проведеного огляду авторами підтверджено, що в області вивчення та використання термостійких полімерів в якості антифрикційних матеріалів досягнуті значні успіхи, в першу чергу це відноситься до поліамідів, однак мала сировинна база обмежує широке використання цих полімерів. При великих навантаженнях ароматичні поліаміди мають менше коефіцієнт тертя та знос, чим аліфатичні поліаміди, поліформальдегіди, полікарбонати та армовані фенол формальдегідні та епоксидні смоли. Зазначено, що подальші дослідження в розробці полімерних композицій можуть забезпечити розробку ще більш стійких і функціональних матеріалів для промислових потреб, зменшити витрати на обслуговування обладнання, сприятиме підвищенню ефективності та надійності технологічних процесів.

Ключові слова: *термостійкі полімери, полімерна композиція, вузли тертя, зносостійкість деталей, антифрикційні властивості.*

Постановка проблеми. Метали та їх сплави відіграють роль основних матеріалів для вузлів тертя, але в останні роки вони активно витісняються різноманітними полімерними композиційними матеріалами. Сфери застосування полімерів і конструкційних матеріалів на їх основі: машинобудування (зубчасті колеса, підшипники, елементи конструкцій, корпуси механізмів тощо); транспорт (корпуси транспортних засобів, бампери, підшипники); хімічна промисловість (резервуари, труби); будівництво (облицювання, труби водопроводу); електро- і радіопромисловість (ізоляція, плати, корпуси); медицина (трубки, мембрани, корпуси апаратів); побутова техніка. Особливе місце займають конструкційні полімери, що мають підвищену міцність та жорсткість. Найбільш широко вживані полімери називають великотоннажними (поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, полістирол, поліамід та ін.) – до 90 % від загальної маси вироблюваних полімерів. Зараз усі прикладні роботи направлені на досягнення придатних умов тертя і зношування матеріалів, на усунення патологічних процесів у зоні контакту, на різке зменшення величини зношування [1, 2]. Також, необхідність дослідження зносостійкості деталей машин, технологічного обладнання витікає і з економічних витрат. Однією з найголовніших причин зношувальних відмов є власне зношування рухомих з’єднань машин, так втрати у наслідок зношення і тертя досягають 8 % національного доходу високорозвинених країн.

Прокатні або робочі кліті – основні технологічні машини станів, призначені для деформації металу поміж робочими валками, які найчастіше обертаються в зустрічних напрямках. В багатьох випадках надійність машин, як вказувалось вище визначається довговічністю пар тертя і для більшості видів технологічного обладнання і машин

першорядне значення має підвищення зносостійкості деталей. Композиційні матеріали на основі термостійких полімерів, наповнених порошками та волокнами карбоновими матеріалами, надають таким твердим тілам унікальні властивості [2].

Отже, розробка термостійких полімерів для вузлів тертя прокатних станів є важливим кроком у напрямку розвитку екологічно чистих та ефективних технологій у металургії, інноваційним підходом спрямованим на оптимізацію роботи обладнання в умовах високих температур та інтенсивного тертя, підвищення стійкості вузлів тертя та зменшення впливу агресивних середовищ.

Постановка завдання. Дослідити термостійкі полімери, їх властивості, модифікацію та перспективи використання в умовах високих температур та інтенсивного тертя.

Виклад основного матеріалу. З розвитком промисловості у теперішньому часі характерно широке використання нових полімерних матеріалів. З категорії замінників вони перейшли в категорію повноцінних конструкційних матеріалів. Термостійкі полімери мають високу хімічну інертність, що робить їх ідеальними для застосувань у нафтохімічній промисловості, де матеріали контактують із агресивними речовинами. На відміну від металевих сплавів, полімери мають меншу щільність, що дозволяє знижувати вагу виробів без втрати механічної міцності. За останній період часу створена значна кількість нових полімерів, які використовуються у багатьох інженерних галузях. Термостійкі полімери мають переваги використання у промисловостях зазначених у таблиці 1.

Таблиця 1

Аналіз застосування термостійких полімерів у промисловості

Полімер	Температурна стійкість, °С	Застосування
Поліїміди	400 – 500	Авіація, електроніка
Полісульфони	250 – 300	Фільтри, труби
Поліефірефіри	300 – 350	Хімічна промисловість
Фторопласти	250 – 350	Антипригарні покриття, медицина
Полімерні композити	300 – 450	Металургія, теплоізоляція

Найбільша частка застосування термостійких полімерів в авіаційній та космічній галузі складає 30 %, електронній 25 %, автомобільній 20 % та хімічній 15 % (рис. 1). Основна здатність термостійких полімерів – зберігати механічні та хімічні властивості при високих температурах (до 400 °С і вище), що дозволяє використовувати їх у критично важливих деталях, таких як авіаційні двигуни або ізоляція електронних пристроїв.

Використання полімерів як термостійких матеріалів сприяє підвищенню надійності та довговічності машин і у ряду випадків дозволяє спростити конструкцію та технологію вузлів тертя. Такі важливі фізико – механічні властивості полімерів як висока механічна міцність, стійкість проти задирок при обмеженій подачі мастила, здатність поглинати вібрації та ударні навантаження обумовлюють інтенсивне використання пластмас в якості підшипникових матеріалів. Низький коефіцієнт тертя, висока зносостійкість, здатність

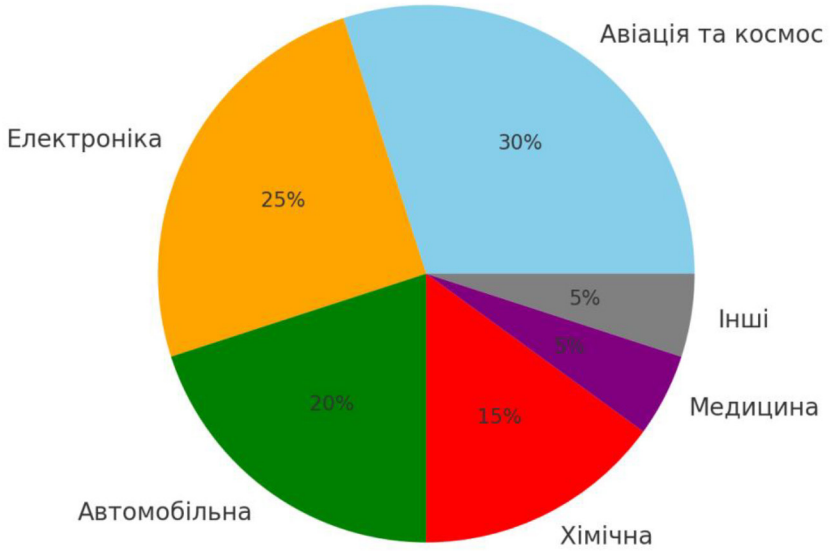


Рис. 1. Використання термостійких полімерів у промисловості України

працювати без мастила, нечутливість до короткочасних перевантажень та ударів, швидка пропрацьованість, здатність працювати в абразивному середовищі – все це вигідно відрізняє полімери від існуючих антифрикційних сплавів.

Методи розроблення термостійких полімерів поліконденсаційний синтез, радикальна полімеризація, модифікація полімерів. Поліконденсація є одним із основних методів отримання термостійких полімерів. У процесі цього методу утворюються високомолекулярні сполуки шляхом конденсаційних реакцій між функціональними групами мономерів, зокрема полііміди, поліефіреф іри та фенолформальдегідні смоли. Радикальна полімеризація дозволяє отримувати полімери з високою термостійкістю, наприклад, поліакрилати та поліметакрилати. Цей метод включає ініціацію, ріст та термінацію полімерних ланцюгів у присутності каталізаторів та ініціаторів. Сучасні дослідження спрямовані на підвищення термостійкості полімерів шляхом хімічної модифікації вихідних полімерних матеріалів. До таких методів належать введення термостійких груп у структуру полімерів або створення композитів із термостійкими наповнювачами. У зв'язку з цим одним з основних напрямів хімії полімерних матеріалів є створення термостійких полімерів, що здатні витримувати тривалий час впливу високих температур без помітного погіршення властивостей їх міцності. Так, для розробки термостійких композицій, працюючих у зонах високих температур застосовують поліамід. Поліаміди – це тверді термопластичні полімери блідо-жовтого кольору з високою температурою плавлення. Застосовують їх у ракетній техніці як високоміцні матеріали. До поліамідів належать групи синтетичних полімерів, в основний ланцюг макромолекул яких, крім атомів вуглецю, входить група (—NH—CO—), яку називають амідною. Поліаміди одержують за реакціями поліконденсації складних органічних сполук. Будова макромолекул різних поліамідів характеризується наявністю в ланцюзі амідних угруповань, що чергуються з метиленовими групами атомів. Залежно від відносного вмісту в макромолекулах полімеру амідних і метиленових угруповань утворюються речовини, що загалом подібні за своїми фізико-механічними і хімічними властивостями, але дещо різняться між собою за величиною показників, які визначають властивості полімеру. Чим більше метиленових груп, тим нижча температура плавлення поліаміду. Крім того, поліаміди з непарним числом CH_2 груп у ланці мають нижчу температуру плавлення, ніж з парним. Це пояснюють зиґзагоподібною будовою ланцюга поліамідів, внаслідок чого за непарного числа CH_2 груп лише половина загального числа NH-груп здатна утворювати водневі зв'язки з групами C═O сусідніх ланцюгів, що підвищує температуру плавлення полімеру. Залежно від симетрії ланок і регулярності їхнього розташування поліаміди можуть мати аморфну і кристалічну структури (ступінь кристалічності деяких поліамідів досягає 40–60 %).

Відмітними властивостями поліамідів є їх здатність при продавлюванні в розплавленому стані крізь філь'єри діаметром близько 0,06–0,1 мм утворювати волокна, які мають надзвичайно високу міцність на розрив (до 6,3 ГПа), високу еластичність, великий коефіцієнт подовження, високу стійкість до зношування, стирання. Основні термостійкі полімери, зокрема для антифрикційних застосувань політетрафторетилен (PTFE, тефлон), поліефірефіркетон (PEEK), поліфеніленсульфід (PPS), поліаміди (PA). Політетрафторетилен є одним з найпоширеніших антифрикційних матеріалів завдяки його надзвичайно низькому коефіцієнту тертя (0,04–0,1), термостійкості (до +260 °C) і високій хімічній стійкості. Використовується в підшипниках, ущільненнях, направляючих та інших вузлах тертя. Поліефірефіркетон демонструє високу термостійкість (до +250 °C), міцність і стійкість до зношування. Використовується в підшипниках, втулках, поршневих кільцях, деталях насосів та компресорів. Поліфеніленсульфід характеризується стійкістю температур (до +200 °C), гарною хімічною інертністю та високою жорсткістю. Застосовується у вузлах з високими навантаженнями, таких як деталі клапанів і насосів [4]. Поліаміди одержують за реакціями поліконденсації складних органічних сполук. Залежно від відносного вмісту в макромолекулах полімеру амідних і метиленових угруповань утворюються речовини, що загалом подібні за своїми фізико-механічними і хімічними властивостями, але дещо різняться між собою за величиною показників, які визначають властивості полімеру. Поліаміди, зокрема нейлон-6,6, демонструють помірну термостійкість (до +120 °C) і гарну зносостійкість. Використовуються у зубчастих передачах, втулках, підшипниках ковзання [3]. Порівняльні дослідження антифрикційних властивостей поліаміда та полікапраміда показали, що перший при меншому значенні коефіцієнта тертя може працювати при значно великих швидкостях та загрузках. Приміром, при швидкості ковзання 5 м/с. та тиску 100 кг/см^2, коефіцієнт тертя дорівнює 0,017, а для

полікапраміду граничні значення тиску та швидкості відповідно дорівнюють 50 кг/см^2 та 3 м/с [2, 5]. Найлон та політетрафторетилен також значно поступаються у зносостійкості поліамідам. Вченими вивченню конструкційні властивості поліамідів та використанню їх у промисловості приділяється багато уваги [7, 8].

Поліаміди, що наповнені політетерафторетиленом та графітом з успіхом використовуються для виготовлення підшипників ковзання та ущільнення, які можуть експлуатуватися без мастила при температурі до 370 °С. При роботі у вакуумі та у середовищі інертних газів, наповнені поліаміди зберігають добрі антифрикційні характеристики до температури 598 °С. Термостійкі полімери, такі як поліефірефіркетон, поліфеніленсульфід та модифіковані поліаміди, продемонстрували ефективність у підшипниках і ущільненнях прокатних станів, що дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування та підвищити довговічність обладнання [6].

Незважаючи на високі фізико – механічні та конструкційні властивості ароматичних поліамідів, виробництво їх невелике, у зв'язку з технологічними труднощами при синтезі з обмеженою сировинною базою. Ароматичні поліаміди є продуктом поліконденсації ароматичних діамінів та ароматичних дикарбонових кислот (або їх похідних). Високі фізико – механічні властивості та термостійкість ароматичних поліамідів у поєднанні з практично неорганічною сировинною базою відкривають великі можливості широкого використання цих матеріалів [7]. У зв'язку з цим вивчення властивостей ароматичних поліамідів присвячено багато робіт як в Україні так і за кордоном. Ароматичні поліаміди можуть бути перероблені в усі види технічних полімерних матеріалів: плівку, волокно та пластмасу. Ці полімери значно перевищують за міцними властивостями аліфатичних поліамідів, широко використовуються в якості антифрикційних матеріалів. Ароматичні поліаміди – це в основному безбарвні високоплавкі кристалічні речовини, як правило, погано розчинні в органічних розчинниках, володіють різко вираженою температурою плавлення. Температура розкладання ароматичних поліамідів біля 400 °С. При великих навантаженнях ароматичні поліаміди мають менше коефіцієнт тертя та знос, чим аліфатичні поліаміди, поліформальдегіди, полікарбонати та армовані фенол формальдегідні та епоксидні смоли [5, 8, 9]. Для підвищення експлуатаційних властивостей поліамідів в них вводять антифрикційні добавки: графіт, тальк, сульфат барію, дисульфід молібдену [1, 3, 5, 8].

