

**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 31 (70) № 4 2020



Видавничий дім
«Гельветика»
2020

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 інженерної екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

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 загальноінженерних 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.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 11 від 25.08.2020 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідчення про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1)

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, 2020

ЗМІСТ

МАШИНОЗНАВСТВО

Поліщук М.М., Ткач М.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДУЛЯ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ПІДНІМАЛЬНОЇ СИЛИ МОБІЛЬНОГО РОБОТА
ДОВІЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ..... 1

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Залюбовский М.Г., Панасюк И.В., Малышев В.В.

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МЕХАНИЗМА БЕЗ ИЗБЫТОЧНОЙ
СВЯЗИ ГАЛТОВОЧНОЙ МАШИНЫ..... 12

ПРИЛАДИ

Черепанська І.Ю., Безвесільна О.М., Сазонов А.Ю., Бродський Ю.Б., Прядко В.А.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОХИБКИ ПРЕЦИЗІЙНОЇ
ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ..... 18

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Михалевський Д.В.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ
КАНАЛІВ СТАНДАРТУ 802.11
НА ОСНОВІ КВАДРАТИЧНОЇ ФУНКЦІЇ..... 25

Новіков В.І., Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Гуйда О.Г.

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ АЛГОРИТМУ ЦИФРОВОГО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ В САЛОНІ МОБІЛЬНОГО ЦЕНТРУ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
ЛІТАЮЧОЇ (ПОВІТРЯНОЇ) СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ..... 31

Семенець Д.А., Васильчук Д.П., Кобилянський Б.Б., Романуша В.О.

ВИКОРИСТАННЯ МАТРИЧНО-ОПЕРАТОРНОГО МЕТОДУ
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОВЩИННО-ЗСУВНИХ КОЛИВАНЬ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ..... 38

Ушкаренко А.О.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ПОДСИСТЕМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ..... 47

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Бабіч В.Ф.

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ ДИСКРЕТНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЛАНЦЮГА
ЗА ДІЇ ВИПАДКОВИХ ЗБУРЕНЬ..... 55

Вакалюк Т.А., Болотіна В.В., Чижмотря О.Г., Чижмотря О.В., Генвальдт А.С.

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ FREELANCE БІРЖІ..... 64

Глухова Н.В.

ВИЯВЛЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ОЗНАК ЗОБРАЖЕНЬ
НА БАЗІ АНАЛІЗУ ГІСТОГРАМ ЯСКРАВОСТІ..... 75

Дубко В.О.

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ З ВИПАДКОВОЮ СТРУКТУРОЮ
ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДИКАТОРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ..... 81

Клябіна Т.М., Беглов К.В. ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МІНІБАРАМИ.....	87
Левкін Д.А. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....	93
Мещеряков Д.В. НЕЧИСЛОВАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ В ИНФРАКРАСНОЙ СИСТЕМЕ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ.....	98
Oleshchenko L.M., Lysenko O.O. SOFTWARE METHOD FOR CLUSTERING SOFTWARE TESTING REPORTS USING KNN ALGORITHM.....	106
Поперешняк С.В. ЗАСІБ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ БІТОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ НА ВИПАДКОВІСТЬ.....	112
Савчук Т.О., Ваховський В.М. УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ ФОНДОВОГО РИНКУ АКЦІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	121
Хома Ю.В., Микитин І.П., Артемук С.І., Бридіньський В.А. НЕЙРОКОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ПЛАТФОРМИ OPEN VSI ТА ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	127

ЕНЕРГЕТИКА

Беляновська О.А., Пустовой Г.М., Суха І.В., Скляренко О.І., Сухий М.П., Губинський М.В., Сухий К.М. ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АДСОРБЦІЙНОГО ХОЛОДИЛЬНОГО МОДУЛЯ ПАРОВОЇ КОМПРЕСІЙНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ.....	136
Гулей О.Б. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО ВУГІЛЛЯ УКРАЇНСЬКОГО ВИДОБУТКУ ДЛЯ ПАРОКИСНЕВОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ В СТАЦІОНАРНОМУ ШАРІ.....	141
Назарова І.О. ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БІОПАЛИВНИХ КОТЕЛЕНЬ.....	149
Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Грановська О.О., Мороз О.С., Старченко О.С. ВПЛИВ РІЗНОЙМЕННОЇ ЗАКРУТКИ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ НА МЕЖІ СТАЛОЇ РОБОТИ СТАБІЛІЗАТОРНОГО ПАЛЬНИКА ПРИ МІКРОДИФУЗІЙНОМУ СПАЛЮВАННІ ГАЗУ.....	155

МЕТАЛУРГІЯ

Тарасов В.К., Воденнікова О.С., Румянцев В.Р., Воденнікова Л.В., Бабошко Д.Ю. ПОШУК ШЛЯХІВ ПОКРАЩЕННЯ УМОВ ПРАЦІ В ЦЕХАХ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ.....	162
--	-----

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Іваненко О.І., Гомеля М.Д., Панов Є.М. РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЗІ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ МОНООКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПЕЧЕЙ ВИПАЛЮВАННЯ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОДІВ.....	170
--	-----

Казмиренко Ю.О., Дрозд О.В., Жарський Є.В. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПЕРЕРОБКИ КРИШТАЛЕВОГО СКЛА НА ПОРОШОК.....	180
---	-----

Фролова Л.А. ОПТИМІЗАЦІЯ УМОВ ФОТОКАТАЛІТИЧНОГО ОКИСЛЕННЯ 4-НІТРОФЕНОЛУ.....	186
---	-----

Шишкин А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИЦЕЛЛООБРАЗУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ СМЕСЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ РЕАКЦИОННОГО ПОРОШКОВОГО БЕТОНА.....	191
--	-----

Шишкина А.А. ПОРИСТЫЕ РЕАКЦИОННЫЕ ПОРОШКОВЫЕ БЕТОНЫ.....	196
--	-----

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Безусов А.Т., Палвашова Г.І., Доценко Н.В., Афанасьєва Т.М. ВИКОРИСТАННЯ МОЛОЧНОКИСЛИХ БАКТЕРІЙ У БІОТЕХНОЛОГІЇ КВАШЕНОЇ КАПУСТИ.....	201
--	-----

Воєвода Н.В., Легутенко А.С. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ІКРИ ОЗДОРОВЧОГО СПРЯМУВАННЯ З ГАРБУЗОМ.....	208
---	-----

Чижевська Л.А., Польовик В.В., Корецька І.Л. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СУПІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ.....	213
---	-----

ТРАНСПОРТ

Жук М.М., Півторак Г.В., Гіць І.І., Козак М.М. ПРОГНОЗУВАННЯ ВИБОРУ ВИДУ ТРАНСПОРТУ У РАЗІ МІСЬКИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ НА ОСНОВІ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ ДЕРЕВ РІШЕНЬ.....	221
--	-----

Кірсанова В.В., Биковець Н.П., Чумаченко М.Н., Бражник І.Д. НАФТОШЛАМ СУДНОПЛАВСТВА ЯК ЕЛЕМЕНТ БІОДЕГРАДАЦІЇ НАФТОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ СВІТОВОГО ОКЕАНУ.....	227
---	-----

Кухтик Н.О. УТОЧНЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ АВТОМОБІЛЯ З УРАХУВАННЯМ ПРОГРІВАННЯ ДВИГУНА В ПРОЦЕСІ РУХУ.....	233
--	-----

Табуненко В.О., Марценяк О.П., Кужелович В.І. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАТРУЛЮВАННЯ В ЗОНІ РОЗВЕДЕННЯ ВІЙСЬК ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ.....	239
--	-----

БУДІВНИЦТВО

Василишин В.Я. БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ – ВАЖЛИВИЙ СКЛАДНИК ДИЗАЙНУ В СУЧАСНОМУ БУДІВНИЦТВІ.....	245
---	-----

Василишин Я.В. НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕСТЕТИЧНОГО УПОРЯДКУВАННЯ АРХІТЕКТУРНО-ЛАНДШАФТНОГО СЕРЕДОВИЩА.....	250
---	-----

Орлова О.М. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ДВОТАВРОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ НОРМАЛЬНИМИ ТРІЩИНАМИ ПРИ КРУЧЕННІ.....	255
---	-----

ГЕОДЕЗІЯ

Liu Chang, Mamonov K.A., Kondratyuk I.V., Kanivets O.M.

GEOINFORMATION SYSTEMS: FEATURES OF REALIZATION
OF THE EDUCATIONAL PROGRAM OF PREPARATION OF MASTERS.....260

Русіна Н.Г., Люльчик В.О., Кийко Н.М., Кушнірук О.М., Рудько О.М.

ЩОДО ПИТАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
3D КАДАСТРУ НЕРУХОМОСТІ: ЗАРУБІЖНИЙ ДОСВІД.....267

Савчук Л.В., Доскіч С.В.

РЕВІТАЛІЗАЦІЯ ТЕРИТОРІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ЯЗІВСЬКОГО
ТА НЕМИРІВСЬКОГО РОДОВИЩ СІРЧАНИХ РУД.....273

ЕЛЕКТРОНІКА

Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ
НА ОСНОВІ ТУНЕЛЬНО-РЕЗОНАНСНОГО ДІОДА.....279

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....287

CONTENTS

MACHINE SCIENCE

Polishchuk M.M., Tkach M.M.

STUDY OF AERODYNAMIC LIFT MODULE FOR A MOBILE ROBOT
OF ARBITRARY ORIENTATION.....1

INDUSTRIAL ENGINEERING

Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Malyshev V.V.

STRUCTURAL SYNTHESIS AND ANALYSIS OF A SPATIAL MECHANISM
WITHOUT EXCESSIVE COMMUNICATION OF A TURNING MACHINE.....12

EQUIPMENT

Cherepanska I.Yu., Bezvesilna O.M., Sazonov A.Yu., Brodskiy Yu.B., Priadko V.A.

MATHEMATICAL MODEL OF ERROR OF A PRECISION INSTRUMENTAL ANGLE
MEASUREMENT SYSTEM18

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Mykhalevskiy D.V.

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ASSESSING THE EFFECTIVE DATA RATE
FOR CHANNELS OF STANDARD 802.11 BASIS ON A QUADRATIC FUNCTION25

Novikov V.I., Lysenko O.I., Tachinina O.M., Guida O.H.

METHODS OF SYNTHESIS
ALGORITHM DIGITAL AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL AIR
IN THE CABIN MOBILE DATA PROCESSING CENTER FLYING (AIR) SENSOR NETWORKS31

Semenets D.A., Vasylichuk D.P., Kobylanskyi B.B., Romanusha V.O.

USE OF THE MATRIX-OPERATOR METHOD FOR RESEARCH
OF THICKNESS-SHEAR OSCILLATIONS OF QUARTZ RESONATORS38

Ushkarenko A.O.

USING OF MULTILEVEL DECOMPOSITION IN THE DEVELOPMENT
OF GRAPHO-ANALYTICAL MODELS OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING SUBSYSTEMS47

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Babich V.F.

DETERMINATION OF DYNAMIC PRECISION DISCRETE MEASURING CIRCUIT
UNDER THE ACTION OF RANDOM PERTURBATIONS55

Vakaliuk T.A., Bolotina V.V., Chyzhmotria O.G., Chyzhmotria O.V., Henvaldt A.S.

DEVELOPMENT OF A FREELANCE EXCHANGE INFORMATION SYSTEM64

Glukhova N.V.

DETECTION OF INFORMATIVE SIGNS OF IMAGES
ON THE BASIS OF ANALYSIS HISTOGRAMS OF BRIGHTNESS.....75

Doobko V.A.

SIMULATION OF SYSTEMS WITH A RANDOM STRUCTURE USING
INDICATORS OF RANDOM PROCESSES81

Kliabina T.M., Beglov K.V.

RESEARCH OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM
OF THE MINI-BARS87

Levkin D.A. METHODOLOGY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES RESEARCH	93
Mescheryakov D.V. NON-NUMERICAL STATISTICAL DATA PROCESSING IN A SYSTEM WITH BIOLOGICAL FEEDBACK	98
Oleshchenko L.M., Lysenko O.O. SOFTWARE METHOD FOR CLUSTERING SOFTWARE TESTING REPORTS USING KNN ALGORITHM.....	106
Popereshnyak S.V. SOFTWARE FOR TESTING BIT SEQUENCES FOR RANDOMNESS	112
Savchuk T.O., Vakhovskiy V.M. IMPROVEMENT OF THE METHOD OF ANALYSIS OF THE STOCK MARKET OF SHARES	121
Khoma Yu.V., Mykityn I.P., Artemuk S.I., Brydinskyi V.A. NEUROCOMPUTER CONTROL SYSTEM BASED ON OPEN BCI PLATFORM AND DEEP NEURAL NETWORKS.....	127

POWER ENGINEERING

Belyanovskaya E.A., Pustovoy G.N., Sukha I.V., Sklyarenko A.I., Sukhyi M.P., Gubinskyi M.V., Sukhyi K.M. OPERATING PARAMETERS OF ADSORPTIVE CHILLING UNIT OF VAPOR COMPRESSION MACHINE	136
Huley O.B. SELECTION OF OPTIMAL COAL OF UKRAINIAN PRODUCTION FOR PAROKISENE GASIFICATION IN A STATIONARY LAYER.....	141
Nazarova I.O. INCREASING ENERGY AND ECOLOGICAL EFFICIENCY OF BIOFUEL BOILERS.....	149
Chernousenko O.Yu., Butovsky L.S., Hranovska O.O., Moroz O.S., Starchenko O.S. THE INFLUENCE OF DIFFERENTLY TWISTED AIR FLOWS ON THE BOUNDARYS OF THE OPERATION OF A STABILIZER BURNER DURING MICRODIFFUSION GAS COMBUSTION	155

METALLURGY

Tarasov V.K., Vodennikova O.S., Rumyantsev V.R., Vodennikova L.V., Babochko D.Yu. SEARCH FOR WAYS IN ORDER TO IMPROVE WORKING CONDITIONS IN COLD ROLLING SHOPS	162
---	-----

CHEMICAL TECHNOLOGY

Ivanenko O.I., Gomelya N.D., Panov Ye.M. DEVELOPMENT OF MEASURES TO REDUCE CARBON MONOXIDE EMISSIONS FROM THE FLUE GASES OF KILNS IN THE PRODUCTION OF ELECTRODES	170
Kazymyrenko Yu.O., Drozd O.V., Zharskiy Ye.V. TECHNOLOGICAL FEATURES AND PHYSICOCHEMICAL PROCESSES OF PROCESSING OF CRYSTAL GLASSES TO POWDER	180

Frolova L.A. OPTIMIZATION OF CONDITIONS FOR THE PHOTOCATALYTIC OXIDATION OF 4-NITROPHENOL	186
Shyshkin A.A. RESEARCH OF THE INFLUENCE OF MICELLO-FORMING SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES AND THEIR MIXTURES ON THE STRENGTH OF REACTIVE POWDER CONCRETE	191
Shyshkina A.A. POROUS REACTIVE POWDER CONCRETE	196

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

Bezusov A.T., Palvashova H.I., Dotsenko N.V., Afanasieva T.M. USE OF LACTIC ACID BACTERIA IN THE PRODUCTION OF SAUERKRAUT	201
Voievoda N.V., Legutenko A.S. OPTIMIZATION OF PRODUCTION TECHNOLOGY OF HEALTH ORIENTATION CAVIAR WITH PUMPKIN	208
Chyzhevsjka L.A., Polovyk V.V., Koretska I.L. IMPROVING THE TECHNOLOGY OF SOUPS WITH THE USE OF VEGETABLE RAW MATERIALS	213

TRANSPORT

Zhuk M.M., Pivtorak H.V., Gits I.I., Kozak M.M. FORECASTING THE MODE CHOICE OF TRANSPORT FOR URBAN MOVEMENTS USING CLASSIFICATION DECISION TREES	221
Kirsanova V.V., Bykovets N.P., Chumachenko M.N., Brazhnik I.D. SHIP OIL SLUDGE AS AN ELEMENT OF BIODEGRADATION OF OIL POLLUTION OF THE WORLD OCEAN	227
Kukhtyk N.O. SPECIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE VEHICLE MOVEMENT TAKING INTO ACCOUNT HEATING OF THE ENGINE IN THE PROCESS OF MOVEMENT	233
Tabunenko V.O., Martsenyak O.P., Kuzhelovich V.I. ANALYSIS OF PATROL EFFICIENCY IN THE TROUBLE BREEDING ZONE USING VEHICLES	239

CONSTRUCTION

Vasylyshyn V.Ya. BUILDING MATERIALS – AN IMPORTANT COMPONENT OF DESIGN IN MODERN BUILDING	245
Vasylyshyn Ia.V. DIRECTIONS OF RESEARCH OF AESTHETIC ORDERING OF ARCHITECTURAL AND LANDSCAPE ENVIRONMENT	250
Orlova O.M. THE EXPERIMENTAL RESEARCHES OF REINFORCED CONCRETE I-BEAM ELEMENTS WITH NORMAL CRACKS WHEN TURNING	255

GEODESY

Liu Chang, Mamonov K.A., Kondratyuk I.V., Kanivets O.M. GEOINFORMATION SYSTEMS: FEATURES OF REALIZATION OF THE EDUCATIONAL PROGRAM OF PREPARATION OF MASTERS.....	260
Rusina N.H., Liulchyk V.O., Kyiko N.M., Kushniruk O.M., Rudko O.M. ON THE ISSUE OF SOFTWARE 3D REAL ESTATE CADASTRE: FOREIGN EXPERIENCE.....	267
Savchuk L.V., Doskich S.V. TERRITORY REVITALIZATION OF THE SPENT YAZIVSKY AND NEMYRIVSKY SULFUR ORE DEPOSITS	273

ELECTRONICS

Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk Ya.A. INVESTIGATION OF THE GENERATOR ELECTRICAL FLUCTUATIONS ON THE BASIS OF A RESONANT TUNNELING DIODE	279
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	287

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.865.8(031)

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/01>

Поліщук М.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ткач М.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДУЛЯ АЕРОДИНАМІЧНОЇ ПІДНІМАЛЬНОЇ СИЛИ МОБІЛЬНОГО РОБОТА ДОВІЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ

Мобільні роботи вертикального переміщення, відомі в закордонних публікаціях під назвою Climber Robot (альпіністський робот), є порівняно новим засобом мобільної робототехніки, здатним виконувати виробничі завдання на поверхнях довільної орієнтації в технологічному просторі. Такі роботи призначені для виконання різноманітних операцій в екстремальних умовах виробництва, в тому числі й техногенних катастроф, при одночасному подоланні гравітаційного навантаження. Закордонні експериментальні дослідження зазначених роботів присвячені переважно створенню підсистем зчеплення робота з поверхнею переміщення, які є невід'ємною частиною мобільних роботів довільної орієнтації в просторі.

Дані дослідження містять результати експериментальної апробації принципово нового підходу протидії гравітаційному навантаженню мобільного робота, а саме доцільності оснащення робота джерелом реактивної тяги нехімічного походження. Як таке джерело запропонований пневматичний генератор аеродинамічної піднімальної сили, що частково компенсує або повністю долає гравітаційне навантаження, не допускаючи при цьому перетворення мобільного робота на літальний апарат, щоб забезпечити виконання контактних силових технологічних операцій у процесі обслуговування різних промислових об'єктів. Інакше кажучи, сила реактивної тяги не має перевищувати сил зчеплення мобільного робота з поверхнею переміщення. Крім того, запропонована стаття містить експериментальне розв'язання задачі знаходження квазіоптимальних значень аеродинамічної піднімальної сили залежно від параметрів генератора реактивної тяги. Наведені методика й опис постановки повнофакторного експерименту з варіюванням незалежних факторів на двох екстремальних рівнях. Зрештою, застосування аеродинамічної піднімальної сили як засобу протидії гравітаційному навантаженню сприяє підвищенню надійності утримання мобільних роботів на поверхні переміщення довільної орієнтації в технологічному просторі.