Для виготовлення різних матеріалів (наповнених пластмас, лаків, плівок і т.д.) застосовують ароматичні поліаміди: фенілон П, фенілон С. Композицій на основі ароматичних поліамідів можуть працювати в умовах сухого тертя, при змащуванні мінеральними і синтетичними маслами і випускаються у вигляді наступних марок: графелон-10; -20; -35; -4ДНТ. Характерними представниками щільністю ароматичних поліамідів є полімери на основі фталевих кислот та фенілендиамінів, які зберігають високі фізико – механічні властивості у широкому інтервалі температур від «мінус» – 100 до «плюс» + 300 °С [4, 8].

Найбільше розповсюдження цієї групи полімерів одержав фенілон (полі-м-феніленізофталамід) та сополімери на його основі. Останні мають підвищену ударну міцність та володіють кращими технологічними властивостями. Антифрикційні властивості та знос фенілону в залежності від ступеню кристалічності та упорядкованості докладно вивчені у [10, 11]. У цих роботах показана перспективність використання фенілону у важконавантажених вузлах тертя, зокрема, конструкціях автомобільного обладнання.

З проведеного огляду видно, що в області вивчення та використання термостійких полімерів в якості антифрикційних матеріалів досягнуті значні успіхи, в першу чергу це відноситься до поліамідів, однак мала сировинна база обмежує широке використання цих полімерів. Використання фенілону для опор ковзання показало його велику перспективність [12], однак відомостей про вивчення інших ізомерних ароматичних поліамідів на його основі немає.

Основні вимоги до антифрикційних матеріалів: висока термостійкість через екстремальні температури, що можуть досягати понад 200°С; стійкість до великих механічних навантажень, ударних і динамічних навантажень; хімічна стійкість до змащувальних матеріалів і агресивних середовищ; мінімальний коефіцієнт тертя для зменшення енергоспоживання; висока зносостійкість для збільшення ресурсу вузлів тертя. Отже, створення композитних матеріалів при поєднанні різних полімерів та наповнювачів дозволить регулювати властивості відповідно до умов експлуатації.

Висновки. Термостійкі полімери мають значні переваги перед традиційними матеріалами завдяки їх високій термостійкості, хімічній інертності та легкості. Подальші дослідження створення сучасних полімерних матеріалів зможуть забезпечити розробку ще більш стійких і функціональних композиційних полімерних матеріалів для промислових потреб в Україні.

Список літератури:

1. Hawk J.A. and others. Abrasive wear faibres. *ASM Handbook. Materials Park, CH, ASM International*. 2002. № 11. С 906–921.

2. Sytar V., Burya A., Belyanovskaya E., Tomina A.-Constructional materials based on graphite-filled phenylone. *The Potential of Modern Science*. London, 2019. Vol. 3. P. 238–253.

3. Brian J. Briscoe, Sujeet K. Sinha Tribological applications of polymers and their composites: Past, present and future prospects. *Tribology and Interface Engineering Series*. 2008. Vol. 55. P. 1–14

4. Мікульонок І.О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с.

5. Ahmed Abdelbary Polymer tribology. Wear of Polymers and Composites. 2014, P. 1–36

6. Ruili Wang, Feizhi Zhang, Kang Yang, Na Xiao, Jun Tang, Yahui Xiong, Guoqing Zhang, Mengcheng Duan Hao Chen Important contributions of carbon materials in tribology: From lubrication abilities to wear mechanisms. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 979, 5 April 2024, 173454

7. Кобець А.С., Деркач О.Д., Чигвінцева О.П., Кабат О.С., Рула І.В., Дудін В.Ю., Макаренко Д.О., Бойко Ю.В. Застосування полімерних композитів в АПК. Монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 356 с.

8. Біліченко В.В. Матеріали для сервісу і ремонту автомобілів. [Електронний ресурс] Навчальний посібник, ВДТУ. 2005. URL:https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fmbt/bilichenko_servis_ta_remont_avto/

9. Косенко В.А., Кадомський С.В., Богдан О.О., Малишев В.В. Поступаленко В.А. Матеріалознавство на автомобільному транспорті. Київ, 2019. 254 с

10. Chigvintseva O.P., Kabat O.S., Rula I.V., Boyko Yu.V. Tribological properties of aromatic polyamide phenylon C-1. *Materials of XIV International Research and Practice Conference "Conduct of Modern Science-2018"*, Science and Education Ltd, Sheffield, UK (november 30-december 7, 2018). P. 8–10.

11. Деталі з полімерних композитів для рухомих зчленувань машин та механізмів: каталог технічних рішень у с/г виробництві. Вінниця, 1990. С. 39.

12. Koniuszewska A.G., Kaczmar J.W. Application of polymer based composite materials in transportation progress. *Plastics and Recycling Technology*. 2016. Vol. 32, № 1. P. 1–24.

Polishchuk B.V., Mitina N.B. ISSUES REGARDING THE DEVELOPMENT OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

The article theoretically considers the importance of heat-resistant polymers in various industries, including aviation, automotive, electronics, metallurgy and petrochemicals. Unique resistance to high temperatures and chemical influences makes heat-resistant polymers indispensable for many critically important applications. Namely, the use of heat-resistant polymers will significantly reduce the friction coefficient, increase wear resistance and increase the service life of friction units. The article discusses the main methods for developing heat-resistant polymers, their properties, modification and advantages of use in conditions of high temperatures and intense friction. Considers the significant advantages of heat-resistant polymers over traditional materials due to their high heat resistance, chemical inertness and lightness. Analyzes the increase in the efficiency and reliability of technological processes when using heat-resistant polymers in various industries, including metallurgy. Comparative studies of the antifriction properties of polyamide and polycapramid showed that the former, with a lower friction coefficient, can operate at significantly higher speeds and loads. The review confirmed that significant progress has been made in the study and use of heat-resistant polymers as antifriction materials, primarily in polyamides, but the small raw material base limits the widespread use of these polymers. At high loads, aromatic polyamides have a lower coefficient of friction and wear than aliphatic polyamides, polyformaldehydes, polycarbonates and reinforced phenol formaldehyde and epoxy resins. It is noted that further research in the development of polymer compositions can ensure the development of even more stable and functional materials for industrial needs, reduce equipment maintenance costs, and contribute to increasing the efficiency and reliability of technological processes.

Key words: *heat-resistant polymers, polymer composition, friction units, wear resistance of parts, antifriction properties.*

УДК 692.435
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/41

Стеренчук С. М.
Київський національний університет технологій та дизайну

Качан Р. В.
Київський національний університет технологій та дизайну

ОГЛЯД ФОРМ ТА СКЛАДУ СОНЦЕЗАХИСНОГО ЗАСОБУ

Ультрафіолетове випромінювання є основною причиною багатьох пошкоджень шкіри. У роботі наведено перспективи у галузі захисту від сонця, описано ряд вимог до сонцезахисних засобів, а саме: ефективність, водостійкість, сенсорні характеристики, безпечність для здоров'я та навколишнього середовища. Також проаналізовано перелік форм цих засобів: стіки, пудри, спреї, лосьйони, гелі, креми і їх переваги та недоліки. За основу продукту пропонується обрати форму емульсії, аргументуючи це її спорідненістю зі шкірою та можливістю додавання широкого спектру компонентів для стабілізації формули та підсилення її властивостей.

Проведений авторами літературний огляд та аналіз показує, що існує велика кількість компонентів, які виконують роль захисту від УФ-променів, зокрема фізичні та хімічні фільтри. Описані побічні ефекти останніх, зокрема, алергічні прояви на шкірі, вплив на репродуктивну систему та шкоду навколишньому середовищу. Фізичні (мінеральні) фільтри не поглинаються шкірою, а отже не можуть завдати такої шкоди, але залишається ризик інгаляційного вдихання, якщо такі речовини знаходяться у вигляді нано-форм. Сучасний сонцезахисний крем має не лише захищати шкіру від UVA та UVB променів, а й запобігати впливу HEV-випромінювання, так званого «блакитного світла», яке надходить від використання цифрових гаджетів.

Наводиться інформація про флавоноїди – речовини, що є похідними фенольних сполук і є широко розповсюдженими серед рослин. Було проведено ретельний огляд літератури, щоб дізнатись більше про біологічну та хімічну активність цих речовин. Відомо, що дані сполуки мають антиоксидантну, протизапальну та заспокійливу дію. Флавоноїди також виявляють слабку сонцезахисну активність, що робить їх перспективними компонентами при розробці сонцезахисних засобів для підвищення ефективності та зниження токсичності інших фільтрів. Таким чином, сонцезахисні емульсії (креми) з флавоноїдами пропонують багатообіцяючі результати щодо захисту від ультрафіолету.

Ключові слова: *емульсія, хімічні фільтри, фізичні фільтри, антиоксиданти, флавоноїди.*

Постановка проблеми. Наша шкіра як основний зовнішній бар'єр, щодня піддається впливу зовнішніх чинників, зокрема дії ультрафіолетового випромінювання. Біологічними наслідками ультрафіолетових променів (УФ-променів) є гострі еритеми, сонячні опіки та набряки, проте існують також хронічні наслідки – фотостаріння та ризик розвитку раку шкіри. Слід пам'ятати, що 95 % сонячного випромінювання, що досягає Землі та не поглинається озоновим шаром – це ультрафіолетові промені А (UVA – довга ультрафіолетова хвиля), саме ці промені здатні проникати глибоко в шкіру та уражати ділянки ДНК, викликаючи мутації [1]. Рак шкіри посідає 17 місце серед усіх видів раку у світі. Найвищі показники захворюваності та смертності зафіксовані в Австралії – країні з великою кількістю сонячних днів в році. У США щодня діагностують рак шкіри у понад 9500 людей. Більше двох людей помирає від хвороби щогодини [2, 3]. Близько 90 % немеланомних видів раку шкіри пов'язані з впливом ультрафіолетового випромінювання [4].

Сонцезахисний крем – це перший і найдоступніший крок в профілактиці раку шкіри. Дослідження показало, що регулярне використання сонцезахисного крему знижує ризик розвитку раку на 40 % при правильному використанні [5].

На ринку представлено безліч сонцезахисних засобів у різних формах – лосьйони, спреї, засоби у твердій формі (стіки), пудри, креми. Проте не кожен із цих засобів може бути використаний для щоденного повноцінного захисту від сонця, враховуючи його форму нанесення та вміст сонцезахисного фільтру. Засоби у формах стіку підходять лише для точкового нанесення (наприклад, для захисту родинок від УФ-променів), пудри та спреї чудово підходять для поновлення захисту упродовж дня, але їх недостатньо для повноцінного захисту. Тому актуальним залишається вибір форми засобу з сонцезахисними властивостями.

Обраний засіб повинен проявляти найвищий безпечний рівень захисту від сонця, бути нетоксичним, фотостабільним та стійким до фізичних чинників (не змиватись водою, тертям, одягом, тощо) та не спричиняти некомфортних відчуттів при нанесенні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Високоактивний сонцезахисний засіб повинен демонструвати захист від ультрафіолетових променів B (UVB – коротка ультрафіолетова хвиля) і UVA променів, що можливо із засобом із SPF 30 або вище, а також, захищати від «синього світла» – High Energy Visible Light (HEV – високоенергетичне синє світло) променів [6, 7]. Для такого рівня захисту сонцезахисні засоби у формі стіків, пудр чи лосьйонів не підходять, адже технологічно неможливо створити ці засоби із високим вмістом фільтрів.

Що стосується технологічної складової засобу – вибір емульгатора та загущувача впливає на в'язкість, стабільність та поверхневий натяг засобу, здійснюючи правильний розподіл УФ-фільтрів в засобі та створення плівки на шкірі, товщина якої впливає на ефективність сонцезахисту [8]. Технологія створення засобу на основі напівкристалічних полімерів дозволила б створити засіб, що формує плівку постійної товщини. Проаналізовано дослідження з поглинання УФ-променів двома сонцезахисними засобами, у цій роботі ефективність визначали за допомогою фотографій зроблених під впливом ультрафіолетового світла. Після активної діяльності та прийняття душу, поглинання ультрафіолетових променів класичної емульсії помітно зменшувалося, тоді як емульсія з технологією на основі напівкристалічних полімерів залишалася незмінною [9].

Також дослідження доводять, що кращі тактильні характеристики засобу підвищують споживацький інтерес та прихильність до використання сонцезахисту [10].

Сонцезахисні креми створюють на основі фізичних або хімічних фільтрів. Перші відбивають та розсіюють сонячне випромінювання. До основних фізичних фільтрів належать – діоксид титану TiO_2 та оксид цинку ZnO.

Хімічні (органічні) УФ фільтри – більш різноманітні, до них відносять саліцилати, октокрилен, амінобензоати, циннамати, похідні камфори (UVB фільтри), бензофенони, авобензони, антранілати (UVA фільтри). Їхня дія зумовлена поглинанням УФ-променів та перетворенням їх в теплову енергію, що потім вивільняється зі шкіри.

Засоби на основі фізичних фільтрів – це, переважно, пудри, іноді стіки та деякі креми. Основним недоліком пудр – є білий слід на обличчі та низький рівень захисту. Пудра із фактором захисту від сонця (SPF – sun protection factor) не має ставати основним захистом від сонця, проте вона чудово підходить для поновлення захисту від УФ-променів.

Сонцезахисні стіки є дуже зручними для точкового нанесення (губи, родинки, ділянки гіперпігментації), вони створюють щільну оклюзійну плівку, яка, до того ж, забезпечує пом'якшувальний ефект на шкіру. З мінусів – висока вартість та неекономність у використанні, стік не забезпечить повноцінного захисту для обличчя чи тіла, адже складним є вибір дозування для захисту. З плюсів – ліпофільність, бо засоби у стіках, через наявність великої кількості олій та восків, можуть солюбілізувати високу концентрацію УФ-фільтрів.

Сонцезахист у формі спрею – це засіб із високим вмістом води, він легко розподіляється шкірою та не створює жирних плівок. Така форма є зручною для поновлення захисту упродовж дня та без сторонньої допомоги (спина, шия, тощо). Проте спреї потребують повного розтирання [11] та розподілення шкірою, саме це зумовлює їх ефективність від УФ-променів. Враховуючи рідку структуру спрею та швидкість його висихання шкірою, людині складно визначити, які ділянки вже були покриті, а які ні. З цього випливає нерівномірний захист від сонця. Також засоби у формі спреїв можуть бути легкозаймистими та токсичними при розпорошуванні на слизові оболонки очей та рота.

Сонцезахист у формі гелю являє собою засіб на водній основі, що робить його підходящим для людей з жирною, проблемною шкірою, адже не спричиняє липкості та масного блиску. Враховуючи склад, гелі є менш стійкими до поту, води та інших рідин, що зумовлює частіше поновлення засобу.

Водостійкість кремів була протестована Європейською асоціацією парфумерії та косметики [12]. Для цього вони використали басейн з постійною температурою 27–31 °C. Захист від сонця вимірювався після 20 хвилинних занурень двічі, засіб вважався «водостійким» або «дуже водостійким», якщо після занурення значення SPF було більше ніж 50 % від значення до занурення. Наприклад, продукт із SPF 30 може називатись «водостійким», якщо після занурення у воду він зберігає значення SPF вище 15 [12].

Креми та лосьйони є найбільш розповсюдженими засобами захисту від сонця, структура емульсії дозволяє включати в неї високий вміст фільтрів та інші компоненти для ефективної формули сонцезахисту. Креми є зручними в нанесенні. Існують твердження, що 2 мг/см^2 є кількістю, необхідною для захисту від сонця [13], його також називають правилом «чайної ложки»: чайна ложка (5–6 г) продукту необхідна для захисту від сонця таких ділянок як нога, спина, живіт, а 3 г продукту – рука, обличчя та шия. Прорахувати таку кількість захисту можливо лише для кремів та лосьйонів, що робить їх засобами з найбільш контрольованим нанесенням.

Завдяки структурі емульсії, зокрема наявності водної, жирної фази та емульгатора, крем є найбільш наближеним до кислотно-лужного балансу шкіри, що сприяє кращому його поглинанню та швидкому всмоктуванню. Сонцезахисний крем на основі хімічних фільтрів є стійким до зовнішніх чинників – таких, як вода, вітер, тертя і потребує рідшого оновлення, ніж інші, попередньо описані форми. Коли вода випаровується (або поглинається) шкірою, емульгатор однорідно диспергується в масляній фазі і в шарі масло + емульгатор недостатньо енергії, щоб знову включити краплі води з навколишнього середовища. Засіб у формі емульсії дозволяє включити до складу плівкоутворювальні полімери, загущувачі та емоленти, що дозволить покращити тактильні характеристики та суттєво вплинути на стабільність засобу і зумовити прихильність серед споживачів.

Останнім часом популярності набули також сонцезахисні засоби із тонуючим ефектом, що використовуються для макіяжу (тональні креми, коректуючі креми, кушони). Їхньою перевагою є комфорт у нанесенні, адже наносячи макіяж на обличчя можна відразу вберегтись від УФ променів. Їхньої кількості недостатньо для повноцінного захисту, але, нанесення сонцезахисного засобу на макіяж – покращує сонцезахисний фактор [14].

У 2019 році Управління продовольства та медикаментів США (FDA – Food and Drug Administration) запропонували нову регуляцію для сонцезахисних засобів, згідно якої засіб повинен відповідати абревіатурі GRASE (generally recognized as safe and effective – укр). Безпечними та ефективними визнали сонцезахисні олії, лосьйони, креми, гелі, баттери, пасти та стіки. Сонцезахисні спреї та пудри можуть бути включені до переліку GRACE, за умови присутності додаткових тестів [15].

Постановка завдання. Метою роботи є: дослідження компонентів, що задовольнятимуть вимоги безпечності, підвищуватимуть сонцезахисні властивості та покращуватимуть ефективність засобу.

Виклад основного матеріалу. Останніми тенденціями щодо створення засобів є підвищення рівня захисту від сонця (SPF 30, 50+), шляхом зменшення концентрації потенційно фототоксичних та подразнюючих фільтрів [16]. Згідно з дослідженнями FDA [17] деякі органічні фільтри (оксибензон, октиноксат, октисалат, октокрилен, гомосалат, авобензон) всмоктуються через кров – що, в свою чергу, створює необхідність додаткових досліджень щодо визначення системного впливу інгредієнтів сонцезахисного крему. Оксибензон викликає суттєві алергічні прояви на шкірі [18] та впливає на репродуктивну систему [19]. Декілька країн, а також Гаваї заборонили продаж сонцезахисних засобів із цим компонентом. Октокрилен завдає шкоди навколишньому середовищу, зокрема пагубно впливає на корали [20]. Продукти розпаду авобензону викликають алергічні реакції на шкірі [21].

Мінеральні фільтри є безпечнішими через відсутність всмоктування через шкіру. Проте зберігається небезпека вдихання цих речовин, якщо вони перебувають у нано-формі та наносять на шкіру шляхом розпилення [22]. Також останні дослідження повідомляють про численні побічні дії на морські організми [23].

Звідси випливає потреба у створенні засобу із високою ефективністю та безпечного для організму і навколишнього середовища. Натуральні сполуки, що містяться у рослинах є потенційними УФ-фільтрами та можливими компонентами сонцезахисного крему, враховуючи їх походження. Такі сполуки мають назву флавоноїди. Існує понад 4000 видів флавоноїдів, їх можна знайти в овочах, фруктах, квітах, травах, тощо. А також у насінні, горіхах, зерні та спеціях, у напоях (червоне вино, зелений чай). Флавоноїди мають широкий спектр біологічної активності. В рослинах вони відповідають за колір і аромат квітів, а також відіграють важливу роль в акліматизації – працюють для стійкості від морозу та посухи. Флавоноїди показали перспективу захисту від сонця, дослідженнями підтверджена захисна роль рослинних фенолів від фотооксилювального пошкодження [24]. Ці сполуки демонструють слабку сонцезахисну активність у вигляді єдиного захисту, але вони успішно застосовуються у формулах для підсилення сонцезахисного ефекту, діючи в синергії з хімічними

та фізичними фільтрами. Також ці сполуки часто володіють антиоксидантною, протизапальною, заспокійливою дією.

Залежно від ступеня окиснення пропанового фрагменту флавоноїди поділяють на катехіни, антоціани, халкони, флаванони, флавони, флавоноли. Найрозповсюдженішими флавоноїдами є рутин, гесперидин, кверцетин, кемпферол, апігенін.

Враховуючи широку розповсюдженість даних речовин у природі, маємо потребу у глибшому їх дослідженні, підбору концентрації та впливу їх на організм людини.

Відомо про дослідження сонцезахисних властивостей лігніну [25], що показує високі результати блокування УФ-променів – підвищення значення сонцезахисного коефіцієнту на 2,80–3,53 при дозуванні 5 %. Доведено збільшення SPF засобу при додаванні у склад лігніну [26]. В одному із досліджень різні типи лігніну додавали до сонцезахисних засобів та помітили наступні результати: додавання 2 % лігніну підвищило SPF з 15 до 30, а додавання 10 – збільшило SPF до 50. Лігнін має синергію із сонцезахисними фільтрами, доведено його антиоксидантну активність, а суміші лігніну з синтетичними або природними полімерними загусниками (целюлоза, крохмаль, тощо) показали високий потенціал у створенні прозорих плівок для блокування від УФ-променів, що є перспективним напрямком у захисті світлочутливих продуктів [26].

Силімарин при концентрації 10 % в емульсії демонстрував рівень захисту SPF 10 [27]. Рутин не лише підвищив рівень SPF, а й на 75 % покращив поглинання вільних радикалів у порівнянні зі зразками, що містили лише синтетичні фільтри (етилгексилметоксициннамат 3,75 та 7,5 %, етилгексилсаліцилат 2,5 та 5,0 %, етилгексилдиметил парааамінобензойної кислоти (PABA) 4,0 та 8,0 %, октокрилен 5,0 та 10,0 %) [28]. До того ж, рутин має біосумісність зі шкірою людини. Хризин, флавоноїд, що міститься у рослинах та продуктах бджільництва, показав захист від пошкодження кератиноцитів, що зумовлене УФ-випромінюванням [29]. Силімарин (продукт насіння розторопші) і силібін зменшив UVA пошкодження нормальних дермальних фібробластів людини [30].

Геністеїн – ізофлавон, отриманий з сої, інгібував пошкодження ДНК, спричинене пливом сонця [31]. Проводились також дослідження захисного ефекту екстракту *Vaccinium myrtillus (лат.чорниця звичайна)* проти пошкоджень, викликаних впливом УФ-випромінювання. Даний екстракт, багатий на антоціани (297,4 мг/100 г), зміг зменшити цито та генотоксичність, індуковану UVB випромінюванням, а також зменшив перекисне окислення ліпідів [32].

Доведений також пероральний прийом флавоноїдів, зокрема, вживання какао (багате на флаваноли) упродовж 12 тижнів знизило чутливість шкіри до UVB випромінювання на 15–25 % [33].

Ферулова кислота захищає кератиноцити від підвищеного синтезу колагенази *Matrix metallopeptidase 1* (MMP1) – білок, який кодується однойменним геном, розташованим у людей на короткому плечі 11-ї хромосоми.), спровокованою УФ-випромінюванням [34].

Прикладом поглинання UVB променів є екстракт рослини *Schinus terebinthifolius (лат. Шинус фісташколистий)*, в складі якого були виявлені етилгалат, галлова кислота та суміш флавоноїдів. Екстракт був протестований на антиоксидантну та антитирозиназну активність та показав високі фотопротекторні властивості, захист опромінених кератиноцитів та поглинання ультрафіолету в області UVB [35].

Порівнювали ефективність екстрактів зеленого чаю та гінкго (багаті, в основному, на флавоноїди рутин та квертцетин). Оцінювали світлозахисний ефект екстрактів даних рослин разом та окремо при нанесенні на шкіру мишей та активної інсоляції. Результати показали, що зразки із рослинними екстрактами захищали шкіру від УФ-пошкодження. Зразки із екстрактом гінкго були ефективнішими за ті, що містили лише екстракт зеленого чаю [36].

Вивчено фотозахисну та антиоксидантну активність п’яти видів бразильського бамбуку, а також визначали вміст у них флавоноїдів та інших фенольних сполук. Після отримання екстрактів з різних частин сировини, їх об’єднали із трьома хімічними фільтрами (авобензон, октилдиметил PABA та октилметоксициннамат). Результати експерименту показали наявність антиоксидантного захисту в одного із видів бамбука, який коливається від 137,5 до 260 мікрограм на літр. SPF зразок із даним видом бамбуку показав захист від 34 до 86. Згідно із спостереженнями, завдяки фенольним сполукам у складі, бамбук може бути використаний як сонцезахисний агент, що підсилює активність хімічно синтезованих фільтрів [37].

Можемо зробити висновок, що флавоноїди зменшують перекисне окиснення ліпідів та проявляють антиоксидантну дію, вони перено-

сять електрони вільних радикалів, здійснюють хелатуючу дію на метали, інгібують оксидази та відновлюють α-токоферольні радикали. Підтверджену антиоксидантну активність мають: катехін, кверцетин, кемпферол, мірицетин, апігенін, лютеолін.

Поряд із широким рядом переваг серед флавоноїдів, існує також і ряд недоліків: їхня погана водорозчинність та недостатня здатність блокування УФ-променів [38]. Ізольовані флавоноїди не показують високих значень захисту від УФ променів, через розбавлення концентрації флавоноїду в розчині, або ж втраті стабільності, тому їхню ефективність найкраще оцінювати в комплексі з синтетичними хімічними фільтрами, для зменшення концентрації останніх та, відповідно, зменшенню токсичного впливу на організм. Покращити ефективність сонцезахисного засобу із вмістом флавоноїдів може також їхня інкапсуляція. Таким чином, вміст флавоноїдів та їх біодоступність значно підвищується [39].

Висновки.

1. Була доведена доцільність створення сонцезахисного засобу, що перешкоджатиме шкідливому впливу УФ-променів на шкіру та організм людини в цілому.

2. Для забезпечення ряду вимог: безпечність, ефективність, зручність при нанесенні – найкраще підходить засіб у формі емульсії (лосьйон, крем). Такий засіб є найбільш спорідненим зі шкірою, стабільним та володіє найкращими тактильними характеристиками.

3. У якості сонцезахисних фільтрів використовують фізичні та хімічні сполуки. З точки зору споживацького комфорту, високого рівня захисту та розповсюдженості, найпопулярнішими є хімічні фільтри.

4. Органічні сонцезахисні фільтри, попри високий рівень захисту від УФ-променів, мають суперечливі дані, через відомі наслідки їх на шкіру та організм в цілому, а також негативний вплив на навколишнє середовище.

5. Відповідно, є потреба у створенні безпечного сонцезахисного засобу на основі похідних фенольних сполук – флавоноїдів, що широко розповсюджені в природі, зокрема у рослинах. Додавання сполук рослинного походження, мінімізують ризики та підвищують ефективність засобів, посилюючи сонцезахисний ефект. Механізми більшості флавоноїдів ще не з'ясовані до кінця, що робить цю галузь досліджень перспективною та цікавою на наступні роки.

Список літератури:

1. UV Radiation and the Skin / J. 1. D'Orazio та ін. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013. Т. 14. С. 12222–12248. URL: https://doi.org/10.3390/ijms140612222

2. Incidence estimate of nonmelanoma skin cancer (keratinocyte carcinomas) in the US population / H. Rogers та ін. *JAMA Dermatology*. 2012. Т. 151, вип. 10. С. 1081–1086.

3. Cancer facts&figures 2025. *American Cancer Society journal*. URL: https://surl.li/vffszq

4. Koh H., Geller A., Miller D. Prevention and early detection strategies for melanoma and skin cancer: Current status. *Archives of Dermatology*. 1996. Т. 132. С. 436–442.

5. Green A, Williams G, Neale R, et al. Daily sunscreen application and betacarotene supplementation in prevention of basal-cell and squamous-cell carcinomas of the skin: a randomized controlled trial. *The Lancet* 1999; 354(9180):723-729.