Ключові слова: мобільні роботи, крокуючі механізми, роботи вертикального переміщення, аеродинамічна сила.

Постановка проблеми. Для дослідження режимів роботи модуля аеродинамічної піднімальної сили мобільного робота необхідна постановка екстремального повнофакторного експерименту (ПФЕ), який дасть змогу не тільки апробувати доцільність застосування пневматичної реактивної тяги для мобільних роботів, але й здійснити пошук оптимальних або, коректніше буде помітити, квазіоптимальних значень факторів, що визначають ефективність роботи пневматичного генератора тяги. У зв'язку з відсутністю подібних досліджень у цій галузі спочатку сформульоване

завдання постановки ПФЕ далі описана методика експерименту й виконані дисперсійний і регресійний аналізи отриманих експериментальних даних, включаючи перевірку отриманої регресійної моделі на адекватність реальному процесу. Виконане дослідження регресійної та аналітичної моделей генератора аеродинамічної піднімальної сили для мобільних роботів довільної орієнтації в просторі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як зазначено вище, майже всі дослідження в галузі створення мобільних роботів довільної орієнтації

присвячені вдосконаленню пристроїв зчеплення робота з поверхнею переміщення. Така спрямованість виправдана тим, що підсистеми зчеплення є визначальним чинником утримання мобільного робота на поверхні переміщення в технологічному просторі. Так, наприклад, в роботі “A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion” [1, с. 4–11] запропоновані різноманітні засоби зчеплення мобільних роботів із поверхнею переміщення, що долають гравітаційне навантаження для гарантованого втримання робота на довільно орієнтованій поверхні переміщення. Наведені технічні рішення передбачають застосування вакуумних, електромагнітних, механічних захватів, а також засобів на основі адгезії, але без прикладів застосування аеродинамічної піднімальної сили.

Система утримання робота на поверхні переміщення як генератора вакууму запропонована в конструкції робота CCNY Robotics Lab City University New York, що відображена в дослідженнях [2, с. 35]. Автономним генератором вакууму створюється зона пониженого тиску між корпусом робота і поверхнею переміщення, завдяки чому робот і утримується на вказаній поверхні. Відзнакою мобільного робота «Boston Dynamics» є наявність пласко паралельних педипуляторів, оснащених голчастими механічними захватами [3, с. 2], що дають змогу роботу долати гравітаційне навантаження при переміщенні як на поверхнях стін висотних будинків, так і по поверхні стовбурів дерев. Віддаючи належне оригінальності конструкцій наведених моделей, варто зауважити, що роботи з механічним зчепленням [4, с. 25–27] відрізняються підвищеною надійністю, але варто зауважити, що цей вид зчеплення як засіб протидії гравітаційному навантаженню не є інваріантним до різних поверхонь переміщення довільної орієнтації.

Дослідження, присвячені моделюванню динаміки переміщень мобільних роботів [5], спрямовані на зменшення динамічних навантажень, що також сприяє підвищенню надійності утримання мобільного робота на поверхні руху. З цієї точки зору становить інтерес методологічний підхід до моделювання умов зчеплення мобільного робота з поверхнею довільної орієнтації, запропонований у роботі [6, с. 14–18]. Метод заснований на теорії опору матеріалів і передбачає обчислення значень нормальної напруги в зоні контакту, що порівнюється із граничним значенням напруги при розтяганні й стиску поверхні контакту. Ця модель дає змогу контролювати міцність зчеплення ніг

робота з поверхнею переміщення, однак у ній не відображені розв’язки, спрямовані саме на протидію гравітаційному навантаженню на мобільного робота, на відміну від такого засобу, як пневматичний генератор реактивної тяги, що запропонований у роботі «Антигравітаційний мобільний робот Поліщука» [7].

Однак у жодній із розглянутих вище публікацій не проведені експериментальні дослідження щодо застосування реактивної тяги як засобу протидії гравітаційному навантаженню, що для мобільних роботів має принципове значення. Таким чином, задача експериментальної апробації застосування генератора аеродинамічної піднімальної сили для мобільних роботів довільної орієнтації є актуальною.

Постановка завдання. Експериментальна оптимізація параметрів будь-якої технічної системи, в тому числі й такої, як мобільний робот, передбачає наявність конкретного виду математичної моделі цільової функції, що зв’язує критерій оптимізації з керованими факторами досліджуваної системи чи процесу. Стосовно генератора тяги мобільного робота необхідно спочатку встановити вказаний критерій, яким може бути прийнята аеродинамічна піднімальна сила (реактивна тяга), спрямована на компенсацію гравітаційного навантаження з метою підвищення надійності втримання мобільного робота на поверхні довільної орієнтації, а потім, застосовуючи статистичні методи дослідження, встановити зв’язок між критерієм оптимізації – реактивною тягою пневматичного генератора, і незалежними змінними – детермінованими величинами (факторами), яким надають у кожній новій серії дослідів екстремальні значення. Саме тому необхідна постановка повнофакторного експерименту, що передбачає одержання, якщо не оптимальних, то, принаймні, квазіоптимальних значень параметрів генератора тяги для мобільного робота.

Виклад основного матеріалу дослідження. Результати кінематичного й динамічного аналізу мобільного робота із пневматичним генератором реактивної тяги [8, с. 4–8] дали змогу здійснити апріорний аналіз впливу параметрів пневматичного генератора реактивної тяги на аеродинамічну піднімальну силу. Отримані у вказаній роботі аналітичні залежності між реактивною тягою й параметрами генератора є основою керування процесом протидії гравітаційному навантаженню на мобільного робота. Однак зазначені залежності не враховують стохастичного впливу параметрів генератора тяги на величину реактивної

тяги, а головне, як і будь-яка аналітична модель, не можуть служити експериментальною апробацією застосування генератора реактивної тяги для мобільних роботів.

Як відомо, при постановці факторних експериментів функцією відгуку служить неповний квадратичний поліном, який для трьох факторів має вигляд [9, с. 113]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i,j} b_{ij} x_i x_j + b_{1,2,3} x_1 x_2 x_3$$

Число дослідів дорівнює $N = n^k m$, де n – число рівнів варіювання факторів, k – число факторів, m – кількість повторних реалізацій кожного дослідів, виконувана з метою гарної відтворюваності результату дослідів й зменшення дисперсій помилок вимірів. Таким чином, у нашому випадку необхідно провести $N = 2^3 8 = 64$ дослідів.

Крім того, при постановці факторних експериментів необхідно знати, до якого класу формул належить цільова функція. У монографії «Теорія інженерного експеримента» [11] зазначається, що більшість процесів може бути описана двома класами формул. До першого належать формули, в яких залежна змінна є сумою функцій незалежних змінних, а загальне співвідношення другого класу, що допускає застосування факторних експериментів, являє собою добуток окремих функцій незалежних змінних. Причому залежності другого класу можуть бути наведені до першого за допомогою логарифмування як одного з методів лінеаризації функцій. Таким чином, завдання планованого експерименту зводиться до наведеного нижче:

1) застосуванням регресійного аналізу статистичних даних ПФЕ одержати конкретний вид експериментальної моделі функції відгуку, що пов'язує критерій оптимізації (реактивну тягу) з параметрами керування аеродинамічною піднімальною силою мобільного робота;

2) визначити, принаймні, квазістатичні значення параметрів генератора тяги, що зумовлюють максимум цільової функції, або, за термінологією ПФЕ, функції відгуку у факторному просторі.

Найбільш прийнятним науковим інструментом розв'язання вказаної задачі є постановка екстремального ПФЕ, що належить до класу активних експериментів. Цей вид експериментів дає змогу (на відміну від пасивних) за допомогою варіювання факторів на екстремальних рівнях їхніх значень (*min*, *max*) цілеспрямовано впливати на параметр оптимізації, а також завдяки одночасній зміні факторів враховувати їх взаємодію.

Методика експериментальних досліджень, обладнання та техніка вимірювань. Відповідно до поставленої вище задачі, експериментальні дослідження керування процесом створення пневматичної реактивної тяги мобільного робота виконані за такою методикою:

– постановлено повнофакторний експеримент (ПФЕ), у процесі якого здійснювалося варіювання кожного з параметрів генератора тяги на двох екстремальних рівнях (*min*, *max*) з одночасною реєстрацією величин пневматичної реактивної тяги;

– побудована регресійна модель функції відгуку параметра оптимізації й статистична перевірка адекватності отриманої моделі реальному процесу керування генератором тяги;

– визначено напрями пошуку області оптимальності на основі порівняльного аналізу аналітичного й емпіричного моделювання керування процесом створення пневматичної аеродинамічної піднімальної сили мобільного робота;

– виконано чисельний аналіз функції відгуку й визначення координат умовного екстремуму цільової функції.

Для проведення досліджень був створений експериментальний стенд, принципова схема якого показана на рис. 1, а загальний вид на рис. 2. Стенд включає джерело підвищеного тиску (до 8 бар) стисненого повітря у вигляді компресора 1, який через блок підготовки повітря 2 (що включає фільтр, вологопоглинач і регулятор тиску), манометр 3 і пневматичний розподільник 4 створює в камері «А» генератора тяги 5 підвищений тиск, контроль якого здійснюється манометром 6. Стиснене повітря, проходячи через множину сопел 9, створює реактивну тягу, внаслідок чого генератор тяги 5 переміщується в напрямних поступальної кінематичної пари 7, встановленої на нерухливій основі 8. Сила створюваної реактивної тяги вимірюється цифровим динамометром 10.

Створення зовнішнього силового навантаження на генератор тяги 5 здійснювалося безштовковим пневматичним циліндром 11, встановленим на кронштейні 12. Подача стисненого повітря в силовий циліндр відбувалася за допомогою електромагнітного пневматичного розподільника 13, керованого контролером 14. На рис. 2 показаний загальний вид експериментального стенда із пневматичним генератором тяги для мобільного робота. Як видно на фото, джерелом надлишкового тиску в камері генератора тяги 1 служив безолійний поршневий компресор 2 мод. Gentilin CS 240/24 (Італія), що створює тиск до 8 бар, із продуктивністю подачі

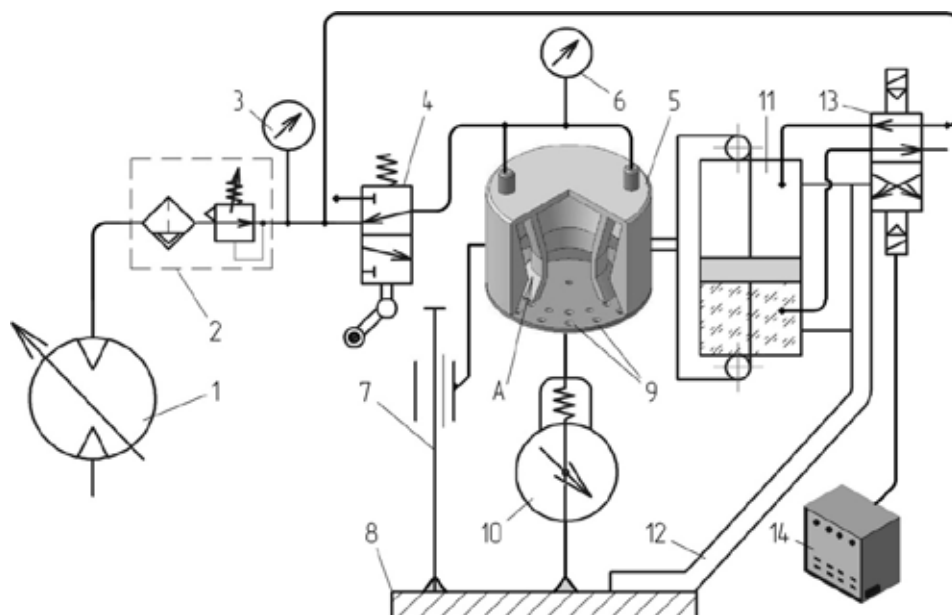


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенда

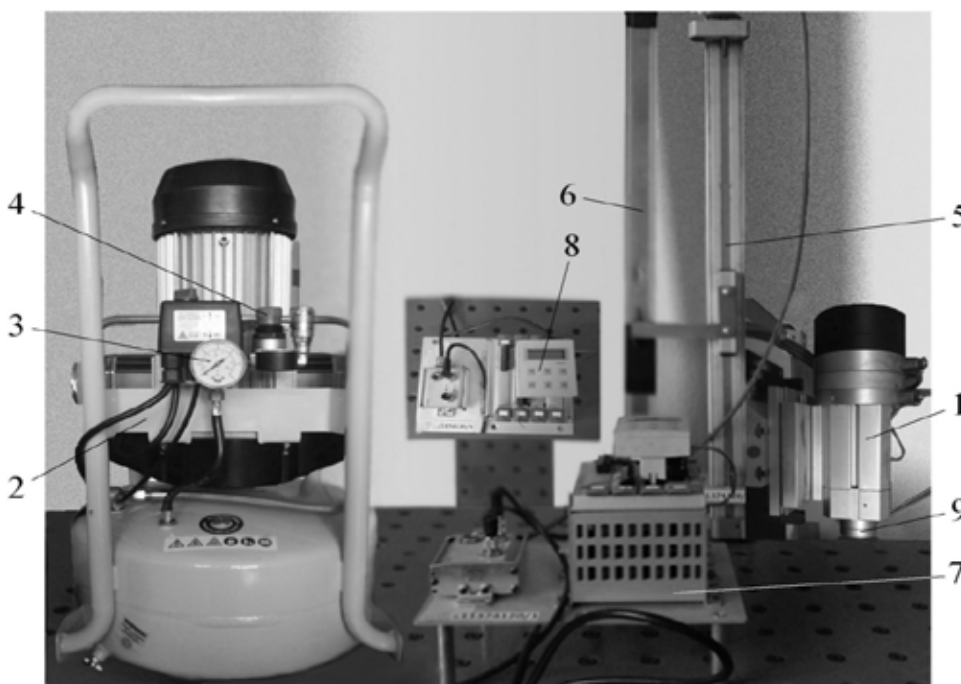


Рис. 2. Експериментальний стенд генератора тяги

стисненого повітря 150 л/хв. Контроль тиску здійснювався манометром 3, а величина тиску задавалася регулятором тиску 4 у діапазоні (2...8) бар.

Зовнішнє навантаження на генератор тяги здійснювалося безштоковим пневматичним циліндром 5 мод. DNT-40-400-PPV, з'єднаним з аналоговим датчиком переміщення 6 і керуванним контролером позионування 7 мод. SPC200

виробництва компанії FESTO з модулем інтерфейсу мод. SPC200-SCU-AIF і панеллю керування 8 мод. SPC200-MMI.

Вимір сили пневматичної тяги здійснювався цифровим динамометром 9 мод. Weiheng WH-A08 із зусиллям до 50 кг (490 Н), що має погрішність виміру ± 5 (г) при зусиллі 0–10 (кг) та ± 10 (г) у діапазоні зусиль 10–45 (кг).

Власне процес створення аеродинамічної піднімальної сили генератором тяги відтворювався при варіюванні таких факторів (незалежних змінних): F – ефективної площі сопів за допомогою зміни числа n отворів сопів і їх діаметрів d при регулюванні тиску p у генераторі тяги й силового навантаження Q на екстремальних рівнях згідно з матрицею планування експерименту, як це показано нижче.

У процесі експерименту від компресора (фото рис. 2) стисле повітря подавалось у генератор тяги 1 (рис. 3), встановлений на кільцях 2 Карданового підвісу, через штуцери 3. У результаті в камері «А» створювалась зона підвищеного тиску в діапазоні 2–8 бар. Стисле повітря, стікаючи через сопла 4 мембран 5, утворювало реактивну тягу. Оскільки умови проведення повнофакторного експерименту передбачають варіювання факторів на екстремальних рівнях, вказані мембрани змінювались (із різним тиском) відповідно до значень діаметрів сопел d_{\min}^{\max} та їх кількості n_{\min}^{\max} , включаючи основний (середній) рівень значень d_s, n_s матриці планування експерименту.

Як гіпотезу, що вимагає надалі підтвердження, на етапі постановки завдання представимо цільову функцію у вигляді добутку

$$R = C_0 f_1(n) f_2(p_j) f_3(d_k) \rightarrow \max, \quad (1)$$

при обмеженнях:

$$\frac{\pi d^2}{4} n_{\min} \leq F_i(d, n) \leq \left(\frac{\pi d^2}{4} n_{\max} \right) \quad (2)$$

$$p_{\min} < p_j \leq p_{\max}$$

$$d_{\min} \leq d_k \leq d_{\max}$$

де R – аеродинамічна реактивна тяга, Н; C_0 – постійний коефіцієнт, що враховує вплив зовнішніх факторів, не відображених у цільовій функції; $f_1(n_i), f_2(p_j), f_3(d_k)$ – факторні залежності (функції змінних), що підлягають визначенню; F – площа поперечного перерізу сопла, зумовлена діаметром d (м) отворів витікання газу і їх кількістю n ; p_j – тиск у соплах генератора тяги, бар.

Перше із зазначених обмежень (2) змінних функції (1) вказує, що кількість сопів для витікання газу варіюється від одного до кількох, становлячи площу їх поперечного перерізу достатньою для створення реактивної піднімальної сили. Друге обмеження продиктоване тим, що міжнародний стандарт для сучасних пневматичних систем передбачає їх роботу в діапазоні тисків $p_i = (1 \dots 10) \cdot 10^5$ Па. Третє обмеження визначає

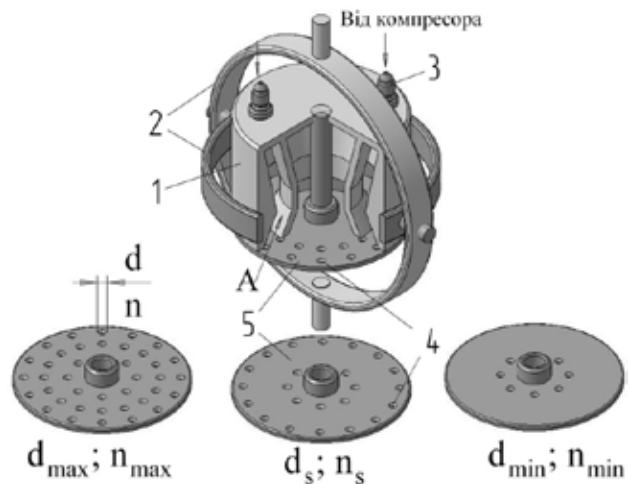


Рис. 3. Пневматичний модуль аеродинамічної сили зі змінними мембранами

необхідний і достатній діапазон зміни діаметру d отворів витікання газу в генераторі тиску.

Відповідно до прийнятих обмежень (2) при постановці повнофакторного експерименту варіювання факторів цільової функції проводилося в таких межах:

$$10 \leq n_i \leq 80;$$

$$(1 \leq p_j \leq 8) \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad (3)$$

$$(0,001 \leq d_k \leq 0,0045) \text{ м},$$

де n_i – кількість сопів; p_j – тиск у соплах діаметром d_k .

Загалом було проведено $N = n^k m = 2^3 8 = 64$ дослідів, де n – число рівнів варіювання факторів (max, min), k – число факторів, m – кількість повторних реалізацій кожного дослідів, виконуваних з метою гарної відтворюваності результату дослідів й зменшення дисперсій помилок вимірів.