6. The impact of blue light and digital screens on the skin / J. Kumari та ін. *Journal of Cosmetic Dermatology*. 2023. Т. 22, вип. 4. С. 1185–1190. URL: https://doi.org/10.1111/jocd.15576

7. Schütz R. Blue Light and the Skin. *Current Problems in Dermatology*. 2021. Т. 55. С. 354–373. URL: https://doi.org/10.1159/000517644.

8. Calculation of the sun protection factor of sunscreens with different vehicles using measured film thickness distribution – Comparison with the SPF in vitro / M. Sohn та ін. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2016. Т. 159. С. 74–81. URL: https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.02.038

9. Formulation of Sunscreens for Optimal Efficacy / D. Moyal та ін. *Journal of Cosmetic Science*. 2020. Т. 71 : 199–208.

10. Wang S., Virmani P., Lim H. Consumer acceptability and compliance: the next frontier in sunscreen innovation. *Photodermatology, Photoimmunology and Photomedicine*. 2016. Т. 32. С. 55–56.

11. Barr J. Spray-on sunscreens need a good rub. *Journal of the American Academy of Dermatology*. 2005. Т. 52. С. 180–181.

12. Colipa (2005) Guidelines for Evaluating Sun Product Water Resistance

13. Schneider J. The teaspoon rule of applying sunscreen. *Archives of Dermatological Research*. 2002. Т. 138. С. 838–839.

14. Layering sunscreen with facial makeup enhances its sun protection factor under real-use conditions / M. Kim та ін. *Skin Research and Technology*. 2021. Т. 27. С. 751–757.

15. U. S. Food And Drug Administration. FDA advances new proposed regulation to make sure that sunscreens are safe and effective. *U. S. Food And Drug Administration*. 21.02.2019. URL: https://surl.li/grndml

16. Nash J.F., Tanner P.R. Relevance of UV filter/sunscreen product photostability to human safety. *Photodermatology, Photoimmunology and Photomedicine*. 2014. Т. 30. С. 88–95.

17. Effect of Sunscreen Application on Plasma Concentration of Sunscreen Active Ingredients: A Randomized Clinical Trial / M Matta та ін. *JAMA*. 2020. Т. 323. С. 256–267.

18. Keyes E., Werth V.P., Brod B. Potential allergenicity of commonly sold high SPF broad spectrum sunscreens in the United States; from the perspective of patients with autoimmune skin disease. *International Journal of Women's Dermatology*. 2019. Т. 5. С. 227–232.

19. Exposure to benzophenone-3 and reproductive toxicity: A systematic review of human and animal studies / M. Ghazipura та ін. *Reproductive Toxicology*. 2017. Т. 73. С. 175–183.

20. Metabolomics Reveal That Octocrylene Accumulates in Pocillopora damicornis Tissues as Fatty Acid Conjugates and Triggers Coral Cell Mitochondrial Dysfunction / D. Stien та ін. *Analytical Chemistry Journal*. 2019. Т. 91. С. 990–995.

21. Drug Delivery Strategies for Avobenzone: A Case Study of Photostabilization / A. Gholap та ін. *Pharmaceutics*. 2023. Т. 15. С. 1008.

22. Osmond M.J., Mccall M.J. Zinc oxide nanoparticles in modern sunscreens: An analysis of potential exposure and hazard. *Nanotoxicology*. 2010. Т. 4. С. 15–41.

23. Inorganic UV filter-based sunscreens labelled as eco-friendly threaten sea urchin populations / F. Marcellini та ін. *Environmental Pollution*. 2024. Т. 351. С. 124093.

24. Flavonoid distribution in tissues of Phillyrea latifolia as estimated by microspectrofluorometry and multispectral fluorescence microimaging / G. Agati та ін. *Photochemistry and Photobiology*. 2002. Т. 76. С. 350–360.

25. Preparation of organic acid lignin submicrometer particle as a natural broad-spectrum photo-protection agent / L. Shu-Xian та ін. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Т. 132. С. 836–843.

26. Sadeghifar H., Ragauskas A. Lignin as a UV Light Blocker – A Review. *Polymers*. 2020. Т. 12. С. 1134.

27. Silymarin, a molecule of interest for topical photoprotection / C. Couteau та ін. *Natural Product Research*. 2012. Т. 26. С. 2211–2214.

28. Rutin increases critical wavelength of systems containing a single UV filter and with good skin compatibility / D. Peres та ін. *Skin Research and Technology*. 2016. Т. 22. С. 325–333.

29. Chrysin protects epidermal keratinocytes from UVA- and UVB-induced damage / N.-L. Wu та ін. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011. Т. 59. С. 8391–8400.

30. UVA-photoprotective potential of silymarin and silybin / A. Rajnochová Svobodová та ін. *Archives of Dermatological Research*. 2018. Т. 310. С. 413–424.

31. Photoprotective effect of isoflavone genistein on ultraviolet B-induced pyrimidine dimer formation and PCNA expression in human reconstituted skin and its implications in dermatology and prevention of cutaneous carcinogenesis / J. O. Moore та ін. *Carcinogenesis*. 2006. Т. 27 : 8. С. 1627–1635. URL: https://doi.org/10.1093/carcin/bgi367

32. Calò R., Marabini L. Protective effect of Vaccinium myrtillus extract against UVA- and UVB-induced damage in a human keratinocyte cell line (HaCaT cells). *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2014. Т. 132. С. 27–35.

33. Long-term ingestion of high flavanol cocoa provides photoprotection against UV-induced erythema and improves skin condition in women / U. Heinrich та ін. *The Journal of Nutrition*. 2006. Т. 136. С. 1565–1569.

34. Pluemsamran T., Onkoksoong T., Panich U. Caffeic acid and ferulic acid inhibit UVA-induced matrix metalloproteinase-1 through regulation of antioxidant defense system in keratinocyte HaCaT cells. *Photochemistry and Photobiology journal*. 2012. Т. 88. С. 961–968.

35. Evaluation of Photoprotective Potential and Percutaneous Penetration by Photoacoustic Spectroscopy of the Schinus terebinthifolius Raddi Extract / M. K. Bulla та ін. *Photochemistry and Photobiology journal*. 2015. Т. 91. С. 558–566.

36. S. E. Dal Belo, L. R. Gaspar, P. M. B. G. M. Campos, Photo protective effects of topical formulations containing a combination of Ginkgo biloba and green tea extracts, Phyt. Res., 25(2011), pp. 1854–1860.

37. In vitro antioxidant and photoprotective activity of five native Brazilian bamboo species / K. Wróblewska та ін. *Industrial Crops and Products*. 2019. Т. 130. С. 208–215.

38. Gause, S.; Chauhan, A. UV-blocking potential of oils and juices. *Int. J. Cosmet. Sci*. 2016, *38*, 354–363.

39. Cutaneous biocompatible rutin-loaded gelatin-based nanoparticles increase the SPF of the association of UVA and UVB filters / C. Oliveira та ін. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2016. Т. 81. С. 1–9.

Sterenchuk S. M., Kachan R. V. A REVIEW OF FORMS AND COMPOSITION OF THE SUNSCREEN

Ultraviolet radiation is the main cause of many skin damages. The paper presents prospects in the field of sun protection, describes a number of requirements for sunscreens, namely: effectiveness, water resistance, sensory characteristics, safety for health and the environment. It also describes a list of forms of the product: sticks, powders, sprays, lotions, gels, creams, their advantages and disadvantages. It is proposed to choose an emulsion form as the basis of the product, arguing this by its affinity with the skin and the possibility of adding a wide range of components to stabilize the formula and enhance its properties.

The literature review and analysis conducted by the authors shows that there is a large list of components that perform the role of protection against UV rays, in particular physical and chemical filters. The side effects of the latter are described, in particular allergic manifestations on the skin, effects on the reproductive system and harm to the environment. Physical (mineral) filters are not absorbed by the skin, and therefore cannot cause such harm, but there is a risk of inhalation inhalation if they are present in the composition in the form of nano-forms. A modern sunscreen should not only protect the skin from UVA and UVB rays, but also prevent the effects of HEV radiation, the so-called «blue light», which comes from the use of digital gadgets.

Information is provided about flavonoids – substances that are derivatives of phenolic compounds and are widely distributed among plants. A thorough literature review was conducted to learn more about the biological and chemical activity of these substances. These compounds are known to have antioxidant, anti-inflammatory and soothing effects. Flavonoids also exhibit weak sunscreen activity, making them promising components in the development of sunscreens to increase the effectiveness and reduce the toxicity of other filters. Thus, sunscreen emulsions (creams) with flavonoids offer promising results in terms of UV protection.

Key words: *emulsion, chemical filtres, physical filtres, antioxidants, flavonoids.*

УДК 661.846
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/42

Шокота М. Ю.
Дніпровський державний технічний університет

Кравченко О. В.
Дніпровський державний технічний університет

Гуляєв В. М.
Дніпровський державний технічний університет

Коваленко А. Л.
Дніпровський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ МАГНІЙ ОКСИДУ З РОЗЧИНІВ МАГНІЙ ХЛОРИДУ ЗА АМОНІАЧНОЮ СХЕМОЮ

Для забезпечення можливості застосування хлоридних магнієвих розчинів і розсолів типу бішофіту для виробництва високоякісного магній оксиду необхідне дослідження і вдосконалення процесу отримання MgO *з* $MgCl_2$ *із застосуванням амонійвмісних реагентів. У даній роботі було експериментально відпрацьовано чотири режими отримання* MgO *за так званою «амоніачною схемою» із застосуванням розчину амоній хлориду. Представлено результати дослідження впливу концентрації розчину* NH_4Cl *на процес осадження* $Mg(OH)_2$ *з модельних розчинів* $MgCl_2$ *і розчину природного бішофіту Затуринського родовища Полтавської області. Удосконалений спосіб отримання* MgO *включав обробку хлормагнієвого розчину газоподібним амоніаком або амоній гідроксидом в присутності* NH_4Cl *в розчині в кількості* ≤ 200 *г/дм*^{3}*, відокремлення, промивання і прожарювання осаду при 900–1200 °С. Встановлено, що застосування* NH_4Cl *як осаджуючого агенту, дає змогу значно збільшити швидкість кристалізації* $Mg(OH)_2$ *і фільтрації утвореної суспензії. У результаті застосування* NH_4Cl *було отримано зразки магній оксиду високого ступеня чистоти, що відповідали вимогам національних стандартів якості для застосування в різних галузях, у тому числі, в медицині. Доведено технічну доцільність використання* NH_4Cl *як осаджувача* $Mg(OH)_2$*, що забезпечило загальний ступінь перетворення* $MgCl_2$ *на* MgO *понад 99 %. Встановлено, що амоній хлорид сприяє прискоренню процесів кристалізації та формуванню щільної структури осаду гідроксидів, що добре фільтрується. Розроблено оптимальні умови введення амонійвмісних регентів у розчин для максимального осадження* $Mg(OH)_2$*. Показано можливість повторного використання маткового розчину та регенерації амоніаку з нього. Удосконалена методика є практично безвідходною, усі регенти використовуються в замкненому циклі, що збільшує швидкість відстоювання суспензій, а також сприяє ущільненню осаду та зменшенню його об'єму. Отримані результати дають змогу інтенсифікувати процес отримання високочистого* MgO *з низьким вмістом хлору (< 0,1 %) з природних джерел, зокрема, бішофіту.*

Ключові слова: *магній оксид, магній гідроксид, осадження, фільтрація, кристалізація, бішофіт, хлор.*

Постановка проблеми. Магнію оксид (магнезія, MgO) є найпоширенішою і найважливішою для промислового застосування сполукою магнію. MgO широко використовують під час виробництва сталі, вогнетривів, гумотехнічних виробів, а також у будівельній, шкіряній, хімічній, харчовій, фармацевтичній, нефто- та газовидобувній та інших галузях промисловості. Магнезія – це хімічно чистий MgO, відомий також під назвою «периклаз» [1, с. 154]. Основними сировинними матеріалами для виробництва магній оксиду в Україні є два природні мінерали: магній карбонат (магнезит, $MgCO_3$) і магній хлорид гексагідрат (бішофіт, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$). Для виробництва високочистого MgO як природну сировину використовують також мінерал карналіт ($MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$).

Для виробництва MgO в промисловому масштабі застосовують два основні технологічні процеси. Перший ґрунтується на високотемпературній декарбонізації природного $MgCO_3$ (маг-

незиту) шляхом його випалювання в спеціальних печах з отриманням цільового MgO (так званий «сухий» спосіб). Другий – на отриманні $Mg(OH)_2$ шляхом взаємодії сильного дм³угу (NaOH або $Ca(OH)_2$) з розчинами хлориду магнію (бішофіту) та подальшій дегідратації отриманого й промитого від хлоридів $Mg(OH)_2$ шляхом випалювання у спеціальних печах (так званий «мокрий» спосіб) [2, с. 149].

Хімізм «мокрого» способу описується такими хімічними реакціями:

$$2NaOH + MgCl_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + 2NaCl$$

$$Mg(OH)_2 \rightarrow MgO + H_2O$$

Залежно від якості вихідної сировини і способу виробництва, магнезія містить від 55 % до 99 % MgO. Основними домішками є: SiO_2, Fe_2O_3, CaO, Al_2O_3, NaCl і $MgCl_2$.

Застосування MgO в медицині насамперед пов'язане зі здатністю магнію активувати ферментативну діяльність організму, тому магній оксид використовують як компонент багатьох ліків. Основними захворюваннями, за яких використовують сполуки магнію, є синдром дефіциту уваги, стенокардія, аритмія серця, астма, хронічна обструктивна хвороба легень, високий артеріальний тиск, діабет, камені в нирках [3, с. 1415]. У роботі [4, с. 778] оцінювали антибактеріальну активність наночастинок MgO по відношенню до *Lactobacillus plantarum*. Нанорозмірні частинки MgO для цих цілей було отримано таким методом: суміш магній нітрату гексагідрату, натрій карбонату та етиленгліколю обробляли ультразвуком з подальшим прожарюванням при температурі 410 °C. При збільшенні концентрації до 1000 ppm і часу впливу частинок MgO на *Lactobacillus plantarum* до 24 год спостерігається практично повне знезараження розчинів.