При постановці факторних експериментів використовують кодовані значення змінних. Це в значній мірі полегшує не тільки обчислення постійних коефіцієнтів, але й дослідження одержуваної згодом регресійної моделі функції відгуку. Тому перейдемо від системи координат змінних n, p, d у натуральному вимірі (3) до безрозмірної системи координат x_1, x_2, x_3 . Використовуючи формулу [9, с. 117], перетворимо незалежні змінні на безрозмірні змінні:

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i, \max})}{\ln \tilde{x}_{i, \max} - \ln \tilde{x}_{i, \min}} + 1, \quad (4)$$

де \tilde{x}_i – натуральний вимір змінних. Причому в безрозмірній системі координат для моделі ПФЕ типу $n^k = 2^3$ верхній рівень відповідає значенню

фактора +1(max), нижній рівень -1(min), а координати центру плану експерименту рівні й збігаються з початком системи координат.

Результати кодування верхнього й нижнього рівнів варіювання факторів зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Рівні зміни факторів

Рівні факторів	n		p, bar		d, м	
	\tilde{x}_1	$\ln \tilde{x}_1$	\tilde{x}_2	$\ln \tilde{x}_2$	\tilde{x}_3	$\ln \tilde{x}_3$
Верхній +1	80	4,38	8	2,08	0,0045	-5,40
Основний 0	45	-	4,5	-	0,00275	-
Нижній -1	10	2,3	2	0,69	0,001	-6,91

За цією таблицею знаходимо вирази для безрозмірних змінних:

$$x_1 = \frac{2(\ln \tilde{x}_1 - 4,38)}{4,38 - 2,3} + 1 = 0,95 \ln \tilde{x}_1 - 3,19;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln \tilde{x}_2 - 2,08)}{2,08 - 0,69} + 1 = 1,44 \ln \tilde{x}_2 - 1,99; \quad (5)$$

$$x_3 = \frac{2(\ln \tilde{x}_3 + 5,40)}{-5,40 + 6,91} + 1 = 1,32 \ln \tilde{x}_3 + 8,15.$$

Як зазначено вище, модель ПФЕ типу $n^k = 2^3$ представляють у вигляді неповного квадратичного полінома, який запишемо з урахуванням взаємодії факторів і в кодованих змінних

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (6)$$

У табл. 2 показані рівні варіювання незалежних факторів та їх взаємодії, тобто наведена матриця планування ПФЕ, відповідно до якої виконувалося варіювання кожного з факторів: n – кількості отворів сопів, p – тиску в соплах діаметром d на двох екстремальних рівнях +1(max) і -1 (min).

У табл. 3 наведені результати експериментальних досліджень впливу параметрів пневматичного генератора на величину реактивної тяги R . Вертикальні стовпці відображають отримане значення реактивної тяги, відповідне до рівнів варіювання факторів, а горизонтальні рядки містять результати відтворення кожного дослідження. У стовпці \bar{R}_i наведені усереднені значення реактивної тяги, а в табл. 4 наведені їх кодовані значення (логарифми) та дисперсії результатів дослідів.

Отримані дані дають змогу визначити чисельні значення постійних коефіцієнтів у рівнянні (6). Завдяки тому, що ПФЕ належить до ортогональних планів, значно спрощується обчислення коефіцієнтів регресії. Згідно із вказівками [9, с. 113] вони можуть бути визначені як:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{m}, \quad (7)$$

де i – номер дослідження, m – число досліджених точок у плані, y_i – середній відгук по числу повторних дослідів у відповідній точці матриці плану ПФЕ.

Таблиця 2

Матриця планування ПФЕ

№№ точок плану	Фактори та рівні їх варіювання						
	x_0	x_1		x_2		x_3	
	Код	Код	n_i	Код	p_i, bar	Код	$d_i, м$
1	+	+	80	+	8	+	0,0045
2	+	-	10	+	8	+	0,0045
3	+	+	80	-	2	+	0,0045
4	+	-	10	-	2	+	0,0045
5	+	+	80	+	8	-	0,001
6	+	-	10	+	8	-	0,001
7	+	+	80	-	2	-	0,001
8	+	-	10	-	2	-	0,001
Варіювання взаємодії факторів відповідно до точок плану							
x_1x_2		x_1x_3		x_2x_3		$x_1x_2x_3$	
Код							
+		+		+		+	
-		-		+		-	
-		+		-		-	
+		-		-		+	
+		-		-		-	
-		+		-		+	
-		-		+		+	
+		+		+		-	

Таблиця 3

Результати експерименту

№№ точок плану	Реактивна тяга R (при реалізації дослідів $m \rightarrow R_1 \dots R_8$)								Середнє значення
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	\bar{R}_i
1	828	745	806	780	760	802	805	820	793
2	104	93	98	102	96	103	98	97	99
3	216	210	209	212	196	215	212	198	209
4	27	25	26	24	28	24	26	25	26
5	184	178	172	176	180	182	180	178	179
6	23	21	23	24	22	23	20	23	22
7	48	44	45	47	46	47	45	46	46
8	6	5,8	5,5	6	5,4	6	6	5,6	5,8

При $i = 0$ ведеться обчислення коефіцієнта b_0 . При варіюванні кожного фактора на двох рівнях (+1) і (-1) обчислення зводяться до приписування стовпцю y_i знаків (+, -) стовпця відповідного фактора й алгебраїчного додавання отриманих значень.

Таблиця 4

Кодовані значення та дисперсії результатів дослідів

№№ точок плану	Кодовані значення реактивної тяги R_i		Дисперсії
	$\bar{y}_i = \ln \bar{R}_i$	\hat{y}_i	$(\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$
1	6,68	6,68	0,00
2	4,59	4,60	0,0001
3	5,34	5,34	0,00
4	3,26	3,26	0,00
5	5,19	5,18	0,0001
6	3,09	3,10	0,0001
7	3,83	3,84	0,0001
8	1,76	1,76	0,00
$\sum_1^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$			0,0004

Наступне ділення отриманого результату на число досліджених точок ($n=8$) у плані дає шуканий коефіцієнт:

$$b_0 = 4,22; b_1 = 1,04; b_2 = 0,67; b_3 = 0,75;$$

$$b_{12} = 0,005; b_{13} = 0; b_{23} = -0,0025;$$

$$b_{123} = -0,0025.$$

Обчисливши таким чином значення коефіцієнтів і підставивши їх у рівняння (6), одержимо рівняння регресії:

$$y = 4,22 + 1,04x_1 + 0,67x_2 + 0,75x_3 + 0,005x_1x_2 - 0,0025x_2x_3 - 0,0025x_1x_2x_3 \quad (8)$$

Перш ніж використовувати це рівняння як регресійну модель функції відгуку, його, за методикою ПФЕ, необхідно піддати статистичній перевірці, зміст якої викладено нижче.

Статистичний аналіз результатів експерименту. Згідно з вимогами регресійного аналізу необхідно виконати перевірку однорідності дисперсій експериментальних даних табл. 3. Оскільки теоретичні значення дисперсій невідомі, перевірку їх однорідності здійснено на підставі статистичних оцінок отриманого емпіричного матеріалу, для чого визначалась дисперсія i -го дослідів за формулою [9, с. 120]:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_{ik} - \bar{y}_i)^2, \quad i=\bar{1},n; \quad k=\bar{1},m, \quad (9)$$

За результатами розрахунків за формулою (9), які тут для стислості викладення опускаємо, визначено: максимальне значення дисперсій $S_i^2 = 0,0039$; сума всіх дисперсій $\sum_{i=1}^n S_i^2 = 0,0147$ та дисперсія відтворення $S_{m,n}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2 = 0,0018$.

Однорідність дисперсій перевіряємо за критерієм Кочрена як відношення максимальної порядкової дисперсії до суми всіх дисперсій:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2} = \frac{0,0039}{0,0147} = 0,2653, \quad (10)$$

Прийнявши рівень значимості (звичайно $q = 0,05$) і визначивши числа ступенів свободи: $f_1 = m-1 = 7; f_2 = n = 8$, за таблицею [10] додатка знаходимо критичне відношення $G_{kp} = 0,4137$ і порівнюємо його з розрахунковим $G = 0,2653 < G_{kp} = 0,4137$. Результат цього порівняння дає змогу прийняти гіпотезу про однорідність дисперсій, що своєю чергою дає змогу

використати емпіричний матеріал табл. 3 для одержання апроксимуючої моделі функції відгуку.

Перевірку значимості коефіцієнтів рівняння регресії (8) здійснимо за допомогою t – критерію Стюдента. Для цього знаходимо дисперсію помилки визначення коефіцієнтів:

$$S_{b_1}^2 = \frac{1}{mn} S_{mn}^2 = \frac{0,0018}{64} = 0,000028125, \quad (11)$$

$$S_b = 0,0053$$

Далі для кожного коефіцієнта рівняння (8) визначаємо розрахункове значення критерію Стюдента як відношення абсолютного значення коефіцієнта регресії до середнього квадратичного відхилення помилки його визначення:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}; \quad t_0=796; \quad t_1=196; \quad t_2=126; \quad t_3=143;$$

$$t_{12}=0,94; \quad t_{23}=0,47; \quad t_{123}=0,047,$$

де індекси критеріїв відповідають індексам коефіцієнтів рівняння регресії (8).

Для знаходження критичного значення $t_{кр}$ за таблицею П2 додатка [10] визначимо число ступенів свободи $f^* = n(m-1) = 56$ й, прийнявши рівень значимості $q = 0,05$, знаходимо $t_{кр} = 2$. Коефіцієнти регресії значимі за умови, що $t_i > t_{кр}$, а якщо ні, то ухвалюється гіпотеза про рівність генерального коефіцієнта регресії (тобто генеральної сукупності значень факторів). Порівнюючи розрахункові значення t_i – критерію з табличним $t_{кр} = 2$, доходимо висновку про необхідність виключити з рівняння (8) коефіцієнти парної взаємодії факторів x_{12} , x_{23} і потрійної взаємодії x_{123} як статистично незначущі. Необхідність перерахування інших коефіцієнтів відсутня, тому що при ортогональному плануванні ПФЕ всі коефіцієнти незалежні.

З огляду на викладене, рівняння (8) перепишемо

$$y = 4,22 + 1,04x_1 + 0,67x_2 + 0,75x_3, \quad (12)$$

Перш, ніж проаналізувати отриману регресійну модель цільової функції (1) у вигляді рівняння (12), необхідно перевірити адекватність моделі даним експерименту за допомогою оцінки відхилень значень \hat{y} (табл. 4), обчислених за рівнянням (12), від експериментально встановлених і усереднених за числом паралельних дослідів у точках факторного простору y .

Згідно із вказівками [9, с. 121], підставимо у формулу (12) значення (+1) і (-1) відповідно до матриці планування ПФЕ, знайдемо розрахункові значення \hat{y} , що занесені вище у табл. 4. Далі з

метою перевірки адекватності моделі використаємо критерій Фішера

$$S_a^2 = \frac{m}{n-k} \sum_{i=1}^8 (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 = 0,0008, \quad (13)$$

де \hat{y}_i – значення функції відгуку, зумовлене рівнянням (6.17) для кожного дослідів, $k = 4$ – число членів апроксимуючого полінома у вигляді зазначеного рівняння. Тоді розрахункове значення F – критерію (дисперсійне відношення) становитиме:

$$F = \frac{S_a^2}{S_{m,n}^2} = 0,0008 / 0,0018 = 0,444.$$

Число ступенів свободи становить: $f_1 = n - k = 4$; $f_2 = n(m - 1) = 56$.

За таблицею 48 додатка [9] для рівня значимості $q=0,05$ визначаємо критичне значення параметра $F_{кр} = 2,56$. Згідно з методикою ПФЕ при співвідношенні $F < F_{кр}$ модель признається адекватною реальному процесу. Результат порівняння $F = 0,571 < F_{кр} = 2,56$ дає змогу констатувати адекватність рівняння регресії (12) реальному процесу витікання газу в генераторі тяги залежно від кількості n сопел, діаметрів d отворів їх попереднього перерізу й тиску p у генераторі тяги.

Для оцінки внеску коефіцієнтів регресії в рівняння моделі використовуємо множинний коефіцієнт кореляції, результат розрахунків якого за даними табл. 4 становив:

$$K = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2}} = 0,99998. \quad (14)$$

Коефіцієнт кореляції може змінюватися в межах $0 < K < 1$, де рівність нижній межі свідчить про відсутність якого-небудь впливу, внесеного коефіцієнтом регресії, і, навпаки, рівність верхній межі вказує на те, що рівняння регресії повністю описує результати експерименту.

Таблиця 5

Розрахунок коефіцієнта кореляції

№ дослідів	$\bar{y}_i = \ln t_i$	$(\bar{y}_i - \bar{y})$	$(\bar{y}_i - \bar{y})^2$
1	6,68	2,46	6,05
2	4,59	0,37	0,14
3	5,34	1,12	1,25
4	3,26	-0,96	0,92
5	5,19	0,97	0,94
6	3,09	-1,13	1,28
7	3,83	-0,39	0,15
8	1,76	-2,46	6,05
n	$\bar{y} = 4,218$	$\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2 = 16,78$	$\sum (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 = 0,0004$

У нашому випадку, з урахуванням даних табл. 5, коефіцієнт кореляції становив $K = 0,9998$, отже, рівняння регресії (12) практично повністю описує результати експерименту.

Дослідження регресійної моделі функції відгуку. Рівняння (12) в кодованих змінних встановлює статистичну залежність між параметром оптимізації й факторами, тобто змінними кількості сопів, діаметром їх поперечного перерізу й тиском у них.

Аналізуючи величину й знак кожного коефіцієнта регресії (12), можна одержати достовірну (тому що адекватність моделі перевірена за критерієм Фішера, див. вище) інформацію про вплив факторів на параметр оптимізації та виробити стратегію пошуку екстремуму цільової функції. У рівнянні (12) коефіцієнти при змінних x_1, x_2 позитивні, отже, збільшення кількості сопів у генераторі тяги й тиску в соплах приводить до росту аеродинамічної піднімальної сили генератора тяги. Той самий ефект має місце й при збільшенні діаметра, точніше площі їх поперечного перерізу сопів. Однак домінуючий вплив, судячи зі значення коефіцієнта, виявляє кількість сопів і в меншій мері тиск у них порівняно зі збільшенням внутрішнього діаметра сопів генератора тяги. Інші коефіцієнти при парному x_{12}, x_{23} , а також потрійній x_{123} взаємодії факторів були виключені як статистично не значимі згідно із критерієм Стьюдента за формулою (11).

Зазначимо, що вплив ефектів взаємодії проявляється тільки на самих комбінаціях факторів і не поширюється на аналіз впливу кожного фактора окремо. Автономний вплив факторів визначається величиною й знаком коефіцієнтів при них. Отримані дані вказують напрям пошуку оптимуму, але ще не дають змоги визначити оптимальні або, принаймні, квазіоптимальні параметри генератора тяги.

Для знаходження координат екстремуму перевіряємо можливість існування останнього в заданій технологічно прийнятими обмеженнями (3) області факторного простору. Із цією метою підставимо кодовані значення змінних (5) у рівняння (12) і, потенціюючи, одержимо вираження цільової функції (1) у натуральному вираженні:

$$R = e^{5.68} (n)^{0.988} (p)^{0.965} (d)^{0.99}, \quad (15)$$

де $e = 2,72$ – постійний коефіцієнт, основа натуральних логарифмів.

Умова існування екстремуму цільової функції (15) в деякій точці факторного простору з координатами (n_0, p_0, d_0) має вигляд:

$$\frac{\partial R}{\partial n}(n_0) = \frac{\partial R}{\partial p}(p_0) = \frac{\partial R}{\partial d}(d_0) = 0, \quad (16)$$

У геометричній інтерпретації ця умова має визначати рівність кутів нахилу дотичних до кривої функціональної залежності в однойменних точках $k_n(n_0, R)$ і $k_d(d_0, R)$ при $p_i = p_0$. Однак, як видно з графіків рис. 4, визначені кути не рівні. Отже, умова (16) для значень факторів усередині області варіювання не виконується. У цьому разі завдання оптимізації може вирішуватися аналітично як завдання на умовний екстремум цільової функції за допомогою відшукування екстремальних значень параметра оптимізації на границях факторного простору. Нас цікавить максимально можливе значення сили реактивної тяги R у заданих межах (3) варіювання трьох незалежних факторів: кількості сопів n , надлишкового тиску p у них і діаметрів d поперечного перерізу сопів.

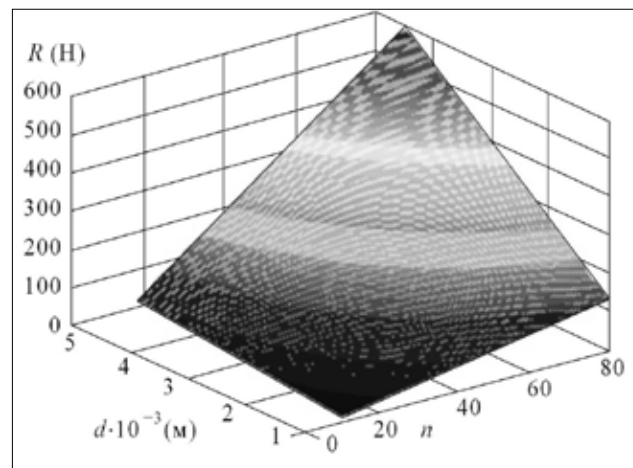


Рис. 4. Залежність сили тяги R від кількості n сопел і діаметрів d отворів при сталому тиску ($p = 6$ бар)

Тому знайдемо частинні похідні за кожною незалежною змінною (15):

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial n} &= 0.988e^{5.68} (n)^{-0.012} (p)^{0.965} (d)^{0.99}; \\ \frac{\partial R}{\partial p} &= 0.965e^{5.68} (n)^{0.988} (p)^{-0.035} (d)^{0.99}; \\ \frac{\partial R}{\partial d} &= 0.99e^{5.68} (n)^{0.988} (p)^{0.965} (d)^{-0.01}. \end{aligned} \quad (17)$$

З формул (17) видно, що частинні похідні приймають додатні значення при усіх значеннях змінних, заданих виразами (3). Звідси випливає, що функція R (реактивної тяги) зростає за умови зростання кожної змінної і досягає максимального

значення на границях факторного простору, тобто при максимальних значеннях змінних:

$$R_{\max} = e^{5.68} (n_{\max})^{0.988} (p_{\max})^{0.965} (d_{\max})^{0.99}, \quad (18)$$

Таким чином, у результаті експерименту встановлено, що керування силою реактивної тяги R може бути здійснено за залежністю (15) від трьох незалежних факторів: кількості сопів n , надлишкового тиску p у них і діаметрів d поперечного перерізу сопів.

Аналіз впливу чисельних характеристик незалежних факторів на параметр оптимізації, тобто силу реактивної тяги, виконаємо на підставі аналітичного вираження (15) у натуральному вимірі. На рис. 5 представлені графіки залежності реактивної сили тяги R від екстремальних значень незалежних факторів: кількості сопів n_{\min}^{\max} та їх діаметрів d_{\min}^{\max} при зміні тиску в соплах у діапазоні експерименту $p = (2 \dots 8)$ бар. Згідно з матрицею планування ПФЕ, відображеною вище в табл. 2, екстремальні значення факторів становили: кількості сопів $n_{\min}^{\max} = n_{10}^{80}$, а їх діаметрів $d_{\min}^{\max} = d_{1 \cdot 10^{-3}}^{4.5 \cdot 10^{-3}}$ (м).

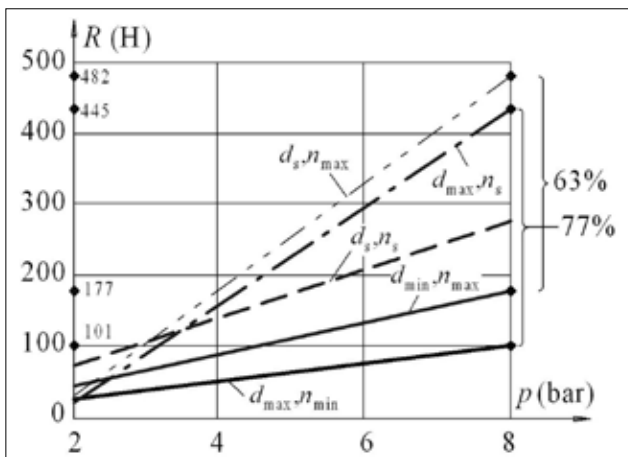


Рис. 5. Залежність сили тяги R від екстремальних значень (min, max) кількості n сопел і діаметрів d отворів у діапазоні тиску ($p = 2 \dots 8$ бар)

На рис. 5 також показані залежності реактивної тяги R від середніх значень факторів, які, згідно з табл. 3, як основний рівень варіювання факторів становили: сопів $n_s = 45$, а їх діаметрів $d_s = 2,75 \cdot 10^{-3}$ (м). Наведені графіки підтверджують домінуючий вплив коефіцієнта регресії в рівнянні (12) при числі сопів генератора тяги й дають чисельну характеристику зазначеної домінанти.

Так, стає очевидним, що при максимальному тиску $p_{\max} = 8$ (бар) у соплах при переході від мінімального значення їх кількості $n_{\min} = 10$ до

середніх значень $n_s = 45$ при максимальних діаметрах сопів $d_{\max} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ (м) приріст сили реактивної тяги становить 77%. У той час як при переході від мінімального діаметра сопів $d_{\min} = 1 \cdot 10^{-3}$ (м) до середніх значень діаметрів $d_s = 2,75 \cdot 10^{-3}$ (м) при максимальному значенні кількості сопів $n_{\max} = 80$ зазначений приріст реактивної тяги становить менше, а саме 63%. Інакше кажучи, відмінність ефективності керування кількістю сопів і їх діаметрів становить 14%. Варто помітити, що з урахуванням лінійної залежності реактивної тяги від змінних факторів, а саме від кількості сопів, тиску в них і їх діаметрів, зазначена пропорція буде дотримуватися й для інших значень тиску в соплах.

Значення абсолютних похибок у діапазоні від 0,7% до 5,1% обчислення реактивної тяги мобільного робота за аналітичною залежністю (15) щодо експериментальних даних, що відображені вище в табл. 3, дають змогу стверджувати доцільність і правомірність керування режимами процесу створення аеродинамічної сили генератора тяги як засобу протидії гравітаційному навантаженню мобільного робота довільної орієнтації в технологічному просторі при виконанні різноманітних виробничих завдань.

Висновки. У результаті проведених експериментальних досліджень шляхом постановки повнофакторного експерименту отримано емпіричний масив даних впливу параметрів генератора пневматичної тяги на аеродинамічну піднімальну силу як засобу протидії гравітаційному навантаженню на мобільного робота.

Дослідження регресійної моделі функції відгуку доводить наявність умовних екстремумів на границях факторного простору зміни параметрів генератора тяги для створення аеродинамічної протидії гравітаційному навантаженню мобільного робота.

Аналіз чисельних характеристик впливу параметрів генератора тяги на величину аеродинамічної піднімальної сили мобільного робота підтверджує домінуючий вплив чисельності сопів генератора тяги щодо діаметрів їх поперечного перетину та надлишкового тиску в камері генератора.

В остаточному підсумку проведені експериментальні дослідження надають достатні підстави ствердження доцільності використання аеродинамічної сили для компенсації та протидії гравітаційному навантаженню з метою підвищення надійності утримання мобільних роботів у технологічному просторі довільної орієнтації.

Список літератури:

1. Manuel F. Silva and J. A. Tenreiro Machado. A Survey of Technologies and Applications for Climbing Robots Locomotion and Adhesion. *Climbing and Walking Robots* / Behnam Miripour. London, 2010. 25 p.
2. Raju D.D, Jaju S.B. Developments in wall climbing robots: a review. *International journal of engineering research and general science*. 2014. №. 2. P. 35.
3. Saunders A., Goldman D.I, Fullb R.J. and Buehler M. The RiSE Climbing Robot: Body and Leg Design. *Boston Dynamics, Unmanned Systems Technology VIII*. Proc. of SPIE Vol. 6230. 2005. 13 p.
4. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg, New York, 2012. 178 p.
5. Polishchuk M.N., Oliinyk V.V. (2020). Dynamic Model of a Stepping Robot for Arbitrarily Oriented Surfaces. *Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019*. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 938. Springer Cham.
6. Simon Ruffieux, Auke Ijspeert, Carlo Menon. Modelisation and Simulation of Climbing Robots. Simon Frazer University. 2008. 21 p.
7. Антигравітаційний мобільний робот Поліщука: пат. 120410 Україна: № а201805661. МПК В62D57/024; заяв. 22.05.2018; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22.
8. Полищук М.Н. Теоретическое обоснование функционирования антигравитационного мобильного робота. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2019. Том 30 (69) № 3. С. 1–9.
9. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении. Москва : Машиностроение, 1982. 176 с.
10. Барабашук И.Б., Креденцер Б.П. Мирошниченко В.И. Планирование эксперимента в технике. Киев : Техника, 1984. 198 с.
11. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. Москва : Изд-во «Мир». 1972. 381 с.

Polishchuk M.M., Tkach M.M. STUDY OF AERODYNAMIC LIFT MODULE FOR A MOBILE ROBOT OF ARBITRARY ORIENTATION

Mobile robots of vertical movement, known in publications under the name Climber Robot, is a relatively new means of mobile robotics. Such robots are able to perform production tasks on surfaces of arbitrary orientation in the technological space, and are designed to perform various operations in extreme production conditions, including technological disasters, while overcoming the gravitational load. Well-known experimental studies of these robots are mainly devoted to the creation of subsystems for coupling a robot to a moving surface. This is explained by the fact that these subsystems are an integral part of mobile robots of arbitrary orientation in space.

These studies contain the results of experimental testing of a fundamentally new approach to counteract the gravitational load of a mobile robot, namely, the proof of the advisability of equipping the robot with a source of reactive thrust of a non-chemical origin. A pneumatic generator of aerodynamic lift is proposed as such a source. This force partially compensates or completely overcomes the gravitational load, while not allowing the transformation of a mobile robot into an aircraft. In other words, the thrust force should not exceed the adhesion forces of the mobile robot to the displacement surface. In addition, the proposed article contains an experimental solution to the problem of finding the quasi-optimal values of aerodynamic lift depending on the parameters of the jet thrust generator. The methodology and description of the formulation of the full factorial experiment with the variation of independent factors at two extreme levels are presented. The use of aerodynamic lifting force as a means of counteracting the gravitational load helps to increase the reliability of the retention of mobile robots on the displacement surface of arbitrary orientation in the technological space.

Key words: mobile robots, walking machines, robots of vertical movement, climbing robots, aerodynamic force.

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.924.7

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/02>

Залюбовский М.Г.

Открытый международный университет развития человека «Украина»

Панасюк И.В.

Учебно-научный институт инженерии и информационных технологий
Киевского национального университета технологий и дизайна

Малышев В.В.

Инженерно-технологический институт
Открытого международного университета развития человека «Украина»

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МЕХАНИЗМА БЕЗ ИЗБЫТОЧНОЙ СВЯЗИ ГАЛТОВОЧНОЙ МАШИНЫ

Розглянуто просторовий шестиланковий механізм машини зі складним просторовим рухом робочої ємності, яка використовується для галтувальних процесів обробки деталей та для змішування дрібнодисперсних сипких речовин. Ступінь рухомості просторового механізму машини, згідно з формулою Сомова-Малышева, дорівнює нулю. Це пов'язано з наявністю надлишкового (пасивного) зв'язку в кінематичному ланцюзі просторового механізму. Наявність надлишкового зв'язку негативно впливає на експлуатаційні властивості машини. Така конструкція машини може функціонувати тільки у разі забезпечення високої точності довжин ланок просторового механізму, а навіть у разі незначної деформації однієї з ланок може виникнути заклинювання механізму, як наслідок, машина відразу виходить з ладу. Авторами запропонований один з можливих способів звільнення просторового механізму машини від надлишкового (пасивного) зв'язку. На основі структурного синтезу розроблено конструкцію шестиланкового просторового шарнірного механізму з кінематичною парою четвертого класу без надлишкового зв'язку. При цьому використаний аналітичний метод дослідження на основі геометричного і структурного синтезу просторового шестиланкового механізму галтувальної машини, виконано моделювання машини в системі автоматизованого проектування SolidWorks 2016. Встановлено взаємозв'язок між різними геометричними параметрами синтезованого механізму машини, що дає можливість визначити раціональні співвідношення довжин ланок механізму. Отримані математичні залежності дають змогу розрахувати основні конструктивні параметри машини, що забезпечують її раціональне функціонування без заклинювання. Такі залежності можуть бути використані на стадії проектування відповідного типу обладнання.

Ключові слова: просторовий механізм, надлишковий зв'язок, кінематична пара, робоча ємність, галтування, структурний синтез.

Постановка проблеми. Перспективним оборуодованием на сьогоднішній день, используемым для реализации галтовочных технологических операций [1, с. 8] (технологические процессы улучшения качества поверхности деталей (шлифование [2, с. 3] и полирование [3, с. 3]), отделение деталей от литников [4, с. 4] и т.д.), являются машины [5, с. 248–251], рабочие емкости которых выполняют сложное пространственное движение [6, с. 218]. В этих машинах рабочая емкость выполняет одновременное перемещение относительно трех взаимно перпендикулярных плоско-

стей, а также вращается вокруг собственной оси. Такое движение рабочей емкости способствует повышению интенсивности движения технологической среды. В результате достигается значительное повышение производительности изготовления деталей с одновременным уменьшением энергозатрат.

Известна [7, с. 10–23] «базовая» конструкция машины со сложным движением рабочей емкости. Она представляет собой шестизвенный пространственный механизм с вращательными кинематическими парами. Такой пространственный

механизм имеет свои особенности – в его структуре есть избыточная (пассивная) связь, негативно влияющая на долговечность и эксплуатационные характеристики механизма. В работе [8, с. 402] определено, что механизм может функционировать только при соблюдении высокой точности конструктивных соотношений длин звеньев. Во время работы механизма даже при незначительной деформации одного из звеньев может возникнуть его заклинивание, как следствие, он сразу выходит из строя. Кроме того, детали нужно изготавливать по допускам с повышенной точностью. За счет этого себестоимость такого оборудования значительно повышается, а срок эксплуатации снижается.

Таким образом, синтез и аналитическое исследование пространственных механизмов галтовочной машины без избыточной связи является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. На сегодняшний день пространственные шарнирные механизмы широко применяются в различных сферах и отраслях промышленности [1, с. 8–13; 9, с. 404]. В то же время использование пространственных механизмов затруднено в связи со сложностью конструкции [10, с. 63], достаточно часто в их кинематических цепях имеются избыточные связи. Особенно это касается пространственных шарнирных механизмов с вращательными кинематическими парами.

В литературных источниках представлены многочисленные примеры преодоления статических неопределенностей (избыточных связей) в шарнирных механизмах. В частности, значительное количество примеров освобождения от избыточных связей представлено в работе [11, с. 10–100]. Также известны [1, с. 174–181]

варианты освобождения пространственных механизмов галтовочных машин от избыточной связи. Однако в результате освобождения от избыточной связи возникают другие проблемы, связанные с эксплуатацией этих машин, например, уменьшение долговечности работы отдельных подвижных узлов машины, изменение кинематических параметров пространственного перемещения рабочей емкости, что приводит к изменению интенсивности перемещения рабочего массива и тому подобному.

Постановка задания. Целью работы является синтез шестизвенного пространственного механизма галтовочной машины без избыточной связи с последующим аналитическим исследованием его основных конструктивных параметров и получение математических зависимостей для их расчета.

Изложение основного материала. В работе [1, с. 35–38] рассмотрена конструкция машины со сложным пространственным движением рабочей емкости, подвижные звенья которой образуют собой пространственный шестизвенный механизм с вращательными кинематическими парами. Эту конструкцию будем именовать «базовой». Кинематическая схема пространственного механизма «базовой» конструкции механизма машины и ее модель, созданные с помощью САПР SolidWorks, представлены на рис. 1а и б соответственно.

Машина состоит из станины 1, ведущего 2 и ведомого 6 валов, установленных в станине параллельно в одной плоскости и соединенных между собой двойным пространственным шарниром, который выполнен в виде ведущей вилки 3, ведомой вилки 5 и рабочей емкости 4, закрепленной между вилками на диаметрально взаимно перпендикулярных геометрических осях 7 и 8 соответственно. Подвижные звенья машины образуют

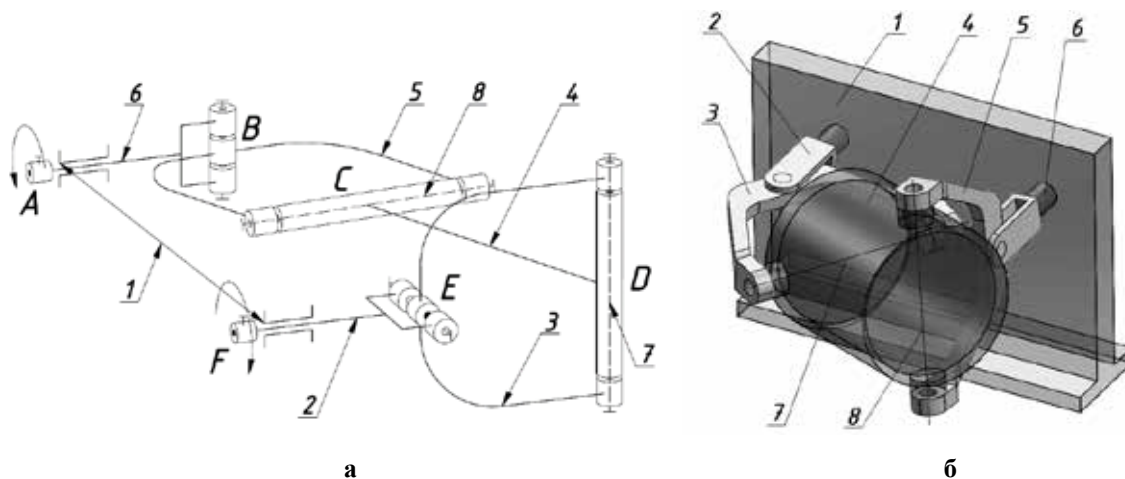


Рис. 1. а – кинематическая схема «базовой» конструкции механизма, б – модель машины

собой пространственный шестизвенный механизм с вращательными кинематическими парами. Механизм представляет собой замкнутую кинематическую цепь $ABCDEF$, оси A и F параллельны между собой, а оси A и B , B и C , C и D , D и E , E и F перпендикулярны между собой соответственно.

Используя формулу Сомова-Малышева [12, с. 10] для определения степени подвижности механизма, установлено, что он будет равен нулю:

$$W = 6n - \sum_{s=1}^{s=5} (6-s)p_s = 0, \quad (1)$$

где n – количество подвижных звеньев (5 звеньев: ведущий 1 и ведомый 6 валы, ведущая 3 и ведомая 5 вилки, рабочая емкость 4), P_s – количество подвижных кинематических пар s – класса (6 кинематических пар 5-го класса: A, B, C, D, E, F).

Известно из [13, с. 405], что освободиться от действия избыточной связи можно на основе введения в кинематическую цепь механизма дополнительного подвижного звена или на основе замены одной из кинематических пар 5-го класса на кинематическую пару 4-го класса. Таким образом, был синтезирован шестизвенный пространственный механизм машины [14, с. 3], в котором вращательная кинематическая пара, соединяющая ведомую вилку с рабочей емкостью 5-го класса, заменена на кинематическую пару 4-го класса с возможностью дополнительного возвратно-поступательного перемещения ведомой вилки вдоль направляющей, выполненной вдоль стенки рабочей емкости. На рис. 2а представлена кинематическая схема синтезированного механизма, на рис. 2б – модель данной машины, созданные с помощью САПР SolidWorks.

Степень подвижности по формуле Сомова-Малышева (1) для данного пространственного механизма будет равна единице. Исключено влияние избыточной связи.

Машина для обработки деталей состоит из станины 1, ведущего 2 и ведомого 3 валов, установленных в станине параллельно в одной плоскости. Ведущий 2 и ведомый 3 валы шарнирно соединены вторыми концами с ведущей вилкой 4 и ведомой вилкой 5 соответственно, диаметрально взаимно перпендикулярные оси которых 6 и 7 являются осями крепления рабочей емкости 8. Рабочая емкость 8 соединена с ведущей вилкой 4 с помощью вращательной кинематической пары пятого класса, а с ведомой вилкой с помощью кинематической пары четвертого класса D с возможностью как вращательного, так и возвратно-поступательного перемещения ведомой вилки 5 вдоль направляющих 9, которые жестко соединены вдоль стенки рабочей емкости 8. Направляющие 9 расположены параллельно продольной оси рабочей емкости 8.

Применение удлиненной рабочей емкости 8, длина которой превышает расстояние между геометрическими осями ведущей 4 или ведомой 5 вилок l_B , повлечет дополнительное возвратно-поступательное перемещение ведомой вилки 5 относительно направляющих 9 рабочей емкости 8 на соответствующую амплитуду l_A .

Таким образом, в процессе эксплуатации машины расстояние между геометрическими осями крепления вилок к рабочей емкости l_{PC} за счет кинематической пары 4-го класса циклически меняется от минимального $l_{PC(MIN)}$ до максимального $l_{PC(MAX)}$ значения. За один полный оборот ведущего вала машины будут происходить 4 возвратно-поступательные перемещения ведомой вилки вдоль направляющих.

Максимальное расстояние $l_{PC(MAX)}$ будет образовываться при таких положениях подвижных звеньев машины, когда продольная ось рабочей емкости проецируется на вертикальную плоскость

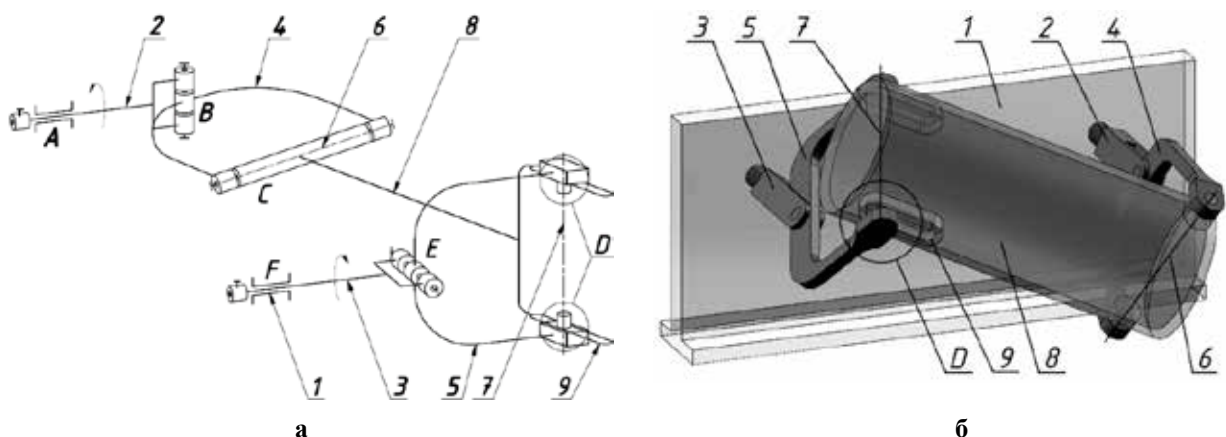


Рис. 2. а – кинематическая схема синтезированного механизма, б – модель машины

станины в натуральную величину (рис. 3а), минимальное расстояние $l_{PC(MIN)}$ будет образовываться, когда одна из осей крепления ведущей или ведомой вилки будет горизонтальной, а другая вертикальной (рис. 3б). Обозначения звеньев на рис. 3 совпадают с обозначениями на рис. 2.