Фактори, що характеризують сталий розвиток виробництва «мокрим» способом, пов'язані з наявністю родовищ високоякісного бішофіту та збереженням запасів протягом наступних 40–50 років. В Україні Чернігівські та Полтавські бішофітні поля ще недостатньо досліджені, хоча фармацевти реалізують в аптеках бішофіт. Затуринського родовища. Зважаючи на глибинне залягання пластів бішофіту (800–1000 м), видобуток його може здійснюватися тільки геотехнологічним способом – методом підземного розчинення. З огляду на необхідність великих кількостей прісної води для розчинення, ДП «ДонНДГРІ» запропонувало для цього використовувати води, що супроводжують видобуток нафти й газу, які своєю чергою збагачуватимуть розсоли бішофіту йодом і бромом [5, с. 933].

Аналіз літературних джерел показав, що механізм і кінетика процесу одержання магній оксиду з бішофіту недостатньо досліджені. Крім того, не до кінця встановлена структура одержуваного гідроксиду і дисперсність частинок $Mg(OH)_2$ у суспензії. Також залишаються невизначеними оптимальні умови, що забезпечують стабільність суспензії $Mg(OH)_2$, її адгезійні властивості та термічну стійкість утворених частинок. Відсутність інформації з цих питань ускладнює організацію процесу отримання високочистого MgO для медичного застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фізико-хімічною основою виробництва MgO з природних розсолів є система $MgO–CaO–CO_2–H_2O$ [6, с. 21]. При цьому було показано, що з ропи можуть бути отримані для промислових цілей тільки два проміжних продукти, на яких може базуватися виробництво MgO: магній гідрооксид (брусит) і магній гідрокарбонат (гідромагнезит). Магній гідрооксид має суттєві переваги перед гідрокарбонат за виходом MgO (в 1,6 раза більше) і за спіканням (пористість після випалу при температурі 1600 °C до семи разів менша). За останні роки ці висновки отримали нові наукові та практичні підтвердження. Отримано нові дані [7, с. 10196] про будову системи $MgO–CaO–CO_2–H_2O$ в координатах «тиск–температура», які дають змогу розглядати процеси взаємодії в цій системі в дуже широких інтервалах змін зовнішніх термодинамічних параметрів, що полегшує вибір оптимальних технологічних режимів.

Процеси дегідратації $Mg(OH)_2$ і спікання MgO, який при цьому утворюється, вивчено досить ґрунтовно і докладно описані в літературі. За допомогою ядерного магнітного резонансу встановлено [8, с. 933], що структурна вода видаляється з бруситу за температури вище 280 °C. Пари води мають визначальний вплив на процес дегідратації $Mg(OH)_2$.

Підтверджено [9, с. 894], що магній оксид з $Mg(OH)_2$ виходить більш активним, ніж з гідрокарбонату. При температурі 1000 °C зберігається пластинчаста будова зерен, а при 1400 °C відбувається спікання агрегатів. Діаметр зазначених частинок – 75 нм, товщина – близько 10 нм, розміри пор – порядку 40 нм. Дещо менша величина кристалітів після випалу за температури 700 °C: діаметр – 32 нм, а після випалу за температури 1000 °C – 57 нм. Загальна пористість окремих агрегатів після випалу за 1000 °C становить близько 2 %, а отри-

маних із $MgHCO_3$ – близько 2,6 %. Тому спікання матеріалу, отриманого з $Mg(OH)_2$, є результатом кооперативного процесу ущільнення агрегатів. Пари води підвищують швидкість цього процесу при 1050 °C приблизно в 1000 разів [10, с. 1956].

Процес спікання ропного магній оксиду неодноразово був предметом вивчення. Встановлено, що пари NaCl при 1300–1400 °C прискорюють ріст зерен периклазу [11, с. 102]. Магній оксид реагує з водяною парою без присутності води, тоді як для реакції з CO_2 необхідна конденсована волога. У присутності парів води в газовій фазі за високих температур завжди присутній $Mg(OH)_2$. Процеси високотемпературного спікання і рекристалізації магній оксиду з гідроксиду та інших солей вивчені детально [12, с. 58], в тому числі, на особливо чистих препаратах [13, с. 375].

Таким чином, з наведених даних випливає, що отримання високоякісного магній оксиду потребує проведення додаткових досліджень. Основними науковими завданнями з виробництва чистого CaO на базі полтавського бішофіту є:

1) очищення ропи від забруднень і небажаних компонентів;

2) підвищення швидкості осадження і поліпшення фільтрації $Mg(OH)_2$;

3) удосконалення методів випалу $Mg(OH)_2$ з метою одержання зерен із пористістю не більше 10–12 %;

4) розробка методів отримання інших продуктів з ропи для підвищення економічності процесу виробництва MgO.

Постановка завдання. Мета роботи – дослідити фізико-хімічні закономірності осадження та сепарації $Mg(OH)_2$ з розчинів, які містять $MgCl_2$ та запропонувати спосіб інтенсифікації даних процесів, який може бути застосований для переробки бішофіту Затуринського родовища.

Виклад основного матеріалу. У даній роботі було вдосконалено амоніачний метод отримання магній оксиду високої чистоти. З огляду на те, що в більшості відомих способів, під час осадження $Mg(OH)_2$ цільовий продукт значною мірою забруднений сульфатами, які практично не відмиваються [14, с. 11; 15, с. 10], у роботі було сфокусовано основну увагу на підвищенні швидкості відокремлення осаду і зниженні його вологості.

Відомо [16, с. 4073], що при отриманні $Mg(OH)_2$ з хлормагнієвих розчинів (вміст $MgCl_2$ – 150–300 г/дм^3) отримують дрібнокристалічний (≤0,5 мкм) осад гідроксидів з низькою швидкістю фільтрації, порядку 10–12 кг/(м^2 · год). При його відмиванні на фільтрі до залишкового вмісту іонів Cl^- ≤1 %, витрата промивної води становить 15–20 м^3 на 1 т MgO. Тому було розроблено вдосконалений спосіб отримання магній оксиду, що включає обробку хлормагнієвого розчину газоподібним амоніаком або амоній гідроокисом в присутності хлористого амонію в розчині в кількості ≤200 г/дм^3, з наступним відокремленням, промиванням і прожарюванням осаду при 900–1200 °C.

Концентрації магнію та іонів Cl^- у розчинах визначали методом титрування розчином трилону Б і розчином нітрату срібла, відповідно, за стандартними методиками [17, с. 50; 18, с. 69]. Отримання MgO з модельних розчинів $MgCl_2$ проводили наступним чином. Процес змішування реагентів проводили протягом 1–2 год. Отриманий $Mg(OH)_2$ відокремлювали згущенням і фільтрацією, промивали від баластних солей протягом 2–3 год і прожарювали 1–3 год при 900–1200 °C.

У першому експерименті до 1 дм^3 розчину, що містив 263 г/дм^3 $MgCl_2$, вводили 0,32 дм^3 розчину, що містив 290 г/дм^3 NH_4Cl і 4 г/дм^3 $MgCl_2$. У результаті отримували суміш, що містила 200 г/дм^3 $MgCl_2$ і 70 г/дм^3 NH_4Cl. У неї вводили 141 г газоподібного амоніаку (надлишок NH_3 по відношенню до стехіометрії – 50 %) та перемішували протягом 1 год. У результаті осадження отримували магній гідроксид з виходом $Mg(OH)_2$ 85 %. Утворену суспензію в кількості 1,32 дм^3, що містила 104,1 г/дм^3 $Mg(OH)_2$, відстоювали, при цьому швидкість фільтрації становила 85 кг/(м^2 · год). Згущену пульпу в кількості 0,91 дм^3, що містила 151 г/дм^3 $Mg(OH)_2$, фільтрували на вакуум-воронці за ΔP = = 400 мм рт. ст. Швидкість фільтрації становила 70 кг/(м^2 · год). Матковий розчин містив 32,2 г/дм^3 $MgCl_2$, 205 г/дм^3 NH_4Cl і 49,9 г/дм^3 надлишкового амоніаку. Осад промивали на фільтрі 285 см^3 води та отримували 271 г пасти, що містила 50,8 % $Mg(OH)_2$.

Відфільтрований осад магній гідроксиду прожарювали 2 год за 900 °C і отримували 95,7 г магній оксиду, що містив 99,3 % MgO і ≤0,02 % хлору. Далі в матковий розчин із промивними водами в кількості 1,52 дм^3 і з концентрацією $MgCl_2$ 26,1 г/дм^3, NH_4Cl – 165,9 г/дм^3, NH_3 – 40,4 г/дм^3 при 50–60 °C вводили CO_2 в кількості 36,6 г. У результаті осаджувався основний магній карбонат $4MgO \cdot 3CO_2 \cdot 4H_2O$ в кількості 32,3 г. У розчині залишалося ≤4 г/дм^3 $MgCl_2$. Сумарний вихід за магнієм становив 97,8 %. Суспензію відстоювали, при цьому швидкість фільтрації становила 60 кг/(м^2 · год).

Згущену пульпу з концентрацією твердої фази 200 г/дм^3 відфільтровували на вакуум-

воронці за ΔP = 400 мм рт. ст., зі швидкістю фільтрації 1000 кг/(м^2 · год). Відфільтрований осад у кількості 100 г, що містив 14,3 г MgO, промивали на воронці 170 см^3 води. Промитий осад прожарювали протягом 3 год при 950 °С. У результаті отримували 23,2 г магній оксиду із вмістом MgO 99,3 %. Сумарний вихід MgO становив 90 %.

Промивні води змішували з матковим розчином. 0,32 дм^3 отриманого розчину направляли для змішування з вихідним розчином магній хлориду на наступну операцію осадження. З решти розчину регенерували амоніак, який повертали на осадження $Mg(OH)_2$. Матковий розчин після осадження $4MgO \cdot 3CO_2 \cdot 4H_2O$ містив 4 г/дм^3 $MgCl_2$ і 213 г/дм^3 NH_4Cl.

Дані, що доводять технологічні переваги розробленого способу, представлено на рисунках 1 і 2 (умови проведення експериментів: вихідна концентрація $MgCl_2$ – 190 г/дм^3, t = 40–50 °С).

Максимальну концентрацію амонійвмісної добавки підбирали з огляду на той факт, що за концентрації амоній хлориду понад 200 г/дм^3 починається кристалізація солей.

Експерименти 2 і 3 були проведені аналогічно першому, але відрізнялися вмістом NH_4Cl у вихідному хлормагнієвому розчині. Основні технологічні показники розроблених способів осадження $Mg(OH)_2$ наведено в таблиці 1.

З метою перевірки ефективності розробленого способу, був проведений четвертий експеримент, у якому як вихідну магнієвмісну сировину використали розсіл бішофіту Затуринського родовища Полтавської області. Хімічний склад і основні характеристики використаного розсолу представлені в таблиці 2.

Експеримент проводили в такій послідовності. У реактор ємністю 2 дм^3, що містив суспензію магнію (75 г/дм^3 MgO), у розчині з концентрацією NH_4Cl 193 г/дм^3, $MgCl_2$ 31,8 г/дм^3, вводили розчини магній хлориду, отриманого підземним вилуговуванням природного бішофіту ($MgCl_2$ 392 г/дм^3, NaCl 3,3 г/дм^3, $CaSO_4$ 0,4 г/дм^3, $CaCl_2$ 2,8 г/дм^3) зі швидкістю 1 дм^3/год, і NH_4OH (240 г/дм^3 NH_3) зі швидкістю 0,9 дм^3/год (надлишок амоніаку 50 %). Тривалість змішування становила 1 год, температура – 65 °С. Суспензію, що містила 108 г/дм^3 $Mg(OH)_2$, вводили у відстійник у кількості 2 дм^3/год, туди ж подавали 0,04%-вий розчин флокулянту (поліакриламіду марки «*Extrafloc*») зі швидкістю 20 см^3/год. Питома швидкість фільтрації становила 300 кг/(м^2 · год).

Згущену пульпу з концентрацією MgO 400 г/дм^3 у кількості 0,5 дм^3/год подавали на фільтрацію і промивання. При вакуумі 400 мм рт. ст. на фільтрувальній воронці тривалість фільтрації ста-

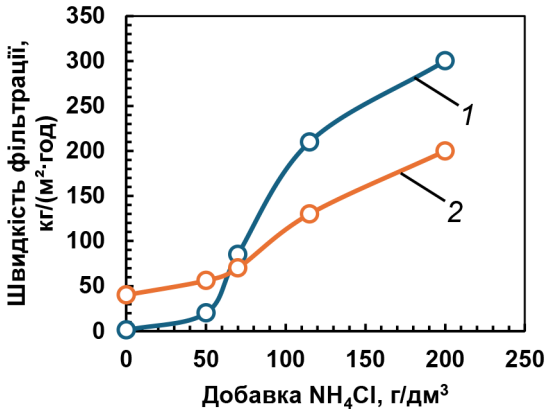


Рис. 1. Залежність фільтраційних властивостей суспензії $Mg(OH)_2$ від кількості доданого NH_4Cl: 1 – просте відстоювання; 2 – фільтрація на вакуум-воронці

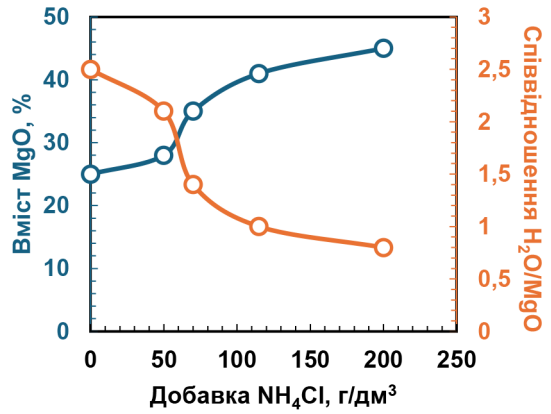


Рис. 2. Залежність вмісту MgO в суспензії $Mg(OH)_2$ від кількості доданого NH_4Cl

Таблиця 1

Технологічні показники процесу осадження CaO з розчину $MgCl_2$

Експеримент	Концентрація NH_4Cl у розчині перед введенням NH_3, г/дм^3	Швидкість фільтрації $Mg(OH)_2$, кг/(м^2 · год)	Температура прожарювання $Mg(OH)_2$, °С	Тривалість прожарювання $Mg(OH)_2$, год	Вміст MgO у кальцій оксиді, %	Вміст Cl^- у кальцій оксиді, %
1	70	85	900	1	99,1	0,02
2	140	250	1200	2	99,3	0,005
3	200	300	900	2	99,2	0,03

Таблиця 2

Хімічний склад та основні характеристики бішофіту Затуринського родовища

Показник	Значення
Колір	Жовто-коричневий
pH	4,95–6,05
Na+K, мг/дм^3	23,2
Ca^{2+}, мг/дм^3	1940
Mg^{2+}, мг/дм^3	90020
Sr^{2+}, мг/дм^3	2,89
NH_4^+, мг/дм^3	<0,03
NO_2^-, мг/дм^3	<0.008
NO_3^-, мг/дм^3	<0.34
F^-, мг/дм^3	0,42
Cl^-, мг/дм^3	254000
I^-, мг/дм^3	43,7
Br^-, мг/дм^3	2704
As^-, мг/дм^3	30,1
SO_4^{2-}, мг/дм^3	15,8
HCO_3^-, мг/дм^3	220
H_3BO_3, мг/дм^3	50,2

новила 0,8 хв, питома продуктивність фільтра – 1700 кг/(м^2 · год). Осад промивали на лійці 300 см^3 води протягом 2 хв і одержували 270 г відфільтрованої пасти $Mg(OH)_2$, яка містила 55 % MgO і 0,4 % хлору.