Аналитическое исследование данного механизма машины следует начинать, задаваясь геометрическими параметрами, в частности: $l_{PC(MIN)}$ – минимальное расстояние между геометрическими осями крепления вилок к рабочей емкости, l_B – межосевое расстояние ведущей и ведомой вилок. При этом должно выполняться условие:

$$l_{PC(MIN)} > l_B. \quad (2)$$

На основе прямоугольного треугольника, образованного в горизонтальной плоскости (рис. 3а), можно записать выражение для определения расстояния между осями ведущего и ведомого валов l_0 :

$$l_0 = \sqrt{(l_{PC(MIN)} + l_B)^2 - l_B^2}. \quad (3)$$

Максимальное расстояние $l_{PC(MAX)}$ (рис. 3б) между геометрическими осями крепления вилок к рабочей емкости можно определить по выражению:

$$l_{PC(MAX)} = \sqrt{l_0^2 - 4l_X^2}, \quad (4)$$

где l_X – расстояние между осью вращения ведущего (ведомого) вала и осью рабочей емкости в проекции на вертикальную плоскость станины. Предварительно в работе [15, с. 72] получено выражение для определения длины l_X :

$$l_X = l_B \cos 45^\circ. \quad (5)$$

Подставим значение выражения (5) в уравнение (4):

$$l_{PC(MAX)} = \sqrt{l_0^2 - 4(l_B \cos 45^\circ)^2}. \quad (6)$$

Как отмечалось выше, в процессе эксплуатации машины будет меняться расстояние между геометрическими осями вилок, что будет происходить за счет возвратно-поступательного перемещения ведомой вилки вдоль направляющей. Амплитуду l_A возвратно-поступательного перемещения ведомой вилки вдоль направляющей можно определить следующим образом:

$$l_A = l_{PC(MAX)} - l_{PC(MIN)}. \quad (7)$$

Подставим в уравнение (7) выражение (6):

$$l_A = \sqrt{l_0^2 - 4(l_B \cos 45^\circ)^2} - l_{PC(MIN)}. \quad (8)$$

Запишем уравнение (8) с учетом выражения (3):

$$l_A = \sqrt{(l_{PC(MIN)} + l_B)^2 - l_B^2 - 4(l_B \cos 45^\circ)^2} - l_{PC(MIN)}. \quad (9)$$

С помощью уравнения (9) можно рассчитать амплитуду l_A возвратно-поступательного перемещения ведомой вилки вдоль направляющей, что необходимо при конструировании данного типа оборудования.

В связи с возвратно-поступательным перемещением рабочей емкости, которое будет происходить фактически «в середине» ведомой вилки, ее необходимо изготавливать специальной формой, как представлено на рис. 3а. На рис. 3а представлено такое положение подвижных звеньев машины, при котором ведомая вилка по отношению к рабочей емкости будет находиться в одном из крайних положений, в результате чего правый торец рабочей емкости будет максимально приближенным к грани ведомой вилки. Для того

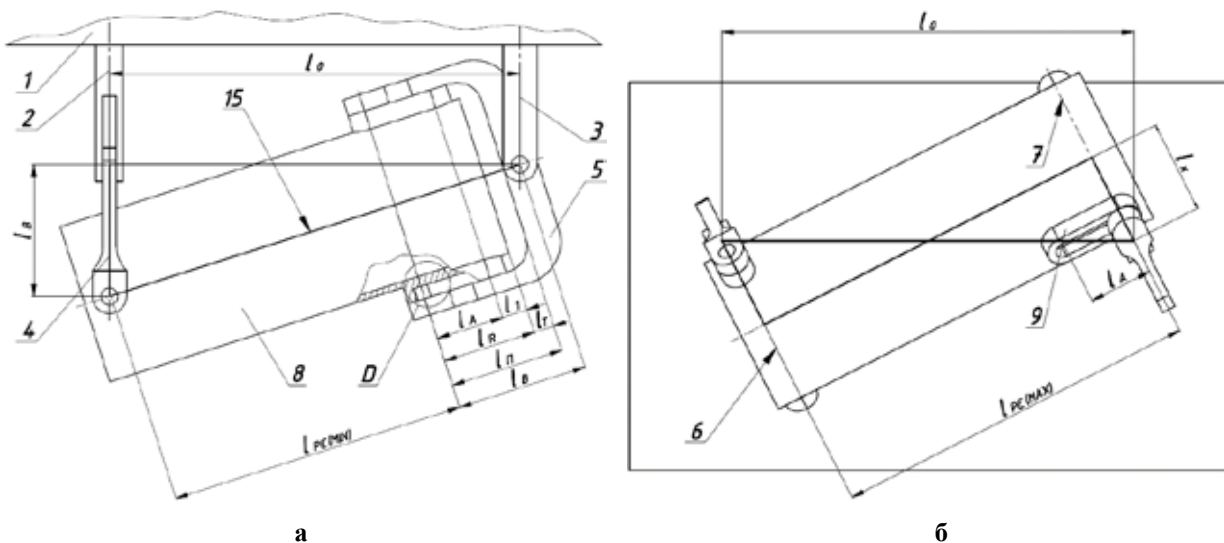


Рис. 3. Разработанная машина для обработки деталей: а – вид сверху, б – вид спереди

чтобы исключить столкновение торца рабочей емкости с ведомой вилкой и дальнейшее заклинивание механизма машины в целом, необходимо обеспечить образование соответствующего зазора l_T между торцом емкости и гранью ведомой вилки. Величину l_T рационально принимать в пределах примерно 10% от длины $l_{PC(MAX)}$. Таким образом, запишем выражение для расчета необходимого расстояния l_{II} (рис. 3а), которое будет обеспечивать свободный «проход» рабочей емкости в середине нее:

$$l_{II} = l_R + l_T. \quad (10)$$

С учетом вышеизложенного выражение (10) можно записать следующим образом:

$$l_{II} = l_R + 0,1\sqrt{l_0^2 - 4(l_B \cos 45^\circ)^2}, \quad (11)$$

где l_R – расстояние от геометрической оси крепления ведомой вилки с рабочей емкостью до правого торца рабочей емкости при соответствующем положении подвижных звеньев машины. В свою очередь l_R состоит из:

$$l_R = l_A + l_1, \quad (12)$$

где l_1 – расстояние от геометрической оси крепления ведомой вилки с рабочей емкостью до правого торца рабочей емкости, при таком положении подвижных звеньев машины, когда образуется максимальное расстояние $l_{PC(MAX)}$. Длину l_1 следует принимать, исходя из конструктивных особенностей рабочей емкости, в пределах примерно 40% от длины амплитуды l_A :

$$l_1 \approx 0,4 \cdot l_A. \quad (13)$$

Запишем выражение (12) с учетом формулы (13):

$$l_R = 1,4l_A. \quad (14)$$

Далее подставим значение выражения (14) в уравнение (11):

$$l_{II} = 1,4l_A + 0,1\sqrt{l_0^2 - 4(l_B \cos 45^\circ)^2}. \quad (15)$$

После чего запишем уравнение (15) с учетом значения выражения (9):

$$l_{II} = 1,4(\sqrt{(l_{PC(MIN)} + l_B)^2 - l_B^2 - 4(l_B \cos 45^\circ)^2} - l_{PC}^{\min}) + 0,1\sqrt{l_0^2 - 4(l_B \cos 45^\circ)^2}. \quad (16)$$

Таким образом, выражение (16) позволяет рассчитать необходимое расстояние l_{II} между осью крепления ведомой вилки с рабочей емкостью и гранью ведомой вилки, обеспечивающее ее функционирование без заклинивания.

Выводы. Представлен один из возможных вариантов освобождения пространственного механизма галтовочной машины от избыточной связи.

Выполнен синтез и дальнейшее аналитическое исследование шестизвенного пространственного механизма с кинематической парой 4-го класса, в кинематической цепи которого отсутствует избыточная связь.

На основе аналитического исследования получены математические зависимости для расчета основных конструктивных параметров машины. Данные зависимости могут быть использованы соответствующими машиностроительными предприятиями при проектировании такого типа оборудования.

Список литературы:

1. Залюбовський М.Г. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей : монографія / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, В.В. Малишев. Київ : Університет «Україна», 2018. 228 с.
2. Патент № 113267, МПК В24В 31/10 (2006.01). Спосіб вологого шліфування полімерних деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – № u201606526; заяв. 15.06.2016, опуб. 25.01.2017, бюл. № 2.
3. Патент № 113266, МПК В24В 31/10 (2006.01). Спосіб вологого полірування полімерних деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – № u201606525; заяв. 15.06.2016, опуб. 25.01.2017, бюл. № 2.
4. Патент № 137568, МПК В24В 31/10 (2006.01). Спосіб об'ємної обробки металевих деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Сухенко А.Г., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – № u201904193; заяв. 19.04.2019, опуб. 25.10.2019, бюл. № 20.
5. Mayer-Laigle C. Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer / C. Mayer-Laigle, C. Gatumel, H. Berthiaux. *Chemical Engineering Research and Design*. Volume 95, March 2015, pp. 248–261.
6. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Cook M., Ingram A., Stitt E.H. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of TurbulaMixer Motion using Positron Emission Particle Tracking. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 59, No. 3. 2010, pp. 217–238.

7. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD. The University of Birmingham, UK., 2012.
8. Хростицкий А.А., Терёшин В.А. Особенности структуры и геометрии пространственного шестизвенного механизма с избыточными связями. *Современное машиностроение. Наука и образование* : материалы Междунар. науч.-прак. конф.: (сайт). Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 399–409.
9. Antonyuk E.Ya., Zabuga A.T. Motion of an Articulated Vehicle with Two-Dimensional Sections Subject to Lateral Obstacles. *Int. Appl. Mech.* 2016. 52, No 4. Pp. 404–412.
10. Мудров А.Г. Обзор исследований пространственных механизмов с вращательными шарнирами / А.Г. Мудров, Р.Ш. Марданов. Научно-методический журнал «Теория механизмов и машин». Том 13. 2015. № 2(26). С. 62–70.
11. Кожевников С.Н. Основания структурного синтеза механизмов. Киев : Наук. думка, 1979. 232 с.
12. Решетов Л.Н. Конструирование рациональных механизмов. Изд. 2-е, переработ. и доп. Москва : Машиностроение, 1972. 256 с.
13. Antonyuk E.Ya., Zabuga A.T. Motion of an Articulated Vehicle with Two-Dimensional Sections Subject to Lateral Obstacles. *Int. Appl. Mech.* 2016. 52, No. 4. Pp. 404–412.
14. Патент № 127611, МПК В24В 37/00 (2018.01), В24В 37/07 (2012.01). Машина для обработки деталей / Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну – № u201802817; заяв. 20.03.2018, опуб. 10.08.2018, бюл. № 15.
15. Залюбовський М.Г. Об исследовании основных конструктивных параметров семизвенного пространственного механизма машины для обработки деталей / М.Г. Залюбовский, И.В. Панасюк. *Приклад. механика.* 2020. 56, № 1. С. 67–77.

Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Malyshev V.V. STRUCTURAL SYNTHESIS AND ANALYSIS OF A SPATIAL MECHANISM WITHOUT EXCESSIVE COMMUNICATION OF A TURNING MACHINE

A spatial six-link mechanism of a machine with complex spatial movement of a working vessel, which is used for tumbling processes for processing parts and for mixing finely divided bulk solids, is considered. The degree of mobility of the spatial mechanism of the machine, according to the Somov-Malyshev formula, is zero. This is due to the presence of excess (passive) communication in the kinematic chain, which has a negative impact on its operational properties. This design of the machine can only function while ensuring high accuracy of the lengths of the links of the spatial mechanism, and even with a slight deformation of one of the links, jamming of the mechanism may occur; as a result, the machine immediately fails. The authors proposed one of the possible ways to free the spatial mechanism of the machine from excessive (passive) communication. Based on structural synthesis, a six-link spatial articulated mechanism design with a fourth-class kinematic pair without excessive coupling has been developed. At the same time, an analytical research method was used based on the geometric and structural synthesis of the six-link spatial mechanism of the tumbling machine, the machine was modeled in the SolidWorks 2016 computer-aided design system. The relationship between the various geometric parameters of the synthesized machine mechanism was established, which makes it possible to determine rational ratios of the link lengths of the mechanism. The obtained mathematical dependencies allow us to calculate the basic design parameters of the machine, ensuring its rational functioning without jamming. These dependencies can be used at the design stage of the corresponding type of equipment.

Key words: spatial mechanism, excess coupling, kinematic pair, working capacity, tumbling, structural synthesis.

ПРИЛАДИ

УДК 004.89

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/03>

Черепанська І.Ю.

Поліський національний університет

Безвесільна О.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сазонов А.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бродський Ю.Б.

Поліський національний університет

Прядко В.А.

Поліський національний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОХИБКИ ПРЕЦИЗІЙНОЇ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ

У статті представлена повна математична модель похибки прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК), що отримана шляхом вдосконалення відомої базової математичної моделі похибки гоніометричної системи ГСІЛ, яка є прототипом ППСВК. Повна математична модель похибки ППСВК, на відміну від відомих, враховує нестабільності швидкості обертання Землі навколо своєї осі, а також флуктуаційні напруги, що з'являються в процесі функціонування фоточутливої КМОП-матриці як складника ППСВК та зумовлюються наявністю теплового і дробового ефектів, що виникають в її структурних елементах. Нестабільність швидкості обертання Землі навколо своєї осі, а також тепловий та дробовий ефекти, що виникають у структурних елементах КМОП-матриці, є несприятливими факторами, які мають місце як у лабораторних, так і у виробничих умовах, наприклад, прецизійного приладо- та машинобудування, і суттєво зменшують точність. Крім цього, необхідність побудови повної математичної моделі похибки ППСВК зумовлюється синергетичною інтеграцією в її структурі нових введених авторами технічних засобів автоматизації – фоточутливої КМОП-матриці та штучних нейронних мереж (у разі реалізації останніх у вигляді нейропроцесорів), а також використанням як прецизійного датчика кута кільцевого лазера, що є чутливим до нестабільності швидкості обертання Землі. Пропонована повна математична модель похибки ППСВК використовується для обчислення величин похибок гоніометричних вимірювань із подальшою алгоритмічною корекцією результатів вимірювання під час функціонування ППСВК. Перевагами пропонованої повної математичної моделі похибки ППСВК є те, що вона системно враховує особливості складників ППСВК і дає змогу проводити подальшу корекцію результатів вимірювання в динамічному режимі безпосередньо в процесі експлуатації ППСВК без застосування спеціалізованого лабораторного обладнання. Практична реалізація вказаного здійснюється в спеціалізованому програмному додатку ПК, що є складником ППСВК.

Ключові слова: похибка, гоніометрична система, алгоритмічна корекція, систематична похибка, випадкова похибка, флуктуаційні напруги, дробовий ефект, тепловий ефект.

Постановка проблеми. У процесі розробки сучасних високоточних гоніометричних систем, що використовуються для проведення різноманітних вимірювань величин плоских кутів у багатьох галузях науки і техніки, особлива увага приділяється

підвищенню їх точності. Одним із перспективних і актуальних шляхів підвищення точності різних гоніометричних систем, у тому числі відомої прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК) [1], нині є алгоритмічна компенсація

похибок, що передбачає розробку відповідних математичних моделей та їх використання для корекції результатів вимірювання. Це дає змогу здійснювати корекцію результатів вимірювання, без застосування спеціалізованого лабораторного обладнання, безпосередньо під час проведення експерименту та в процесі експлуатації ППСВК. Тому актуальною задачею є отримання математичної моделі похибки, що відповідає процесам, які відбуваються під час функціонування ППСВК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що алгоритмічна корекція результатів вимірювання успішно застосовується для підвищення точності вимірювань. Теоретичні основи та досвід застосування алгоритмів корекції описано в працях вітчизняних та зарубіжних науковців [2–10]. Зокрема, відома робота «Алгоритмічні методи високоточного визначення лінійних прискорень» [2], в якій автор розглядає алгоритмічні методи корекції при високоточних визначеннях лінійних прискорень у режимі реального часу. Основою цих методів є ідентифікація вектора стану чутливого елемента у вимірювачах прискорень, які використовуються в інерціальних та гравіметричних системах. У роботі С.В. Суханова [3] розглядаються алгоритми компенсації похибок вихідного сигналу лазерного гіроскопа. Г.Н. Ковшов і Л.І. Живцова [4] наводять математичну модель інструментальних похибок інклінометра на основі блоку триосьового акселерометричного перетворювача для інклінометричних систем контролю. Вказана математична модель застосовується в процесі корекції результатів вимірювання, що дає змогу підвищити точність. У роботі [5] описано нейромережевий алгоритм підвищення точності гоніометричних вимірювань та корекції вихідного сигналу. У роботі «Алгоритмические методы повышения точности измерений на основе обратных интерполяционных моделей» [6] розглядаються методи підвищення точності вимірювань на основі зворотних математичних моделей вимірювального каналу. А.Д. Дорожкін, О.А. Джусь [7] розглядають основні методи підвищення точності навігаційного комплексу в режимі корекції. Встановлено, що найбільш актуальними є структурно-алгоритмічні методи підвищення точності. Вказується, що розробка та вдосконалення алгоритмічного забезпечення дають змогу більш гнучко та ефективно використовувати як нові, так і відомі системи та датчики вимірювальних систем. У роботі П.А. Павлова [8] показано, що в разі використання алгоритму компенсації узагальненого зсуву нуля зменшується вплив нестабільності швидкості обертання кільцевого лазера

на систематичну та випадкову складові частини похибки вимірювання лазерним динамічним гоніометром. У роботі Т.Ю. Цибізової та Д.Т. Нгуен [9] розглянута схема алгоритмічної компенсації похибок навігаційних систем у вихідному сигналі з використанням еволюційних алгоритмів, зокрема генетичного алгоритму. Показано роботоспроможність генетичного алгоритму для побудови прогнозних моделей похибок інерціальної навігаційної системи в схемі корекції навігаційної інформації датчиків. У роботі «Алгоритмічна корекція результатів вимірювання прецизійної приладової гоніометричної системи» [10] наводиться алгоритмічний метод корекції результатів вимірювання величин плоских кутів прецизійною приладовою гоніометричною системою. Показано, що алгоритмічна корекція результатів вимірювання може проводитись без застосування спеціалізованого лабораторного обладнання безпосередньо в процесі експлуатації прецизійної приладової гоніометричної системи під час експерименту.

Необхідно вказати, що в одних роботах [2–4; 6–9] не висвітлюються питання корекції результатів гоніометричних вимірювань, в інших роботах [5; 10] не враховуються завади у випадку роботи ППСВК у несприятливих та нестаціонарних умовах, зокрема не враховується нестабільність швидкості обертання Землі навколо своєї осі, а також флуктуаційні напруги, які виникають під час функціонування фоточутливої КМОП-матриці як складника ППСВК та зумовлюються наявністю теплового і дробового ефектів, що виникають в її структурних елементах.

Враховуючи, що ППСВК призначена для вимірювання плоских кутів, пірамідальності призм та інших об'єктів високоточного виробництва, а також може застосовуватись при попередній виставці навігаційних чутливих елементів, визначення показника заломлення оптичного скла, вимоги до її точності та точності результатів вимірювання є надзвичайно високими. Зокрема, похибка вимірювання ППСВК не має перевищувати $0,12''$, що відповідає похибці сучасних гоніометричних систем кращих світових зразків. При цьому необхідно враховувати, що гоніометричні вимірювання ППСВК, окрім лабораторних умов, проводяться також у нестаціонарних виробничих умовах, наприклад, автоматизованих приладотехнічного машинобудування тощо. Відомо, що нестаціонарні виробничі умови супроводжуються виникненням низки завод, які додаються до вихідного вимірювального сигналу ППСВК. Тому необхідно враховувати ці особливості в процесі розробки

математичної моделі похибок, що є основою алгоритмів корекції результатів вимірювання.

Постановка завдання. Мета статті – розробити повну математичну модель похибки ППСВК, що враховує завади, які додаються до вихідного вимірювального сигналу і зумовлюються особливостями складників ППСВК.

Виклад основного матеріалу дослідження. Необхідність побудови повної математичної моделі похибки ППСВК зумовлюється синергетичною інтеграцією в її структуру, що побудована на базі відомої прецизійної гоніометричної системи ГС1Л КП СПБ «Арсенал», нових технічних засобів – фоточутливої КМОП-матриці та штучних нейронних мереж (у разі реалізації останніх у вигляді нейропроцесорів), а також використанням як чутливого елемента кільцевого лазера (КЛ), що є прецизійним датчиком кута,

чутливим до нестабільності швидкості обертання Землі. Повна математична модель похибки використовується для обчислення величини похибки з подальшою алгоритмічною корекцією результатів вимірювання під час функціонування ППСВК.

Пропонована повна математична модель похибки ППСВК розроблена шляхом вдосконалення відомої базової математичної моделі похибки автоматизованого прецизійного пристрою для вимірювання кутів, побудованого на базі гоніометричної системи ГС1Л, що є прототипом ППСВК. Відома базова математична модель похибки автоматизованого прецизійного пристрою для вимірювання кутів наведена у праці О.М. Безвесільної [11].

Повна математична модель похибки ППСВК системно враховує особливості її складників та має такий вид:

$$\Delta\phi = f(\Delta\phi_I; \Delta\phi_M; \Delta\phi_S) = \left(\frac{\int_{t_1}^{t_\phi} \left[K(t)\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t) + \frac{K_{-1}(t)}{\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t)} + \omega_0(t) \right] dt + N_{q1}}{\int_{t_1}^{t_{2\pi}} \left[K(t)\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t) + \frac{K_{-1}(t)}{\omega_\Sigma(t)\cos\alpha(t)} + \omega_0(t) \right] dt + N_{q2}} + \Delta\phi_{cal} + \Delta\phi_{mos} \right) - \phi, \quad (1)$$

$$\delta_{mos} = \delta_{mos}^{dr} + \delta_{mos}^t,$$

де $\Delta\phi$ – похибка вимірювання кутів ППСВК;

$\Delta\phi_I$ – інструментальна похибка;

$\Delta\phi_M$ – методична похибка повірки гоніометра;

$\Delta\phi_S$ – суб'єктивна похибка оператора;

$t_1, t_\phi, t_{2\pi}$ – моменти часу початку вимірювання, повороту на вимірюваний кут ϕ , та кут 2π відповідно, що зафіксовані автоколіматором;

$K(t)$ – масштабний коефіцієнт КЛ, що використовується як датчик кута;

ω_Σ – кутова швидкість, що впливає на гоніометр, та зумовлюється кутовими швидкостями оберткової платформи ($\overline{\omega(t)}$), Землі ($\overline{\omega_3}$) і основи оберткової платформи відносно Землі ($\overline{\omega_{bas}(t)}$);

$\alpha(t)$ – кут між віссю обертання оберткового пристрою і віссю чутливості гоніометра;

$K_{-1}(t), \omega_0(t)$ – нелінійність і зсув нуля вихідної характеристики КЛ відповідно;

N_{q1}, N_{q2} – шум і дискретність квантування сигналу;

$\Delta\phi_{cal}$ – похибка обчислень значень вимірюваного кута в ЕОМ;

$\Delta\phi_{mos}$ – похибка фоточутливої КМОП-матриці, зумовлена фотонним та тепловим шумом;

ϕ – дійсне значення вимірюваного кута.

У процесі функціонування ППСВК на прецизійний датчик кута (зокрема, на величину дрейфу нуля його вихідної характеристики) справляє вплив нестабільність швидкості обертання Землі навколо своєї осі. Причому цей вплив має переважно випадковий характер. У ППСВК як прецизійний датчик кута використовується КЛ 3.970.029, розроблений КП СПБ «Арсенал» спільно з кафедрою приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

У процесі функціонування КЛ спостерігається нестабільність його параметрів, зокрема відбувається дрейф нуля ω_0 вихідної характеристики та дрейф K_{-1} масштабного коефіцієнта. Структурна схема флуктуаційних процесів та похибок КЛ наведена на рис. 1.

Розрахункове значення масштабного коефіцієнта становить $K = 1,03 \cdot 10^{-5}$ при довжині сторони резонатора, виконаного у вигляді рівностороннього трикутника 22,7 см, та довжині хвилі $\lambda = 0,6328$ мкм. Проте під час функціонування КЛ відбувається дрейф масштабного коефіцієнта, що призводить до зміни його точності. В ідеальному випадку масштабний коефіцієнт K змінюється лінійно, але в реальних умовах на лінійні зміни накладаються такі флуктуації:

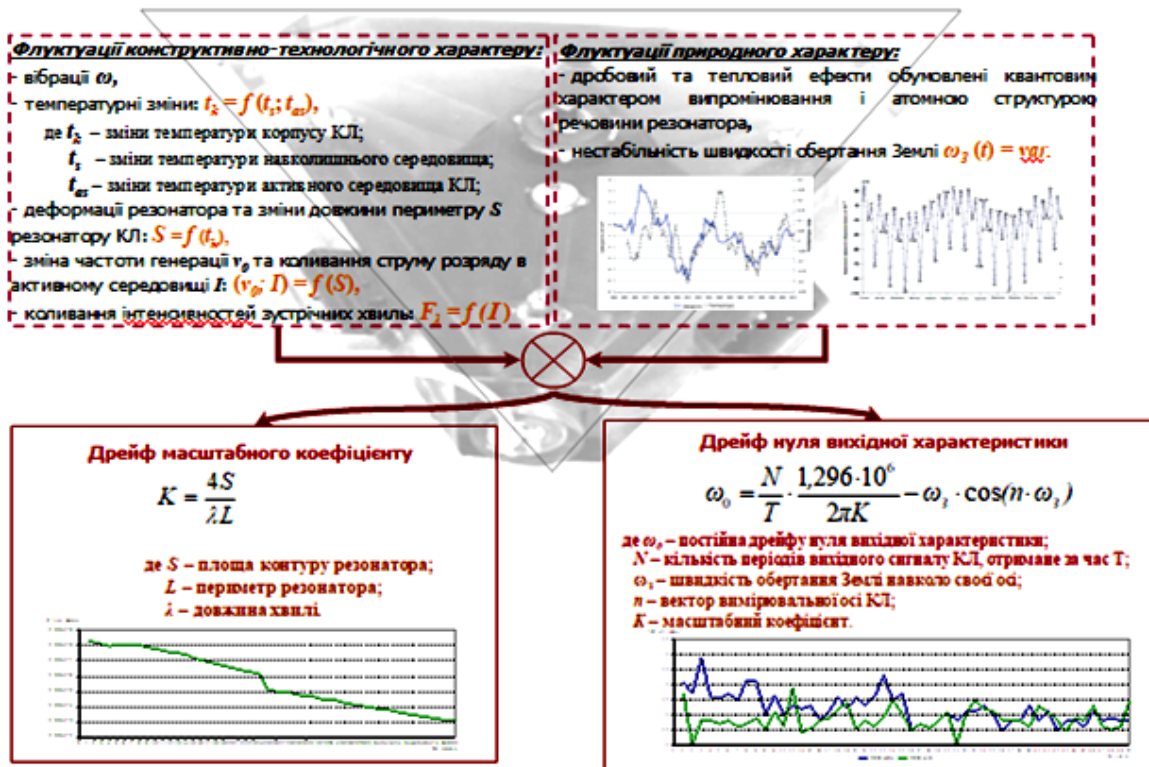


Рис. 1. Структурна схема флуктуаційних процесів та похибок КЛ

– конструктивно-технологічні флуктуації, що мають систематичний характер та усуваються відповідними конструктивними доопрацюваннями;

– флуктуації, зумовлені фізичною природою процесів та явищ, що виникають при функціонуванні КЛ, які мають випадковий характер.

До останніх належить нестабільність швидкості обертання Землі ω_3 навколо своєї осі, яка, як відомо з багатьох досліджень науковців, є нестабільною $\omega_3 \neq const$ та змінюється стрибкоподібно через вплив різних флуктуацій, викликаних планетарними силами – дрейфом магнітних полюсів, теплового градієнта, нестабільністю осі обертання. Кутова швидкість обертання Землі змінюється впродовж доби протягом всього року. Відома теорія дає змогу обчислювати коливання швидкості обертання Землі на будь-який інтервал часу.

Взаємозв'язок між швидкістю обертання Землі ω_3 та параметрами КЛ (дрейфом масштабного коефіцієнту K та нуля ω_0) можна показати взаємозв'язаними виразами:

$$\omega_0 = \frac{N}{T} \cdot \frac{1,296 \cdot 10^6}{2\pi K} - \omega_3 \cdot \cos(n \cdot \omega_3) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow K = \frac{N}{T(\omega_0 + \omega_3 \cdot \cos(n \cdot \omega_3))} \cdot \frac{1,296 \cdot 10^6}{2\pi K} \quad (2)$$

де ω_0 – постійна дрейфу нуля вихідної характеристики;

N – кількість періодів вихідного сигналу КЛ, отримана під час додавання за час T ,

$$N = \frac{1}{2\pi} \int_0^T \Delta\omega dt;$$

ω_3 – швидкість обертання Землі навколо своєї осі;
 n – вектор вимірювальної осі КЛ;

K – масштабний коефіцієнт, що визначається за відомою формулою $K = \frac{4S}{\lambda L} = \frac{2\pi R_{ef}}{\lambda / 2}$, де

S – площа контуру резонатора; L – периметр резонатора; λ – довжина хвилі; R_{ef} – довжина кола, вписаного в оптичний контур резонатора КЛ,

$$R_{ef} = \frac{2S}{L}; \lambda/2 - \text{відстань між вузлами стоячої хвилі.}$$

Із виразу (2) видно, що за умови $\omega_3 \neq const$ показники K та ω_0 є нестабільними величинами $K \neq const, \omega_0 \neq const$:

$$\omega_3 \neq const \Rightarrow \begin{cases} \omega_0 = \text{var}; \\ K = \text{var}. \end{cases} \quad (3)$$

Випадковий характер змін швидкості обертання Землі, які частково визначають дрейф нуля ω_0 та масштабного коефіцієнту K КЛ пропонованої ППСВК, вказує на випадковий характер цієї складової частини інструментальної похибки $\Delta\phi_I$ (див. вираз (1)).

Фоточутлива КМОП-матриця, що використовується у ППСВК як аналізатор сигналу від автоколіматора в діапазоні випромінювань від 400 нм до 1000 мкм, має похибку δ_{cmos} , зумовлену шумами, що мають випадковий характер. Відомим параметром, яким описують порівняну величину шуму в сигналі, є коефіцієнт шуму, що визначається як відношення величини корисного сигналу S до шуму F , вимірюється в децибелах та має логарифмічний масштаб величини:

$$S / F = 10 \log_{10} F. \quad (4)$$

У фоточутливій КМОП-матриці виникають шуми, найсуттєвішими з яких для ППСВК є фотонний (дробовий) шум та шум теплового сигналу.

Фотонний (дробовий) шум виникає внаслідок дискретності природи світлового випромінювання. Він проявляється як випадкові флуктуації напруг U_{dr} та струмів у фоточутливих елементах (пікселях) матриці, що визначають похибку δ_{cmos}^{dr} від дробового ефекту або фотонного шуму:

$$\delta_{cmos}^{dr} = f(U_{dr}), \quad (5)$$

де U_{dr} – флуктуаційні напруги, що виникають через дробовий ефект, середнє квадратичне значення яких визначається за виразом $U_{dr}^2 = 2qiR^2\Delta f$, де R – опір, Ом; Δf – інтервал (смуга) частот, в межах якого реєструється сила фотоструму, Гц; q – заряд електрона, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; i – величина струму, А.

Переміщення кожного носія заряду (електрона) КМОП-матриці супроводжується стрибком напруги в електричному колі. При швидкості зчитування зарядів до 500 елементів в сек на пікселі матриці потрапляє різна кількість фотонів, яка підпорядковується розподіленню Пуассона.

Шум темного сигналу (тепловий шум) виникає внаслідок термоелектронної емісії. Тепловий шум виникає тільки в провідниках з активним опором (у провідниках із реактивним опором – ємностях та індуктивностях тепловий шум не виникає) та пов'язаний із хаотичним рухом рухомих носіїв заряду. Внаслідок цього з'являються флуктуації напруги U_t , що визначають величину похибки δ_{cmos}^t від теплового шуму:

$$\delta_{cmos}^t = f(U_t), \quad (6)$$

де U_t – флуктуаційна напруга при тепловому русі зарядів, середнє квадратичне значення якої визначається за відомою формулою $U_t^2 = 4kTR\Delta f$, де k – постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – абсолютна температура T , К; R – опір, Ом; Δf – інтервал (смуга) частот, Гц.

Відомо, що тепловий шум, який визначається флуктуаційною напругою U_t в постійній смузі частот при $\Delta f = \text{const}$ має лінійну залежність від абсолютної температури T . Цей факт дає змогу зменшувати складник δ_{cmos}^t похибки δ_{cmos} , КМОП-матриці від теплового шуму відповідно до наступного формалізованого виразу:

$$T \rightarrow 0 \Rightarrow U_t \rightarrow 0: U_t = f(T), \quad (7)$$

Опорною величиною абсолютної температури T щодо джерела теплового шуму у КМОП-матриці є значення 290 К або 17 °С. Тому при експлуатації пропонуваної ППСВК для зменшення U_t температура T має бути близькою до 17 °С.

Величина корисного сигналу КМОП-матриці визначається за формулою:

$$S = \frac{U_s^2}{U_{dr}^2 + U_t^2}, \quad (8)$$

де U_s^2 – величина напруги на виході КМОП-матриці.

Таким чином, величина похибки δ_{cmos} , що вноситься КМОП-матрицею, має дві складові частини: похибку від дробового ефекту або фотонного шуму δ_{cmos}^{dr} та похибку від теплового шуму δ_{cmos}^t :

$$\delta_{cmos} = \delta_{cmos}^{dr} + \delta_{cmos}^t. \quad (9)$$

Фізична природа складників похибки δ_{cmos} вказує на її випадковий характер.

Таким чином, складниками інструментальної похибки $\Delta\varphi_I$ (див. вираз (1)) ППСВК є систематичний та випадковий складник. Систематичний складник інструментальної похибки $\Delta\varphi_I$ порівняно легко усувається в результаті використання при побудові ППСВК складників, що мають стабільні параметри (використовується матриця з розмірністю пікселів $1,0 \times 1,0$ мкм, наприклад, OV16880 або OV20880 виробництва OmniVision (США), завдяки високій роздільній здатності елементів матриць та ортогональній структурі КМОП-матриці загалом, досягається похибка вимірювання 0,1". Також як прецизійний датчик кута використовується КЛ 3.970.029 виробництва КП СПБ «Арсенал» (Україна), що має високу точність та зумовлює похибку не більше 0,1".

Випадковий складник інструментальної похибки $\Delta\varphi_I$ (див. вираз (1)) частково визначається похибками δ_{cmos}^{dr} та δ_{cmos}^t , що становлять похибку $\Delta\delta_{cmos}$ КМОП-матриці та виникають від дробового ефекту або фотонного шуму відповідно, а також похибкою, що вноситься нестабільністю швидкості обертання Землі навколо своєї осі

$(\overline{\omega_3})$ та частково визначає дрейф нуля ω_0 і масштабного коефіцієнта K КЛ. Через випадковий характер вказаних похибок усунути інструментальну похибку $\Delta\varphi_I$ ППСВК неможливо. Проте вона зменшується завдяки проведенню науково обгрунтованої кількості багаторазових вимірювань та фільтрації вихідного сигналу. Кількість багаторазових вимірювань науково обгрунтовується за відомою методикою, яка спрямована на визначення оптимальної (необхідної та достатньої) кількості вимірювань для досягнення заданої високої точності та достовірності результатів вимірювання, з огляду на часові та економічні аспекти витрат [12].

Запропонована математична модель похибки ППСВК використовується для алгоритмічної компенсації похибок вимірювання. Практична реалізація алгоритмічної компенсації похибок вимірювання ППСВК здійснюється у спеціалізованому програмному додатку ПК, що є складником ППСВК. Кінцевим результатом застосування

запропонованої математичної моделі похибки ППСВК є підвищення точності гоніометричних вимірювань величин плоского кута.

Висновки. У статті наводиться повна математична модель похибки ППСВК, що враховує нестабільні несприятливі фактори (нестабільність швидкості обертання Землі навколо своєї осі, а також виникнення теплового та дробового ефектів у структурних елементах матриці), які з'являються в процесі функціонування ППСВК як у лабораторних, так і у виробничих умовах приладо- та машинобудування.

Запропонована повна математична модель похибки ППСВК є основою алгоритмічної корекції результатів гоніометричних вимірювань, що виконується у спеціалізованому програмному додатку ПК безпосередньо в процесі експлуатації ППСВК та не потребує додаткового спеціалізованого лабораторного обладнання,

Використання запропонованої повної математичної моделі похибки ППСВК дає змогу підвищити точність гоніометричних вимірювань.

Список літератури:

1. Черепанська І.Ю., Безвесільна О.М., Сазонов А.Ю. Патент України на корисну модель 127373. Інтелектуальна система вимірювання кутів. МПК: G 01 B 21/22 (2006.01). Надр. 25.07.2018, Бюл. №14.
2. Безвесільна О.М. Алгоритмічні методи високоточного визначення лінійних прискорень. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2018. № 5(265). С. 100–105.
3. Суханов С.В. Алгоритмы компенсации погрешностей выходного сигнала лазерного гороскопа. *Вестник Нижегородского университета им. И.Н. Лобачевского*. 2011. № 3(2). С. 134–140. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-kompensatsii-pogreshnostey-vyihodnogo-signala-lazernogo-giroskopa> (дата звернення 10.01.2019)
4. Ковшов Г.Н., Живцова Л.И. Математическая модель трехосевого микромеханического акселерометра для инклинометрической системы контроля и ориентации скважин. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/matematicheskaya-model-trehosevogo-mikromehchanicheskogo-akselerometra-dlya-inklinometricheskoy-sistemy-kontrolya-i-orientatsii> (дата звернення 10.01.2019).
5. Cherepanska I., Bezvesilna E., Sazonov A., Nechai S., Pidtychenko O. Development of artificial neural network for determining the components of errors when measuring angles using a goniometric software-hardware complex. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. № 9 (95). P. 43–51.
6. Купер В.Я., Рубцов М.Г. Алгоритмические методы повышения точности измерений на основе обратных интерполяционных моделей. *Вестник Самарского государственного технического университета*. 2010. № 3(28). С. 67–72.
7. Дорожкин А.Д., Джусь О.А. Анализ методов повышения точности и надежности данных о параметрах движения аэродинамического летательного аппарата. *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 3. URL: www.science-education.ru/ru/article/view?id=13610 (дата звернення 10.01.2019)
8. Павлов П.А. Анализ алгоритмов измерений лазерным динамическим гониометром. *Измерительная техника*. 2008. № 1. С. 17–20.
9. Цибизова Т.Ю., Нгуен Д.Т. Алгоритмические способы коррекции навигационных систем в выходном сигнале. *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2015. № 3 (7). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/162TVN315.pdf>. DOI: 10.15862/162TVN315 (дата звернення 16.06.2020)
10. Черепанська І.Ю., Безвесільна О.М., Сазонов А.Ю. Алгоритмічна корекція результатів вимірювання прецизійної приладової гоніометричної системи. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського* Серія: Технічні науки. 2019. № 2. Том 30 (69). С. 6–11.
11. Безвесільна О.М. Автоматизований прецизійний пристрій для вимірювання кутів : Монографія. Житомир: ЖДТУ, 2010. 258 с.
12. Cherepanska I., Bezvesilna E., Sazonov A., Nechai S., Khylichenko T. The procedure for determining the number of measurements in the normalization of random error of an information-measuring system with elements of artificial intelligence. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. № 5/9 (89). P. 58–67.