Пасту прожарювали протягом 3 год при 1200 °С і отримували 148 г магній оксиду, що містив 99,6 % MgO, 0,005 % Cl, 0,05 % CaO. Матковий розчин після згущення і фільтрації $Mg(OH)_2$ та промивні води в кількості 1,9 дм^3/год, які містили 209 г/дм^3 NH_4Cl, 32,8 г/дм^3 $MgCl_2$ і 52.4 NH_3, направляли на стадію осадження основного карбонату магнію. Для цього в матковий розчин додавали CO_2 зі швидкістю 30 дм^3/год. У результаті осаджувалася сполука $4MgO \cdot 3CO_2 \cdot 4H_2O$ в кількості 54 г/год. У розчині залишалося 4 г/дм^3 $MgCl_2$. Сумарний вихід за магнієм становив 97 %.

Матковий розчин разом із промивними водами в кількості 2,5 дм^3 містив, г: $MgCl_2$ – 9,1; NH_4Cl – 474, NH_3 – 119. Суспензію відстоювали і фільтрували зі швидкістю 60 кг/(м^2 · год). Згущену пульпу з концентрацією твердої фази 200 г/дм^3 відфільтровували на вакуум-воронці за ΔP = 400 мм рт. ст. при швидкості фільтрації 1000 кг/(м^2 · год). Відфільтрований осад у кількості 168 г/год, що містив 23 г MgO, промивали на лійці 280 см^3 води. Промитий осад прожарювали протягом 3 год при 1200 °С. У результаті було отримано 24 г магній оксиду із вмістом 99,5 % MgO. Сумарно отримано 175 г MgO, тобто загальний вихід продукту склав 99,9 %. Матковий розчин разом із промивною водою направляли на регенерацію амоніаку, який повертали на осадження магнію на наступних стадіях.

Висновки. Магній оксид, отриманий за пропонованим способом, відповідав вимогам, що ставляться до магній оксиду згідно до ДСТУ EN 16004:2022, магнезії вищого класу (ДСТУ EN 12485:2022) і магній оксиду фармацевтичної кваліфікації (CAS: 1309-48-4). Використання пропонованого способу, порівняно з відомими аналогами [19, с. 45], забезпечує значну інтенсифікацію процесів сепарації суспензії $Mg(OH)_2$. Спосіб може бути використаний для отримання високочистого MgO з концентрованих магнійвмісних розчинів: хлормагнієвих розчинів, які отримують підземним вилуговуванням природного бішофіту; калійних лугів, що утворюються під час вилуговування карналіту; хлормагнієвих розсолів, що утворюються при видобуванні натрій сульфату, тощо.

Список літератури:

1. Бондаренко М. П. Розповсюджені елементи та їх сполуки в хімії будівельних матеріалів : навч. посіб. Алчевськ : ДонДТУ, 2013. 184 с.

2. Ковальчук І. А. Нові керамічні матеріали і методи їх синтезу : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 198 с.

3. Ханюков О. О. та ін. Вивчення клінічної ефективності та безпеки комбінованого препарату калію та магнію в комплексному лікуванні хворих з ішемічною хворобою серця, порушеннями ритму серця та хронічною серцевою недостатністю. *Перспективи та інновації науки*. 2024. №. 5(39). С. 1411–1424. https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024- 5(39)-1411-1424

4. Tang Z. X. et al. Nanosize MgO as antibacterial agent: preparation and characteristics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2012. Vol. 29. P. 775–781. https://doi.org/10.1590/S0104-66322012000400009

5. Неймовірний бішофіт – що це таке і з чим його «їдять». URL: https://surl.li/ltqbta (дата звернення: 20.01.2025).

6. Kristova P. et al. Carbonate mineral paragenesis and reaction kinetics in the system $MgO–CaO–CO_2–H_2O$ in presence of chloride or nitrate ions at near surface ambient temperatures. *Applied geochemistry*. 2014. Vol. 50. P. 16–24. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.08.005

7. Shortt I. et al. Growth and Transformation of Hydrated Magnesium Carbonates under Near-Ambient Conditions. *Crystal Growth and Design*. 2024. Vol. 24. No. 24. P. 10193–10202. https://doi.org/10.1021/acs.cgd.4c01071

8. Sorte E. G., Rimsza J. M., Alam T. M. Computational and experimental 1H-NMR study of hydrated Mg-based minerals. *Molecules*. 2020. Vol. 25. No. 4. P. 933. https://doi.org/10.3390/molecules25040933

9. Vágvölgyi V. et al. Controlled rate thermal analysis of hydromagnesite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2008. Vol. 92. No. 3. P. 893–897. https://doi.org/10.1007/s10973-007-8845-6

10. Lv Y. et al. Investigation of Crystallization Growth Characteristics of $Mg(OH)_2$ Crystals under Unconstrained Conditions. *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 9. P. 1956. https://doi.org/10.3390/ma17091956

11. Sinhamahapatra S. et al. Magnesium aluminate spinel: structure, properties, synthesis and applications. *Transactions of the Indian Ceramic Society*. 2022. Vol. 81. No. 3. P. 97–120. https://doi.org/10.1080/0371750X.2022.2137701

12. Salomão R., Arruda C. C., Antunes M. L. P. Synthesis, dehydroxylation and sintering of porous $Mg(OH)_2$-MgO clusters: evolution of microstructure and physical properties. *Interceram-International Ceramic Review*. 2020. Vol. 69. No. 1. P. 52–62. https://doi.org/10.1007/s42411-019-0067-y

13. Pilarska A. A., Klapiszewski Ł., Jesionowski T. Recent development in the synthesis, modification and application of $Mg(OH)_2$ and MgO: A review. *Powder Technology*. 2017. Vol. 319. P. 373–407. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.009

14. Сичов М. І., Коломієць Л. В., Боряк К. Ф. Вивчення умов отримання сполук магнію особливої чистоти з його хлориду. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2017. №. 1. С. 10–14. https://doi.org/10.32684/2412-5288-2017-1-10-10-14

15. Сичов М. І. Особливості осадоутворення гідроксиду магнію при направленому гідролізі в розчинах хлориду магнію. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2021. №. 1(18). С. 6–14. https://doi.org/10.32684/2412-5288-2021-1-18-6-14

16. Mironyuk I. F. et al. Magnesia formed on calcination of $Mg(OH)_2$ prepared from natural bischofite. *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252. No. 12. P. 4071–4082. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.06.020

17. Мазурак О. Т., Шкумбатюк Р. С., Лень Ю. Т. Практикум лабораторний «Хімія. Частина – аналітична хімія: якісний аналіз» : навч. посіб. Дубляни : Львівський національний університет природокористування, 2024. 71 с.

18. Сучасні методи кондиціювання та очищення води: лабораторний практикум / Уклад.: Т.Є. Мітченко, І.В. Косогіна. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 122 с.

19. Sichov M., Boryak K., Kolomiets L. Technology for Obtaining Highpure Magnesium Compounds Using the Hydrolytic Processes of Sedimentation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 1. №. 6. С. 43–52. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253544

Shokota M. Yu., Kravchenko O. V., Gulyayev V.M., Kovalenko A. L. RESEARCH AND IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF PRODUCING MAGNESIUM OXIDE FROM MAGNESIUM CHLORIDE SOLUTIONS USING THE AMMONIA SCHEME

To ensure the possibility of using magnesium chloride solutions and bischofite-type brines for the production of high-quality magnesium oxide, it is necessary to study and improve the process of obtaining MgO *from* $MgCl_2$ *using ammonium-containing reagents. In this study, four modes of* MgO *production according to the so-called "ammonia scheme" using an ammonium chloride solution were experimentally tested. The results of the study of the effect of* NH_4Cl *solution concentration on the precipitation of* $Mg(OH)_2$ *from model solutions of* $MgCl_2$ *and a solution of natural bischofite from the Zaturinsky deposit in the Poltava region are presented. The improved method for obtaining* MgO *included treatment of the chlorine-magnesium solution with gaseous ammonia or ammonium hydroxide in the presence of* NH_4Cl *in solution at a concentration of* ≤ 200 *g/dm*^{3}*, separation, washing, and calcination of the precipitate at 900– 1200 °C. It has been established that the use of* NH_4Cl *as a precipitating agent can significantly increase the rate of crystallization of* $Mg(OH)_2$ *and filtration of the resulting suspension. Because of the use of* NH_4Cl*, samples of magnesium oxide of high purity met the requirements of national quality standards for use in various industries, including medicine. The technical feasibility of using* NH_4Cl *as a precipitator for* $Mg(OH)_2$ *was proven, which ensured an overall conversion rate of* $MgCl_2$ *to* MgO *of more than 99 %. It was found that ammonium chloride accelerated the crystallization processes and the formation of a dense hydroxide precipitate structure that was well-filtered. Optimal conditions for the introduction of ammonium-containing reagents into the solution for the maximum precipitation of* $Mg(OH)_2$ *were developed. The possibility of reusing the mother liquor and regenerating ammonia was demonstrated. The improved technique is practically waste-free; all reagents are used in a closed cycle, which increases the rate of settling of suspensions and also contributes to the compaction of the sediment and reduction of its volume. The obtained results make it possible to intensify the process of obtaining high-purity MgO with low chlorine content (< 0.1 %) from natural sources, particularly bischofite.*

Key words: *magnesium oxide, magnesium hydroxide, precipitation, filtration, crystallization, bischofite, chlorine.*

УДК 621.894
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/43

Шохін М. В.
Дніпровський державний технічний університет

Гуляєв В. М.
Дніпровський державний технічний університет

Коваленко А. Л.
Дніпровський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ СИНТЕЗУ ФРИКЦІЙНИХ ВИРОБІВ НА ОСНОВІ ЕЛАСТОМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

Дослідження закономірностей синтезу та властивостей еластомірних матеріалів, модифікованих металами, є актуальним напрямом у сучасній хімії полімерів, і зокрема, в галузі створення фрикційних матеріалів. На сьогодні основна частина досліджень зосереджена на створенні виробів за технологією витримки еластомірних матеріалів у середовищі модифікатора. Тому, використання високодисперсних частинок металів або їх оксидів як модифікаторів і наповнювачів еластомірних матриць дасть змогу отримати нову групу термостійких матеріалів, здатних витримувати значні механічні навантаження в широкому діапазоні температур (до 500 °С). В даній роботі було розглянуто декілька методів підвищення механічних властивостей (коефіцієнта тертя і зносостійкості) виробів з еластомірних матеріалів, призначених для використання у гальмівних системах транспортних засобів. Зокрема, були проведені дослідження впливу компонентного складу дванадцяти композицій для синтезу виробів (гальмівних колодок) на їх зносостійкість в умовах, максимально наближених до реальних умов експлуатації в температурному діапазоні від 100 до 500 °С. Композиції складались з фенолформальдегідної смоли, волокнистого наповнювача, металовмісних сполук з групи Fe, Zn, Cu, Fe_2O_3, ZnO, CuO, *органічних і неорганічних модифікаторів. Як волокнистий наповнювач використовували азбест або суміш мінеральних волокон, як органічний модифікатор – речовину з групи: каучук, латекс або їхня суміш; як неорганічний модифікатор – речовину з групи: барити, крейда або їхня суміш; а також частинки кам'яного вугілля або порошок графіту. Встановлено складні залежності між компонентним складом композицій та їх механічними характеристиками (швидкістю зношення, шумом, опору тертю) і запропоновано їх оптимізований усереднений склад котрий забезпечує прийнятні показники експлуатаційних властивостей виробів з них. Рекомендації, надані в роботі, дозволять налагодити технологію виробництва гальмівних пристроїв з підвищеними трибологічними властивостями для забезпечення надійності експлуатації транспортних засобів.*

Ключові слова: *еластомір, фрикційний матеріал, модифікатор, коефіцієнт тертя, стійкість на зношення.*

Постановка проблеми. Для нафтової, газової, авіаційної, автомобільної та інших галузей промисловості необхідні ущільнювальні еластомірні матеріали та вироби, що працюють в умовах низьких і високих температур, характеризуються високою зносостійкістю. Застосовувані нині еластомірні матеріали не забезпечують весь комплекс вимог, що висуваються до ущільнювальних виробів, які використовують у рухомих вузлах і механізмах [1, с. 205624]. Тому розробка нових еластомірних матеріалів з поліпшеними фрикційними і фізико-механічними властивостями є важливою технологічною, техніко-економічною та екологічною проблемою, що має велике народногосподарське значення.