Cherepanska I.Yu., Bezvesilna O.M., Sazonov A.Yu., Brodskiy Yu.B., Priadko V.A. MATHEMATICAL MODEL OF ERROR OF A PRECISION INSTRUMENTAL ANGLE MEASUREMENT SYSTEM

Complete mathematical of the precise instrument system of angles' measurement (PISAM) is shown in the paper. It is obtained by improving of well-known basic mathematical model of the error of goniometric system GSIL, which is the prototype PISAM. Complete mathematical model of the error of PISAM include instability of Earth rotation velocity regarding its axis and voltage fluctuations which occurred in CMOS as a part of PISAM due to the presence of thermal and fractional effects that occur in its structural elements. Instability of the Earth's rotation velocity around its axis, as well as thermal and fractional effects that occur in the structural elements of the CMOS matrix are unfavorable factors that occur in both laboratory and industrial conditions, such as precision instrumentation and engineering and significantly reduce accuracy. In addition, the need to build a complete mathematical model of PISAM error is due to the synergistic integration in its structure of new technical means of automation- photosensitive CMOS-matrix and artificial neural networks (in the case of the latter in the form of neuroprocessors), as well as the use of a precision sensor which is sensitive to the instability of the Earth's speed. The proposed complete mathematical model of PISAM error is used to calculate the error values of goniometric measurements with the subsequent algorithmic correction of measurement results during the operation of PISAM. The advantages of the proposed complete mathematical model of PISAM error are that it systematically takes into account the features of PISAM components and allows further correction of measurement results in dynamic mode directly during the operation of PISAM without the use of specialized laboratory equipment. The practical implementation of this is carried out in a specialized software application, which is part of PISAM.

Key words: *error, goniometric system, algorithmic correction, systematic error, random error, fluctuation voltages, fractional effect, thermal effect.*

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391.8

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/04>**Михалевський Д.В.**

Вінницький національний технічний університет

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ КАНАЛІВ СТАНДАРТУ 802.11 НА ОСНОВІ КВАДРАТИЧНОЇ ФУНКЦІЇ

Аналіз сучасного стану досліджень безпроводних мереж стандартів 802.11 показав, що наявні моделі та методи оцінки ефективності каналів мають низку недоліків. Найголовніші з них – проблема вибору кількості дестабілізуючих факторів та складність визначення початкових умов. У цій роботі ця проблема вирішується на основі використання результатів емпіричних досліджень безпроводних каналів сімейства стандартів 802.11х із мінімальним впливом інтерференційних і шумових завад та багатопроменевого поширення хвиль.

На основі проведених експериментальних досліджень було запропоновано модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на базі квадратичної функції регресії основного енергетичного параметра як базової для побудови просторових моделей з урахуванням максимально можливої кількості дестабілізуючих факторів. Така модель дає можливість оцінювати ефективну швидкість передачі інформації для будь-якого каналу стандарту 802.11 довжиною до 40 м у приміщенні. Перевагою такої моделі є використання відносно простих та доступних операцій вимірювання енергетичного параметра, які виконуються апаратно-програмними засобами абонентського обладнання із використанням алгоритмів моніторингу. Рівень адекватності такої моделі залежить від достовірності параметрів статистичного зв'язку для основних параметрів каналу та достовірності вимірювання діагностичного параметра пристроєм, за допомогою якого виконується оцінювання ефективної швидкості передачі інформації.

Дослідження отриманої моделі показали її ефективність та особливості використання у разі врахування дестабілізуючих факторів. Рівень впливу дестабілізуючих факторів можна оцінити на основі інтервалів флуктуацій. З одного боку, для попередньої оцінки ефективності безпроводного каналу для передачі певних видів трафіку по всій довжині каналу можна застосовувати флуктуації сигналу. Це здебільшого дасть похибку оцінки, що не перевищить 3 Мб/с, або покаже меншу ефективність каналу ніж реальна. З іншого боку, для підвищення достовірності оцінки необхідно враховувати флуктуації ефективної швидкості передачі інформації. У такому разі необхідно мати наперед визначену базу даних можливих флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації від впливу дестабілізуючих факторів.

Ключові слова: безпроводний канал, стандарт 802.11, ефективна швидкість передачі інформації, потужність сигналу, квадратична функція, статистичний зв'язок.

Постановка проблеми. Найбільш достовірним підходом до оцінювання параметрів безпроводних каналів є створення моделей та методів на базі емпіричних досліджень та статистичних зв'язків. Як відомо [1], безпроводне середовище, в якому працюють канали сімейства стандартів 802.11, характеризується досить великою кількістю різноманітних дестабілізуючих факторів, які мають вплив на основні показники ефективності. Враховуючи, що у технічній діагностиці безпроводних каналів стандарту 802.11 основними діагностичними параметрами є потужність

сигналу на вході приймача та ефективна швидкість передачі інформації, то наявні дослідження можна поділити на дві групи.

До першої групи досліджень можна віднести роботи з виявлення впливу дестабілізуючих факторів на основний енергетичний параметр [2–6], де встановлено наявність значних флуктуацій, залежність енергетичного параметра від конкретного виробника обладнання через різні частоти квантування та дискретизації, чутливості, положення у просторі та довжини каналу, особливості використання частотного діапазону. До другої

групи можна віднести дослідження факторів, що впливають на пропускну здатність каналу. Для прикладу, можна навести роботи [7–9], де розглянуто питання правильної роботи технології CSMA/CD та синхронізації MAC підрівня, вплив ширини смуги каналу та кількості абонентів у мережі.

Крім того, окремо можна виділити роботи, що пов'язані із моніторингом параметрів безпроводних мереж [10–11]. На основі досліджень встановлено, що використання апаратно-програмних можливостей мобільних пристроїв може бути альтернативою спектр оаналізаторам, коли немає необхідності отримати повну інформацію про спектр, а для отримання достатньої швидкості завантаження інформації необхідно забезпечити рівень сигналу 60 дБм.

Аналізуючи наявні результати досліджень, можна сказати, що проблема врахування різних типів дестабілізуючих факторів залишається відкритою. Крім того, для наявних моделей та методів є проблема вибору кількості дестабілізуючих факторів та складність визначення початкових умов. Таким чином, розробка ефективних моделей оцінювання основних параметрів каналу, які б були відносно простими у використанні та враховували недоліки наявних досліджень, є актуальною.

Постановка завдання. Для зменшення впливу дестабілізуючих факторів у операціях технічної діагностики на етапах проектування та експлуатації мереж необхідно встановити їх вплив на основні діагностичні параметри. Вплив таких факторів розглянемо з точки зору статистичного зв'язку, який можна отримати з емпіричних досліджень безпроводних каналів стандарту 802.11. Тоді достовірність діагностики та методів оцінювання параметрів каналів буде залежати від ступеня адекватності емпіричних моделей та моделей впливу дестабілізуючих факторів.

До основних діагностичних параметрів можна віднести потужність сигналу на вході приймача P_{RX} та ефективну швидкість передачі інформації V_{ef} , які є взаємопов'язаними і визначають критерій ефективності. Оскільки параметр P_{RX} досить просто вимірювати за допомогою алгоритмів моніторингу [1], а V_{ef} є основним для додатків прикладного рівня, то на основі статистичного зв'язку між ними можна отримати модель оцінювання ефективної швидкості передачі.

Метою статті є розробка моделі оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на

базі квадратичної функції потужності сигналу як основної для побудови просторових моделей з урахуванням максимально можливої кількості дестабілізуючих факторів.

Виклад основного матеріалу досліджень. З огляду на дослідження у роботі [12] наближену модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на базі статистичного зв'язку між основними параметрами каналу можна записати так:

$$V_{ef}(P_{RX}) \approx KP_{RX} + S_0, \quad (1)$$

де K і S_0 – коефіцієнти лінійної регресії статистичного зв'язку між параметрами P_{RX} та V_{ef} .

На основі аналізу робіт [13–15] можна дійти висновку, що затухання сигналу у каналах довжиною до 16 м у разі усереднення має лінійну модель. Але у приміщеннях є ефект багатопроменевого поширення хвиль, що є основною причиною виникнення міжсимвольної інтерференції. Цей ефект можна спостерігати під час емпіричних досліджень як флуктуації характеристик основних параметрів каналу. Близько 3–4 м біля стін приміщення такі флуктуації збільшуються, в результаті чого лінійна модель їх не враховує. Але якщо застосувати квадратичну регресійну функцію параметра P_{RX} та відповідні межі, то загальна модель цей ефект врахує.

Тоді потужність сигналу на вході приймача для каналів довжиною до 40 м параметр P_{RX} можна розрахувати так:

$$P_{RX}(l) \approx a_1 l^2 + a_2 l + P_0. \quad (2)$$

a_1 , a_2 – коефіцієнти затухання сигналу; P_0 – початковий рівень.

Коефіцієнти a_1 і a_2 визначаються експериментально із характеристик розподілу потужності сигналу за довжиною каналу, які можна записати так:

$$a_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{1,i} \pm \Delta a_1, \quad a_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{2,i} \pm \Delta a_2,$$

де n – кількість отриманих характеристик для досліджуваних стандартів; Δa_1 , Δa_2 – коефіцієнти, які визначають межі допустимого відхилення середньостатистичного значення, та рівень флуктуацій максимумів і мінімумів просторового розподілу потужності сигналу.

Для врахування статичних та випадкових дестабілізуючих факторів виразимо початковий рівень через вимірювальне значення потужності сигналу P_m [15]. Вимірювання здійснюється на основі усереднення результатів оцінки на каналному рівні приймального пристрою. Результат можна записати так:

$$P_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i,$$

де P_i – вимірювальне значення за одиницю часу; n – кількість вимірів для отримання необхідної достовірності оцінки.

Нехтуючи максимумом випромінювання та вимірюючи P_m на відстані 2 м від точки доступу, використовуючи вираз (2), можна розрахувати початкове значення потужності сигналу:

$$P_0 = P_m - 4a_1 - 2a_2. \quad (3)$$

Тоді, підставляючи (3) і (2) у (1), отримаємо:

$$V_{ef} \approx K(a_1(l^2 - 4) + a_2(l - 2) + P_m) + S_0. \quad (4)$$

Отримана модель дає можливість оцінювати ефективну швидкість передачі інформації для

будь-якого каналу стандарту 802.11 довжиною до 40 м у приміщенні в умовах прямої видимості із мінімальною кількістю відбиваючих поверхонь. Особливістю такої моделі є використання відносно простих та доступних операцій вимірювання енергетичного параметра, які виконуються апаратно-програмними засобами абонентського обладнання із використанням алгоритмів моніторингу. Рівень адекватності такої моделі залежить від двох складників: достовірності вимірювання експериментальних характеристик, на основі яких отримані коефіцієнти регресії K і S_0 , та достовірності вимірювання параметра P_m пристроєм, за допомогою якого виконується оцінювання ефективної швидкості передачі інформації.

Для перевірки отриманої моделі виконане математичне моделювання для каналів 802.11n

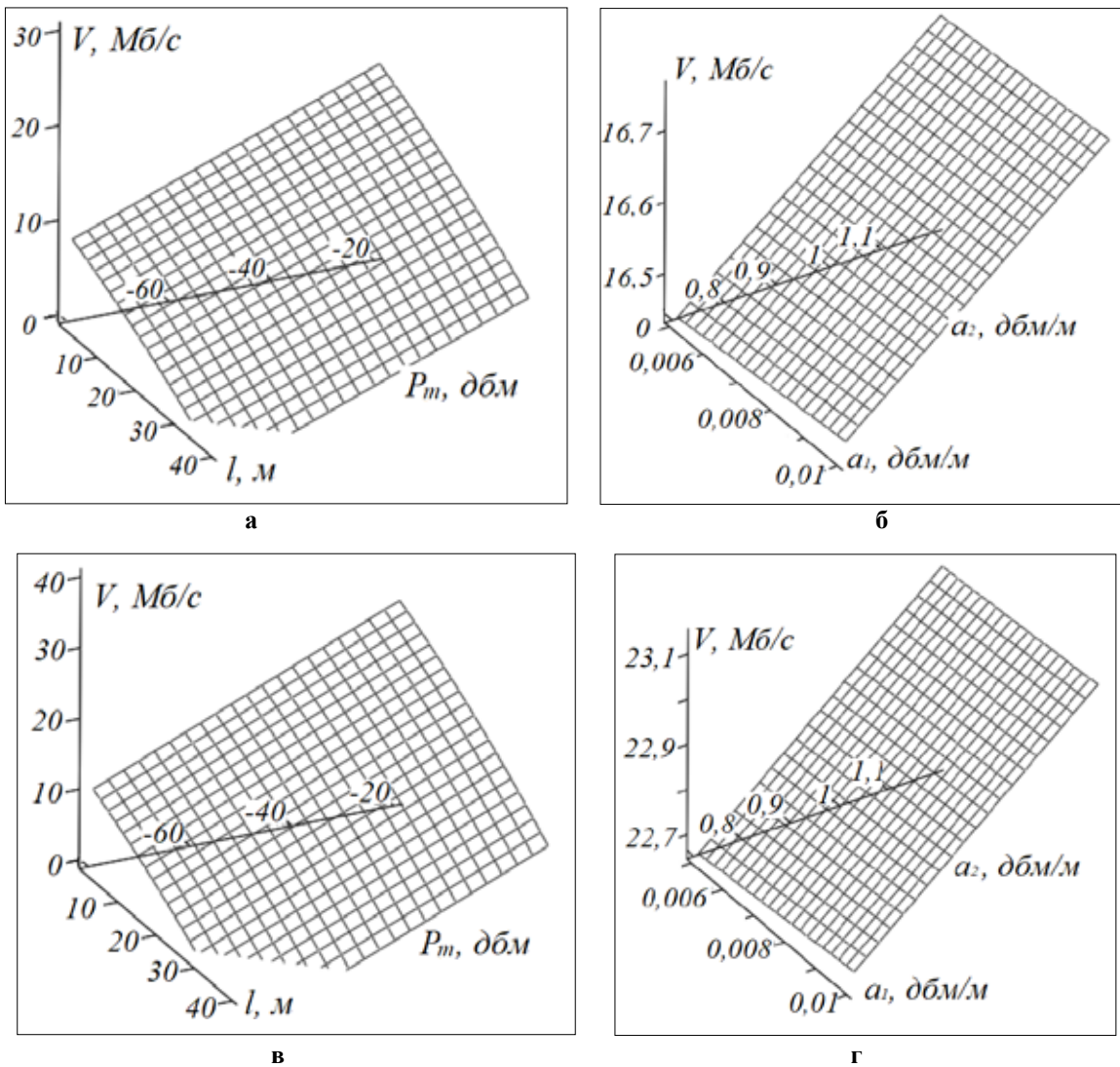


Рис. 1. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від: а – вимірювального значення потужності сигналу для стандарту 802.11n; б – коефіцієнтів затухання сигналу для стандарту 802.11n; в – вимірювального значення потужності сигналу для стандарту 802.11ac; г – коефіцієнтів затухання сигналу для стандарту 802.11ac

діапазону 2,4 ГГц та 802.11ac зі смугою каналу 40 МГц. Результати наведено на рис. 1.

Як видно із графіків на рис. 1, використовуючи модель (4), можна прогнозувати ефективну швидкість передачі інформації для кожного абонента індивідуально, враховуючи наявні у поточний момент усі дестабілізуючі фактори, параметри обладнання та його розташування у просторі. Комплексний вплив дестабілізуючих факторів враховується на основі параметра P_m .

Рівень впливу дестабілізуючих факторів можна оцінити на основі інтервалів флуктуацій ΔV і ΔP [13–14]. Тоді на основі моделі (4) можна розглянути два випадки, які можна записати так:

$$V_{ef} \approx K(a_1(l^2 - 4) + a_2(l - 2) + P_m \pm \Delta P) + S_0.$$

$$V_{ef} \approx K(a_1(l^2 - 4) + a_2(l - 2) + P_m) + S_0 \pm \Delta V.$$

Для визначення оптимального варіанту було проведено математичне моделювання, результати якого наведені на рис. 2.

Отже, як видно з отриманих графіків, різниця кінцевого результату оцінювання у разі використання параметрів ΔV і ΔP може становити до 3 Мб/с та до 5 м для довжини каналу. З урахуванням результатів робіт [13–14] така похибка може збільшитись у 2–3 рази залежно від кількості об'єктів у приміщенні та наявності архітектурних перешкод, де флуктуації потужності можуть досягати до ± 15 дБм. Тому в такому разі виникає двояка ситуація. З одного боку, для попередньої оцінки придатності безпроводного каналу до передачі певних видів трафіку по всій довжині каналу можливо застосовувати флуктуації сигналу ΔP .

Це здебільшого дасть похибку оцінки, що не перевищить 3 Мб/с, або покаже меншу ефективність каналу ніж реальна. З іншого боку, для підвищення достовірності оцінки необхідно використовувати параметр ΔV , але при цьому необхідно мати наперед визначену базу даних можливих флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації від впливу дестабілізуючих факторів.

З урахуванням статистичного аналізу для параметрів ΔV і ΔP можна отримати такі співвідношення між різновидами стандартів:

$$\Delta V_{ac80} \approx 1,6\Delta V_{ac40} \approx 2\Delta V_{ac20} \approx 2\Delta V_{n40}^5 \approx 6,7\Delta V_{n20}^5 \approx 2\Delta V_{n40}^{2,4} \approx \Delta V_{n40}^{2,4} \approx 13,4\Delta V_{n20}^{2,4} \approx 10\Delta V_g \approx 20\Delta V_a,$$

$$\Delta P_{ac80} \approx 1,5\Delta P_{n40}^{2,4} \approx 1,5\Delta P_{n40}^5 \approx 2\Delta P_a.$$

Отримані співвідношення показують більший рівень флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації в діапазоні 2,4 ГГц стосовно діапазону 5 ГГц. Також флуктуації збільшуються у новіших стандартах та із розширенням смуги каналу. Для потужності сигналу рівень флуктуації є досить схожим для всіх стандартів, для прямої видимості найбільша різниця між стандартами 802.11a та 802.11ac, але це входить у межі флуктуацій ± 5 дБм, що має мінімальний вплив на ΔV .