Спроби розроблення еластомірних ущільнювальних виробів, що відповідають комплексу зазначених вище вимог, виконували у двох основних напрямках – створення виробів за традиційною технологією і за технологією витримки еластомірних матеріалів у середовищі модифікатора [2, с. 172760]. Однак дедалі вищі вимоги до надійності та довговічності еластомірних ущільнювальних виробів, які працюють у режимі тертя ковзання, вимагають розроблення нового способу їх отримання.

Створення еластомірних композиційних матеріалів, що характеризуються поліпшеним комплексом спеціальних властивостей, підвищеними екологічними характеристиками, високою економічною ефективністю, інгредієнтів, які потребують великих енергетичних витрат під час виробництва, є актуальним науковим завданням. Останніми роками в різних галузях полімерної промисловості зріс інтерес до неорганічних сполук, що застосовуються як наповнювачі, так і як самостійні компоненти [3, с. 93]. Одними з таких сполук є метали (Fe, Zn, Cu) та їхні оксиди (Fe_2O_3, ZnO, CuO).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Постійно зростаюча навантаженість при вимозі мінімізації розмірів фрикційних вузлів вимагає створення нових матеріалів і вдосконалення наявних технологій їх виготовлення. Процеси порошкової металургії дають змогу створювати нові фрикційні матеріали з рівнем фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, що перевищують характеристики матеріалів, отриманих традиційними методами металургії [4, с. 1027]. Серед великої різноманітності композиційних матеріалів, одержуваних методом порошкової металургії, особливе місце займають порошкові фрикційні матеріали на основі міді та заліза [5, с. 306]. Основними перевагами таких матеріалів є стабільне значення коефіцієнта тертя, висока зносостійкість, високий термін служби (понад 10 000 год) [6, с. 128403]. Однак недоліком цих матеріалів є залежність експлуатаційних вимог від умов навколишнього середовища.

Як полімерну сполучну речовину у фрикційних матеріалах можуть використовуватися поліефірні, епоксидні та поліамідні смоли, поліуретан, деякі флуор-вуглецеві сполуки, комбінування смол і каучуків. Останні мають досить високий коефіцієнт тертя і зносостійкість, проте ефективне застосування їх при температурі вище 200 °C неможливе [7, с. 224].

Найбільшого поширення набули сполуки на основі фенолформальдегідних смол завдяки високим фізико-механічним властивостям. Зазначається [8, с. e00680], що фрикційний матеріал із добавкою такого зв'язувального забезпечує стабільний коефіцієнт тертя в інтервалі температур 250–350 °C, зокрема в агресивних середовищах. У роботі [9, с. 321] наведено склади фрикційних матеріалів гальмівних накладок і виробів, які використовують у вузлах тертя техніки спеціального призначення. Як полімерну сполучну речовину часто застосовують фенолформальдегідні смоли, що забезпечують високу міцність зчеплення фрикційного матеріалу з металевим каркасом, високе значення коефіцієнта тертя та зносостійкість в умовах нормальної роботи й підвищених температур [10, с. 20240047].

У сучасних полімерних композиційних матеріалах використовують наповнювачі та деякі компоненти, що поліпшують технологічні та експлуатаційні властивості, вуглецевої (нанопорошки, сажі), полімерної, керамічної (глини), металічної природи з розмірами часток менше 100 нм [11, с. 2406]. Частинки таких розмірів за рівномірного їхнього розподілу в об'ємі матеріалу, що модифікується, надають нанорозмірним гетерофазним матеріалам стійкості в температурно-силових полях [12, с. 921], позитивно впливаючи на механічні, феромагнітні, сегнетоелектричні та термостабільні властивості матеріалів [13, с. 1].

Введення в структуру еластомірних композицій металів або їхніх оксидів дає змогу підвищити якість матеріалів, вироблених за піролітичною технологією, одержувати поглинальні матеріали з потрібними магнітними та діелектричними властивостями, матеріали, що екранують корпускулярні й хвильові складові іонізуючих випромінювань, конструкційні піролітичні матеріали, теплозахисні матеріали з підвищеною термічною стійкістю [14, с. 979].

Постановка завдання. Метою роботи було вишукування шляхів підвищення коефіцієнта тертя і зносостійкості виробів з еластомірних матеріалів, у склад яких входили фенолформальдегідна смола, волокнистий наповнювач, металовмісна сполука, органічний модифікатор, фрикційний модифікатор і неорганічний модифікатор. Як волокнистий наповнювач використовували азбест або суміш скляних і мінеральних волокон, як металовмісну сполуку – речовину з групи: цинк, мідь, залізо, оксиди цих металів або їхню суміш; як органічний модифікатор – речовину з групи: каучук, латекс або їхня суміш; як неорганічний модифікатор – речовину з групи: барити, крейда або їхня суміш; а також частинки кам'яного вугілля або порошку графіту.

Виклад основного матеріалу. У роботі досліджено вироби з еластомірних матеріалів, зокрема тих, що використовуються як фрикційне облицювання в гальмах, муфтах та інших деталях машин. Композиції органічних фрикційних матеріалів, які використовують для облицювання муфт і гальм транспортних засобів, повинні витримувати високі робочі температури та динамічні навантаження, що виникають багаторазово. Щоб

Таблиця 1

Склади композицій фрикційного матеріалу

Компоненти	Вміст в кожному окремому складі, мас.%											
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	К	Л	М	Н
Азбест	50	25	25	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Скловолокно	–	–	–	14	15	16	15	15	16	15	15	15
Мінеральне волокно	–	–	–	14	16	16	15	15	17	16	15	10
Металеві частинки	5	21	22	19	17	17	18	18	4	21	19	22
Органічні модифікатори	20	–	4	–	4	3	4	4	4	4	4	3
Неорганічні модифікатори	12	17	17	16	15	8	18	18	24	7	15	8
Вугілля або графіт	–	23	24	23	25	31	22	22	26	29	24	34
Фенолформальдегідна смола	13	14	8	14	8	9	8	8	9	8	8	8

уникнути погіршення робочих характеристик і фізичного руйнування за таких умов роботи, облицювання зазвичай посилюється азбестовими волокнами, диспергованими в полімерній матриці. Більшість сучасних фрикційних матеріалів, доступних на вітчизняному ринку, мають недостатньо високий коефіцієнт тертя і зносостійкість [15, с. 120].

У результаті підбору оптимального складу композицій для приготування виробів, було досягнуто підвищення коефіцієнта тертя і зносостійкості фрикційного матеріалу. Складові сумішей для отримання композицій А–Н (таблиця 1) обробляли з отриманням фрикційних облицювань за наступною методикою.

Змішували азбестове волокно, цинковий порошок, органічні модифікатори, неорганічний модифікатор і суху фенолформальдегідну смолу до консистенції гомогенної суміші, яку поміщали у форму та спресували в брикет. Після цього брикет перенесли на прес при тиску близько 35 МПа, а температуру брикету підвищували до 135 °С. При цій температурі смола переходила у рідкий стан утворювала матрицю, яка охоплювала інші складові.

Потім брикет переносили в сушильну шафу з температурою близько 260 °С для подальшого схоплювання смоли. Поверхню тертя затверділого брикету потім відшліфували до певного розміру, що відповідає розміру гальмівної колодки. Виготовлена гальмівна колодка сполучалася з роторним вузлом гальма транспортного засобу, який був встановлений на інерційному динамометрі. За допомогою динамометра випробовували робочі характеристики та зношування залежно від температури, при цьому звертаючи увагу на зміну тертя під час тривалого використання, характерну для монолітних роторних гальм і для гальм таких типів, що використовуються в невеликих автомобілях. Гальмо діаметром 50 мм сполучалося з дисковими колодками з площею 25 см^2 та ефективним діаметром 10 см. Використовувалася шина з радіусом кочення 30 см і навантаженням на колесо 400 кг. Проводили випробування ефективності до та після полірування за температури ротора 100–500 °С.

Значення максимального зносу зразків синтезованих фрикційних матеріалів наведено на рисунку 1.

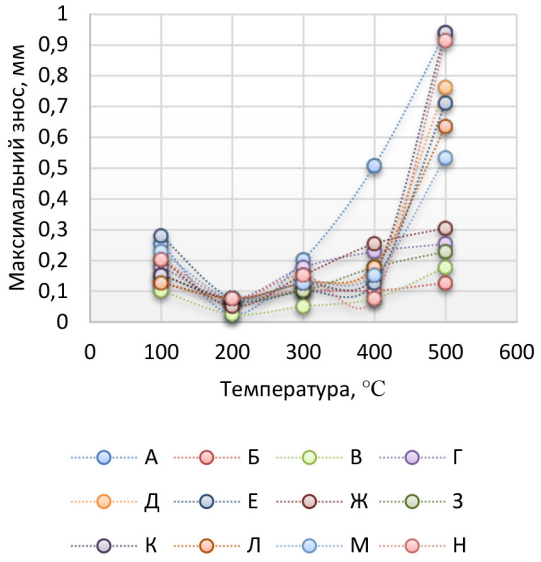


Рис. 1. Залежність максимального зносу від температури експлуатації для різних складів композицій фрикційного матеріалу

Враховуючи хорошу температурну стійкість вугілля і графіту порівняно з органічними фрикційними модифікаторами, здійснили заміну частину азбесту, що міститься у складі А (стандарт), на 23 мас.% вугілля, в результаті чого отримали склад Б (таблиця. 1). Крім того, у складі Б були відсутні органічні модифікатори складу А, а вміст металів (мідного порошку) і баритів було збільшено. Додавання вугільного матеріалу значно зменшило високотемпературне зношування в діапазоні температур 300–500 °С.

Гальмівна колодка, виготовлена зі складу Б, давала значний шум, тому склад Б модифікували, додаючи каучук, а вміст фенолформальдегідної смоли зменшили. У результаті цього отримували склад В. Хоча коефіцієнт тертя і швидкість зносу для складів Б були поліпшені порівняно зі складом А, слід враховувати, що азбест, який міститься в них, шкідливий для здоров'я людини. Тому усі наступні склади, що пройшли випробування, були виготовлені зі скловолокна або мінерального волокна. Скловолокно містило, мас.%: SiO_2 – 545; Al_2O_3 – 15,5; CaO – 17,0; MgO – 4,5; B_2O_3 – 3,5 і Na_2O – 1,0. Діаметр волокна становив 0,25–10 мм, а поверхня була оброблена силан-вмісним реактивом з метою поліпшення адгезії смоли до нього. Мінеральне волокно містило, мас.%: SiO_2 – 42; Al_2O_3 – 8; CaO – 35; MgO – 8; інші оксиди – 7, Діаметр волокна становив 1–15 мкм, довжина – 40–100 мкм. Поверхню волокна обробляли силан-вмісним реактивом для поліпшення адгезії.

Склад Б модифікували заміною азбесту, що міститься в ньому, на рівну кількість скляного волокна і мінерального волокна, в результаті чого вийшов склад Г, який працював краще у високотемпературному робочому діапазоні вище 200 °С, ніж вихідний склад А, при цьому швидкість зносу була такою ж, як для складу Б.

Склад В модифікували аналогічно. Вивчення складу Г, показало, що руйнування ротора, типове для всіх відомих аналогів, що містять скловолокно, були відсутні. Оскільки склад Г мав нижчу загальну швидкість зносу, ніж його попередники, цей склад вибрали як вихідний матеріал для модифікації з метою встановлення різних меж для сімейства вуглецевих матеріалів, які не містять азбесту.

Внаслідок доступності та дешевизни залізних частинок, в суміші Г зробили заміну оксиду цинку залізним порошком, отримавши склад Д. Частинки заліза в складі Д стабілізували коефіцієнт тертя в усьому пропонованому робочому діапазоні фрикційного матеріалу, однак швидкість зносу не відповідала швидкості складу Г за температури вище 400 °С, незважаючи на те, що швидкість зносу було значно зменшено порівняно з матеріалом, що містив азбест, у робочому діапазоні 300–400 °С.

За деяких умов фрикційні матеріали, що містять велику кількість металевих частинок або порошку, такого як залізний або мідний, створюють шум під час користування гальмами. Оскільки графіт і вугілля мають здатність поглинання шуму, випробовували ефект зміни вмісту цих речовин у складі Д з метою зменшення шуму, створюваного під час користування гальмами. У зв'язку з цим кількість вугільних частинок у складі Д було збільшено, а кількість баритів зменшено, внаслідок чого отримано склад Е. Склад Е мав підвищений коефіцієнт тертя при 200 °С з невеликим зменшенням його при 500 °С. Швидкість зносу складів Е і Д була практично однаковою.

З метою розроблення фрикційного матеріалу для великих навантажень, що має максимальний опір на знос за 500 °С, далі було отримано склади, що містять частинки з міді або на основі міді, замість залізних частинок. Склад Ж отримано зі складу Е заміною вугільних частинок на рівні кількості графіту. Коефіцієнт тертя складу Ж практично збігається з коефіцієнтом тертя складу Е, а швидкість зносу трохи зменшена, але прийнятна для гальмівних колодок більшості транспортних засобів.

Значення коефіцієнта тертя зразків синтезованих фрикційних матеріалів наведено на рисунку 2.

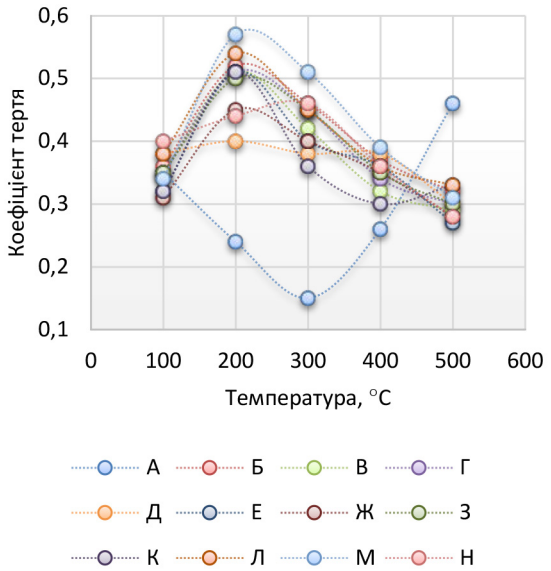


Рис. 2. Залежність коефіцієнта тертя від температури експлуатації для різних складів композицій фрикційного матеріалу

Для зменшення швидкості зносу складу Ж, всі частинки вугілля або графіту, що містяться в ньому, виготовляли виключно з великих частинок синтетичного графіту для отримання складу З. Як видно з порівняння характеристик складів Е і J (рисунки 1, 2), коефіцієнт тертя і швидкість зносу складу еквівалентні складу Е. Однак шум, спричинений колодками, що містять метал, може бути ослаблений до допустимого рівня шляхом додавання порошку графіту.

Для оцінки впливу металевого порошку або частинок на властивості фрикційних матеріалів з високим вмістом вуглецю, які не містять азбест, створено склад К, у якому відсутній металевий порошок або частинки, а вміст баритів збільшено до 18 мас.%. Коефіцієнт тертя складу К аналогічний до складу Е, що не містить азбесту, а швидкість зносу за 500 °С гірша, ніж швидкість зносу складів Е і А. Таким чином, встановлено, що склад К практично не витримує підвищених навантажень.

Для встановлення оптимального відсоткового вмісту порошку вугілля або графіту в складі Е виключили барити та відповідно збільшили вміст вугільних частинок, у результаті чого був отриманий склад Л. Оскільки швидкість зносу при високій температурі складу Е практично стабільна в діапазоні 200–400 °С, склад Е можна модифікувати шляхом зменшення вмісту мінерального волокна за подальшого збільшення вмісту вугільних частинок і за умови збереження постійного вмісту в об'ємних відсотках решти складників, унаслідок чого було отримано склад М. Коефіцієнт тертя складу М вищий за коефіцієнт тертя вихідного складу Е в усьому діапазоні температур, а швидкість зносу в діапазоні температур 100–400 °С практично еквівалентна швидкості зносу складу Л.

Оскільки мідні сплави доступніші та дешевші, ніж чиста мідь або оксиди міді, у складі Е використовували частинки мідного сплаву, в результаті чого був отриманий склад Н. Коефіцієнт тертя цього складу практично ідентичний коефіцієнту тертя складу Е, але швидкість зносу гірша у всьому діапазоні температур.

Як видно з експериментальних даних, розроблені фрикційні матеріали мають різною мірою підвищені коефіцієнт тертя і зносостійкість.

Висновки. Таким чином, проведені дослідження засвідчили складну залежність між складом еластомірних фрикційних композицій та їх механічними властивостями. Було встановлено складний зв'язок між вмістом мінеральних модифікаторів, оксидів металів і частинок вугілля (графіту) та зносостійкістю виробів. За результатами випробувань можна рекомендувати такий усереднений склад композицій, мас.%:

– фенолформальдегідна смола – 9–13;
– волокнистий наповнювач – 26–33;
– металовмісна сполука (оксиди міді, заліза або цинку) – 5–21;
– органічний модифікатор – 2–6;
– фрикційний модифікатор – 19–33;
– неорганічний модифікатор – решта.

Оптимальний склад композиції має бути підібраний для кожного окремого випадку індивідуально, з урахуванням розумного компромісу між цільовими показниками експлуатаційних властивостей виробів.

Список літератури:

1. Wang R. et al. Evaluation of fine wear particles emission from styrene-butadiene rubber reinforced with aligned carbon nanotubes: A study based on unit wear mass analysis. *Wear*. 2025. V. 562. P. 205624. https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205624

2. Zhang M. et al. Pilot analysis of tire tread characteristics and associated tire-wear particles in vehicles produced across distinct time periods. *Science of the Total Environment*. 2024. V. 932. P. 172760. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172760

3. Noh H. J., Jang H. Friction instability induced by iron and iron oxides on friction material surface. *Wear*. 2018. V. 400. Pp. 93–99. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.025

4. Mukhopadhyay R., Sengupta R., Gupta S. D. Recent Advances in Eco-Friendly Elastomer Technology. *Current Topics in Elastomers Research*. 2008. Pp. 1021–1041.

5. Khafidh M. et al. A study on characteristics of brake pad composite materials by varying the composition of epoxy, rice husk, Al_2O_3, and Fe_2O_3. *Automotive Experiences*. 2023. V. 6. №. 2. Pp. 303–319. https://doi.org/10.31603/ae.9121

6. Nie X. et al. Advancement of plasma electrolytic oxidation towards non-valve metals. *Surface and Coatings Technology*. 2022. V. 442. P. 128403. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128403

7. Briscoe B. J., Sinha S. K. Tribology of polymeric solids and their composites. *Wear–materials, mechanisms and practice*. 2005. Pp. 223–267.

8. Saha D., Sharma D., Satapathy B.K. Challenges pertaining to particulate matter emission of toxic formulations and prospects on using green ingredients for sustainable eco-friendly automotive brake composites. *Sustainable Materials and Technologies*. 2023. V. 37. P. e00680. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00680

9. Barton D. C., Fieldhouse J. D. Noise, vibration and harshness (NVH). *Automotive chassis engineering*. 2024. Pp. 299–360. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57526-6_6

10. Ghani S. N., Alithari A. S., Hasan H. S. A review: Enhancing tribological properties of journal bearings composite materials. *Open Engineering*. 2024. V. 14. №. 1. P. 20240047. https://doi.org/10.1515/eng-2024-0047.

11. Huang X. et al. Advanced composite materials for structure strengthening and resilience improvement. *Buildings*. 2023. V. 13. №. 10. P. 2406. https://doi.org/10.3390/buildings13102406

12. Virmani K. et al. Nanomaterials for automotive outer panel components: a review. *The European Physical Journal Plus*. 2021. V. 136. №. 9. P. 921. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01931-w

13. Briscoe B. J., Sinha S. K. Tribological applications of polymers and their composites: Past, present and future prospects. *Tribology and Interface Engineering Series*. 2008. V. 55. Pp. 1–14. https://doi.org/10.1016/S1572-3364(08)55001-4

14. Agarwal J. et al. Progress of novel techniques for lightweight automobile applications through innovative eco-friendly composite materials: a review. *Journal of thermoplastic composite materials*. 2020. V. 33. №. 7. Pp. 978–1013. https://doi.org/10.1177/0892705718815530

15. Zagurskiy A. Technical overview of the main types, designs, and materials of brake pads for mobile agricultural machinery. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. V. 4. №. 20. Pp. 119-130. https://doi.org/10.31548/dopovidi/3.2024.119

Shokhin M. V., Gulyayev V. M., Kovalenko A. L. STUDYING THE REGULARITIES OF SYNTHESIS OF FRICTION PRODUCTS BASED ON ELASTOMERIC MATERIALS AND WAYS TO INCREASE THEIR WEAR RESISTANCE

The study of the regularities of the synthesis and properties of elastomeric materials modified with metals is a topical area in modern polymer chemistry, particularly in the field of friction materials. Today, most research is focused on the development of products using the technology of elastomeric material curing in a modifier environment. Therefore, the use of highly dispersed particles of metals or their oxides as modifiers and fillers of elastomeric matrices will allow the development of a new group of heat-resistant materials capable of withstanding significant mechanical loads over a wide temperature range (up to 500 °C). In this study, several methods for improving the mechanical properties (friction coefficient and wear resistance) of products made of elastomeric materials intended for use in vehicle braking systems were considered. In particular, the influence of the component composition of the 12 compositions for the synthesis of products (brake pads) on their wear resistance under conditions as close as possible to real operating conditions in the temperature range of 100–500 °C was studied. The compositions consisted of phenol-formaldehyde resin, fiber filler, metal-containing compounds from the group Fe, Zn, Cu, Fe_2O_3, ZnO, CuO, *and organic and inorganic modifiers. Asbestos or a mixture of mineral fibers was used as a fiber filler, a substance from the group of rubber, latex, or a mixture thereof as an organic modifier, a substance from the group of barites, chalk, or a mixture thereof as an inorganic modifier, and coal particles or graphite powder. Complex dependencies between the component composition and their mechanical characteristics (wear rate, noise, and friction resistance) have been established, and their optimized average composition has been proposed, which provides acceptable performance indicators for products made from them. The recommendations provided in this study will allow us to establish a technology for the production of brake devices with enhanced tribological properties to ensure the reliability of vehicle operation.*

Key words: *elastomer, friction material, modifier, friction coefficient, wear resistance.*

Відомості про авторів

Абрамова А. О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Андріянова М. В. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри технологій природних та синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Барабаш О. В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

Барабаш О. В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного транспортного університету

Бегліцов С. В. – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії Навчально-наукового інституту інформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Бельдій В. І. – магістр кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бешлей Г. В. – доктор філософії, доцентка кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Бешлей М. І. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Бойко О. В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бондаренко С. Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бризгалов М. В. – студент 5 курсу групи 5151м кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Бунке О. С. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Василенко О. О. – аспірант Інституту кібернетики Національної академії наук України

Вовченко Д. С. – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воловецький О. О. – аспірант кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету

Галаган Р. М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гладка О. М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій та економічної кібернетики Національного університету водного господарства та природокористування

Головенко В. О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Голубєв Л. П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Горбань Г. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Григорчук Г. В. – доктор філософії, доцент, доцент кафедри фізико-математичних наук Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Григорчук Л. І. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Гуйда О. Г. – кандидат наук з державного управління, професор, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

Гуляєв В. М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Дичка А. І. – кандидат технічних наук, асистент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дичко А. О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

Дутка Х. Б. – студентка кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Єремєєв І. С. – доктор технічних наук, професор Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

Єфімова В. Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Єщенко М. С. – аспірант кафедри інформатики Національного університету «Києво-Могилянська академія»

Залевський С. В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Іщенко О. В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри промислової фармації Київського національного університету технологій та дизайну

Камінський С. С. – студент 6 курсу групи 6151м кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Карпович І. М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій та економічної кібернетики Національного університету водного господарства та природокористування

Касянчук І. П. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Качан Р. В. – кандидат технічних наук, доцент Київського національного університету технологій та дизайну

Качоровська О. П. – старший викладач кафедри загальної та неорганічної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кисельов В. Б. – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

Коваленко А. Л. – кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Коваль Д. С. – магістр з дипломом кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Кожура О. В. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри неорганічних речовин та екології Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Концевой А. Л. – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Концевой С. А. – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Копійка О. В. – доктор технічних наук, професор, директор Інституту прикладних систем управління Національної академії наук України

Корнієнко Б. Я. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Костенко Є. Г. – студент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кравченко О. В. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Кучинська Д. А. – аспірантка кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження, завідувачка лабораторії кафедри промислової фармації Київського національного університету технологій та дизайну

Ладієва Л. Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Латанська Л. О. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Лебедєв А. В. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Легеза В. П. – доктор технічних наук, професор, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Макарова Л. М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Мацько П. І. – ад'юнкт кафедри хімічного, біологічного радіологічного ядерного захисту та цивільної безпеки Інституту логістики та підтримки військ (сил) Національного університету оборони України

Медведєв М. Г. – доктор технічних наук, професор кафедри інженерних систем і технологій Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

Мінаєва Ю. Ю. – старший викладач кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

Мітіна Н. Б. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

Мовчан К. О. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Момот А. С. – доктор філософії, старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Морщ Є. В. – доктор технічних наук, завідувач відділу науково-технічної експертизи Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації

Мохно В. О. – здобувач вищої освіти кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Муравйов О. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Наконечний М. В. – студент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нещадим О. М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Новіков П. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Обушенко Т. І. – старший викладач кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Олещенко Л. М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Павлів А. І. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Павлов В. Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Павловський О. М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пелипенко Н. С. – магістр кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петришин Р. І. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Петров С. В. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту газу Національної академії наук України

Пилипенко Т. М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Платов І. М. – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Поліщук Б. В. – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності Українського державного університету науки і технологій навчально наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет»

Приходько Д. М. – магістр з дипломом кафедри вагонів та вагонного господарства Навчально-наукового інституту «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» Українського державного університету науки і технологій

Пшеничний О. Ю. – аспірант кафедри електромеханічних систем автоматизації та електропривод Національного університету «Запорізька політехніка»

Рагулін С. В. – кандидат технічних наук, доцент Херсонського державного аграрно-економічного університету

Раленко В. С. – викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Ремез Н. С. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ромащенко Р. А. – бізнес-консультант компанії Рінвік

Рошанпур Ш. – Плазма Дайнамікс ТОВ в Італії

Савченко І. О. – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління імені професора А. П. Ладанюка Національного університету харчових технологій

Савчук В. С. – асистент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Саган А. О. – здобувач кафедри комп'ютерних інформаційних технологій Навчально-наукового інституту муніципального управління і міського господарства Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

Сазонов А. Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сангінова О. В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Свинчук О. В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

Семенчук І. М. – студент 6 курсу групи 6151м кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Сех О. Б. – магістрант спеціальності «Інформаційні системи та технології» Навчально-наукового інституту кібернетики, інформаційних технологій та інженерії Національного університету водного господарства та природокористування

Стеренчук С. М. – аспірантка кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження Київського національного університету технологій та дизайну

Стоєв Є. Д. – викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Тарасенко Я. В. – кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

Тесленко О. І. – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

Толстопалова Н. М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Федорова Н. В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Федорович В. І. – аспірант кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління Західноукраїнського національного університету

Фісун М. Т. – доктор технічних наук, професор інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Храбатин Р. І. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Цибуля Є. О. – аспірант кафедри неорганічних речовин та екології Українського державного хіміко-технологічного університету

Цяпа С. М. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Чумаченко С. М. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту авіації Міністерства оборони України

Шаповал В. П. – аспірант кафедри інформаційних технологій проектування Черкаського державного технологічного університету

Шахновський А. М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шекета В. І. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Шерстюк І. О. – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шокота М. Ю. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Шохін М. В. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Шуклін Г. В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»

Ясногор М. В. – магістр кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій

НОТАТКИ

Науковий журнал

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 2 2025

Частина 2

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Т. Клименко*

Адреса редакції:
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33
Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua
Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60 × 84/8. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 30,96. Ум. друк. арк. 39,06. Зам. № 0525/382
Підписано до друку 21.02.2025. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.