Висновки. У роботі запропоновано модель для оцінювання ефективної швидкості передачі інформації на базі квадратичної функції потужності сигналу як основної для побудови просторових моделей з урахуванням максимально-можливої кількості дестабілізуючих факторів, що може використовуватись для операції тех-

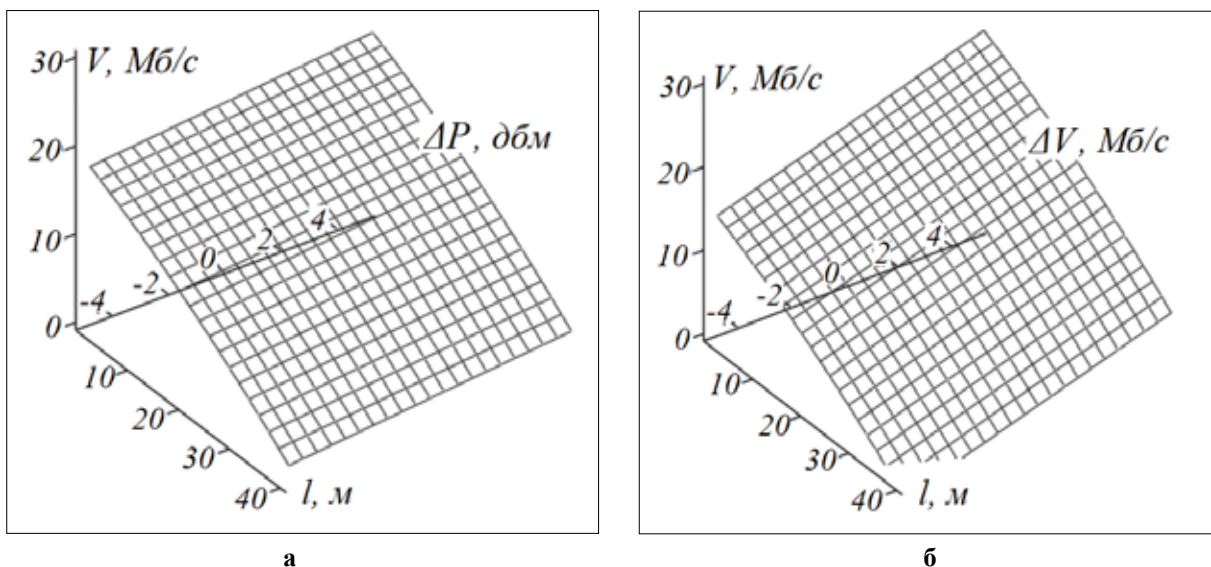


Рис. 2. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від: а – флуктуацій сигналу; б – флуктуацій ефективної швидкості передачі інформації

нічної діагностики на етапах проектування та експлуатації мереж. На основі математичного моделювання було визначено умови використання інтервалів флуктуацій діагностичних параметрів та їх зв'язок від типу стандарту.

Крім того, застосовуючи наперед відому базу коефіцієнтів статистичного зв'язку, оцінювання можна одночасно здійснювати для всіх стандартів як наявних, так і майбутніх, розширюючи базу даних.

Список літератури:

1. Mykhalevskiy D., Vasylyukivskiy N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 4/9 (88). Pp. 38–43. 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.
2. Chapre Y., Mohapatra P., Jha S., Seneviratne A. Received Signal Strength Indicator and Its Analysis in a Typical WLAN System. *38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, pp. 304–307. 2013. DOI: 10.1109/LCN.2013.6761255.
3. Soldo I., Malarić K. Wi-Fi Parameter Measurements and Analysis. *Proceedings of the 9th International Conference (Measurement 2013)*, pp. 339–342. 2013.
4. Foster K. Radiofrequency exposure from wireless LANs utilizing Wi-Fi technology. *Health Physics*. In press, pp. 280–289. 2013. DOI: 10.1097/01.HP.0000248117.74843.34.
5. Davies J.N., Grout V. and Picking R. Prediction of Wireless Network Signal Strength within a Building. *Proceedings of the 7th Int. Network Conference (Inc 2008) UK*. Pp. 193–207. 2008.
6. Laitinen E., Talvitie J., Lohan E.S. On the RSS biases in WLAN-based indoor positioning. ANLN Workshop at ICC, pp. 1–6. 2015. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2015.7414038.
7. Kai C., Liew S.C. Towards a more accurate carrier sensing model for CSMA wireless networks. *IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6. 2010. DOI: 10.1109/ICC.2010.5502695.
8. Liang L., Wang W., Jia Y., Fu S. A cluster-based energy-efficient resource management scheme for ultra-dense networks. V. 4, pp. 6823–6832. 2016. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2614517.
9. Deek L., Garcia-Villegas E., Belding E., Lee S. J., Almeroth K. The Impact of Channel Bonding on 802.11n Network Management. *CoNEXT'11 Proceedings of the Seventh Conference on emerging Networking Experiments and Technologies Article*, No. 11. 2011. DOI: 10.1145/2079296.2079307.
10. Rathod K., Vatti R., Nandre M. Optimization of Campus Wide WLAN. *International Journal of Electrical Electronics & Computer Science Engineering*, V. 4, I. 5, pp. 1–6. 2017.
11. Sârbu A., Sârbu M., Şumălan C. Non Wi-Fi Devices Interference Testing in a 2.4 GHz Wi-Fi Home. *Land Forces Academy Review*, Vol. 23, I. 2(90), pp. 143–150. 2018. DOI: <https://doi.org/10.2478/raft-2018-0017>.
12. Михалевський Д.В. Розробка математичних моделей оцінювання ефективної швидкості передачі інформації у просторі приміщень для безпроводних каналів стандарту 802.11. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 110–115. 2020. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-148-1-110-115>.
13. Mykhalevskiy D.V. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*, No. 1, pp. 41–51. 2019. DOI: 10.2478/lpts-2019-0004.
14. Mykhalevskiy D.V., Horodetska O.S. Investigation of wireless channels according to the standard 802.11 in the frequency range of 5 GHz for two subscribers. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERE)*, No. 42(2), pp. 50–57. 2019. DOI: 10.26480/jmerd.02.2019.50.57.
15. Mykhalevskiy D. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the input to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 6/9 (96), pp. 16–21. 2018. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983.

Mykhalevskiy D.V. DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ASSESSING THE EFFECTIVE DATA RATE FOR CHANNELS OF STANDARD 802.11 BASIS ON A QUADRATIC FUNCTION

An analysis of existing studies of 802.11 standard wireless networks has shown that existing models and methods for assessing the channel performance have several disadvantages. The main ones are the problem of choosing the number of destabilizing factors and the difficulty of determining the initial conditions. In this paper, this problem is solved on the basis of the results of experimental studies of wireless channels of the 802.11x standard family with minimal influence of interference and noise interference and multipath propagation of waves.

Based on experimental studies, a model for estimating the effective data rate based on the quadratic regression function of the main energy parameter was proposed as a basis for building spatial models taking into account the maximum possible number of destabilizing factors. The proposed model makes it possible to estimate the effective data rate for any channel of the 802.11 standard with a length of up to 40 m indoors. The advantage of such a model is the use of relatively simple and affordable operations for measuring the energy

parameter, which are performed by hardware and software of the subscriber equipment using monitoring algorithms. The level of adequacy of such a model depends on the reliability of the statistical communication parameters for the main parameters of the channel and the reliability of the measurement of the diagnostic parameter by the device used to assess the effective data rate.

Studies of the obtained model have shown its effectiveness and features of use taking into account destabilizing factors. The level of influence of destabilizing factors can be estimated on the basis of fluctuation intervals. On the one hand, it is possible to use signal fluctuations to pre-evaluate the efficiency of a wireless channel to transmit certain types of traffic along the entire length of the channel. In most cases, this will give an estimate error of no more than 3 Mbps, or show less channel efficiency than the actual one. On the other hand, to increase the reliability of the assessment, it is necessary to take into account fluctuations in the effective speed of information transfer. In this case, it is necessary to have a predetermined database of possible fluctuations in the effective speed of information transfer from the influence of destabilizing factors.

Key words: *wireless channel, 802.11 standard, effective data rate, signal power, quadratic function, correlation function, statistical relationship.*

УДК 621.396.946: 004.042

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/05>**Новіков В.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лисенко О.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Тачиніна О.М.**

Національний авіаційний університет

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**МЕТОДИКА СИНТЕЗУ АЛГОРИТМУ ЦИФРОВОГО
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПОВІТРЯ
В САЛОНІ МОБІЛЬНОГО ЦЕНТРУ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
ЛІТАЮЧОЇ (ПОВІТРЯНОЇ) СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ**

Стаття присвячена розробці методики синтезу алгоритму цифрового автоматичного керування температурою повітря в салоні мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі. Для підтримки заданого значення температури пропонується застосовувати цифрову систему автоматичного керування, що забезпечить номінальний режим функціонування мобільного центру обробки інформації. У роботі вибрано прототип цифрової системи автоматичного керування і вивчено принцип його дії. Побудовано комп'ютерну математичну модель прототипу і досліджено на моделі його властивості, що показало виникнення додаткових перехідних процесів, які можуть негативно вплинути на роботу мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі. Виконано вдосконалення прототипу шляхом застосування цифрового закону керування, який побудовано на основі цифрового пропорційно-інтегрального регулятора. Налаштовано цифровий пропорційно-інтегральний регулятор із використанням методу Зіглера-Ніколса. Виконано порівняльний комп'ютерний експеримент (імітаційне моделювання) прототипу та вдосконаленої системи керування. Завдяки використанню цифрової системи автоматичного керування, що побудована на основі алгоритму цифрового пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання (ЦПІД-регулятор), вдалося зменшити майже на 30% тривалість перехідного процесу та уникнути додаткових коливань у цьому процесі. Таке покращення якості регулювання температури повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі створює умови для підвищення надійності функціонування цього центру. Подальшого покращення якості роботи ЦСАК температурою повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації можна досягти завдяки побудові адаптивної ЦСАК.

Ключові слова: мобільні сенсори, сенсорні мережі, цифрова система автоматичного керування, цифровий пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор, метод Зіглера-Ніколса.

Постановка проблеми. Мобільні сенсорні мережі являють собою сукупність малопотужних, порівняно недорогих і компактних приладів, частина з яких забезпечена сенсорами або іншими джерелами інформації, які включені в деяке фізичне оточення і об'єднані за допомогою радіоканалу. Область покриття таких мереж може становити від кількох квадратних метрів до кількох квадратних кілометрів завдяки ретрансляції повідомлень від одного елемента мережі до іншого [11].

З розвитком технологій мобільні сенсорні мережі дедалі частіше використовуються для моніторингу різних типів даних: у системах безпеки, контролю конструкцій, параметрів навколишнього середовища, для відслідковування цілей під час бойових дій. У таких системах ці дані фіксуються мультисенсорами, які входять до складу вузлів, що розташовуються в необхідних для моніторингу точках. Ці дані передаються по мобільній мережі в центральний вузол для обробки і подальшого прийняття рішення.

Літаюча (повітряна) сенсорна мережа з мобільним центром обробки інформації призначена для застосування в зоні надзвичайної ситуації, де можливі значні зовнішні температурні впливи [5; 8].

Постановка завдання. Для прецизійної підтримки заданого значення температури повітря в салоні (приміщенні), де розташовано обладнання для обробки і зберігання інформації, пропонується застосувати цифрову систему автоматичного керування [1]. Це дасть змогу забезпечити номінальний режим функціонування мобільного центру обробки інформації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для синтезу алгоритму цифрового автоматичного керування температурою повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі пропонується застосувати методику, згідно з якою необхідно:

- 1) обрати прототип ЦСАК і вивчити принцип його дії;
- 2) побудувати комп'ютерну математичну модель прототипу і дослідити на моделі його властивості;
- 3) виконати вдосконалення прототипу шляхом застосування цифрового закону керування, який побудовано на основі цифрового пропорційно-інтегрального регулятора (ЦПІД-регулятора);

4) налаштувати ЦПІД-регулятор із використанням методу Зіглера-Ніколса;

5) виконати порівняльний комп'ютерний експеримент (імітаційне моделювання) прототипу та вдосконаленої системи керування.

Виконання пунктів методики

1. Як прототип системи використаємо аналогову систему терморегулювання, спрощена принципова схема якої показана на рис. 1. Робота системи полягає в наведеному далі. Мостова схема разом із чутливим елементом (R_{tr}) виконує функцію датчика температури T_c у салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації, тобто датчика первинної інформації (ДПІ). Якщо температура повітря T_c дорівнює заданій T_{co} , то міст збалансовано. У разі відхилення температури повітря T_c у салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації від температури T_{co} , яка задається за допомогою R_{co} , з мосту знімається напруга, величина і знак якої залежать від величини та знаку відхилення температури. Після посилення сигнал подається на двигун постійного струму (ДПС), який обертає вентилятори, що подають гаряче чи холодне повітря в салон (приміщення) мобільного центру обробки інформації і міст збалансовується завдяки зміні опору R_{tr} .

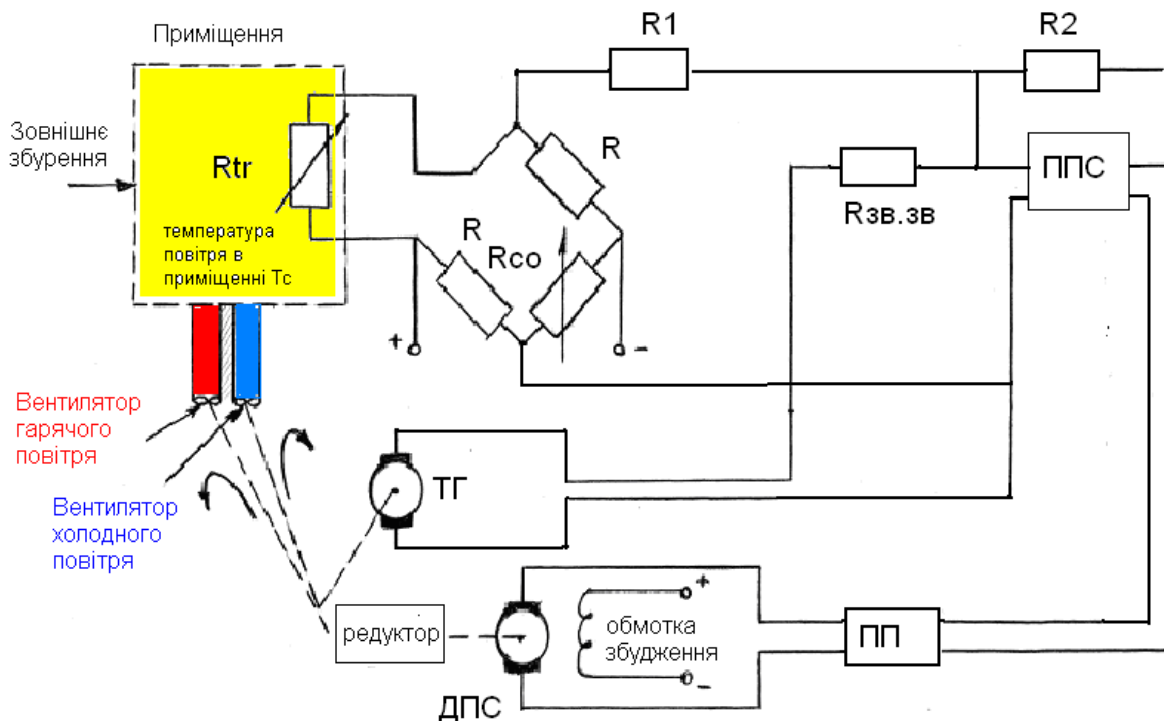


Рис. 1. Спрощена принципова схема аналогової системи автоматичного керування температурою повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі: ППС – підсилювач постійного струму; ПП – підсилювач потужності; ДПС – двигун постійного струму; R – редуктор; вентилятори гарячого і холодного повітря обертаються назустріч один одному; ДПІ – датчик первинної інформації; ТГ – тахогенератор, який виконує функцію жорсткого зворотного зв'язку

2. Структурна схема математичної моделі аналогової (неперервної) системи автоматичного керування має два контури: зовнішній, який забезпечує зворотний зв'язок за температурою, та внутрішній, який забезпечує коригуючу дію за допомогою сигналу, що є пропорційним швидкості обертання ротора ДПС (тобто внутрішній зворотний зв'язок – це жорсткий зворотний зв'язок (див. рис. 2)).

Припустимо, що математичні моделі ДПІ, ППС, ПП, ДПС, ТГ, ОК, які є складниками структурної схеми (рис. 2), представлені передавальними функціями вигляду відповідно [1]:

$$W_{dpi}(s) = \frac{1}{0.001s + 1}; W_{pps}(s) = \frac{5}{0.01s + 1};$$

$$W_{pp}(s) = \frac{2}{0.03s + 1};$$

$$W_{dps}(s) = \frac{1}{0.04s^2 + 1.3s + 1}; W_{tg}(s) = 1; W_{ok}(s) = \frac{5}{7s + 1}.$$

Комп'ютерна математична модель, яка побудована з використанням системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink [2–4], представлена на рис. 3.

Перехідний процес, який відображає зміну в часі температури повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі, представлено на рис. 4.

Результати моделювання показують, що в разі зміни заданої температури в системі виникають «додаткові» перехідні процеси, що може негативно вплинути на роботу мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі. Виконаємо вдосконалення системи терморегулювання повітря завдяки використанню ЦПД-регулятора.

3. Вдосконалена завдяки використанню ЦПД-регулятора структурна схема математичної моделі системи терморегулювання повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі, представлена на рис. 5.

Комп'ютерна математична модель ЦСАК температурою повітря, яка побудована із використанням системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink, представлена на рис. 6.

4. Налаштування K_{ps} , K_{is} , K_{dc} – коефіцієнтів передачі цифрового сигналу ЦПД-регулятора виконаємо з використанням методу Зіглера-Ніколса [6; 7; 9; 10].

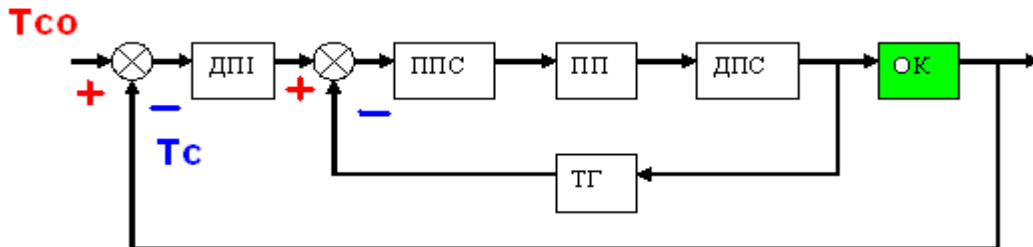


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі аналогової (неперервної) системи автоматичного керування – системи, яка обрана прототипом для побудови ЦСАК

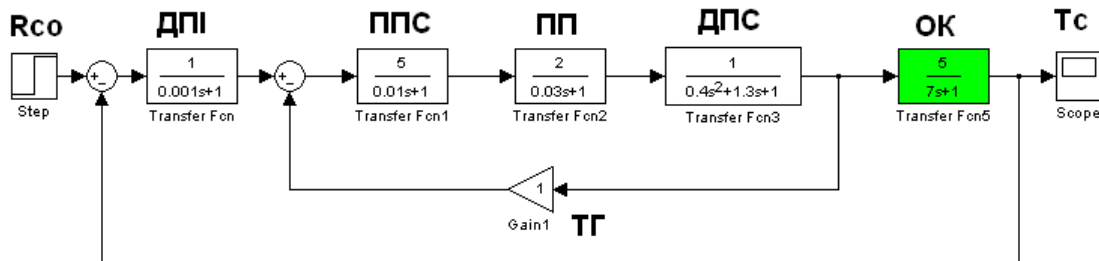


Рис. 3. Комп'ютерна математична модель аналогової системи автоматичного керування, яка вибрана прототипом для побудови ЦСАК: R_{co} позначає резистор, зміна опорів якого задає бажану температуру; осцилограф, який позначено T_c , дає змогу спостерігати перехідний процес зміни температури повітря

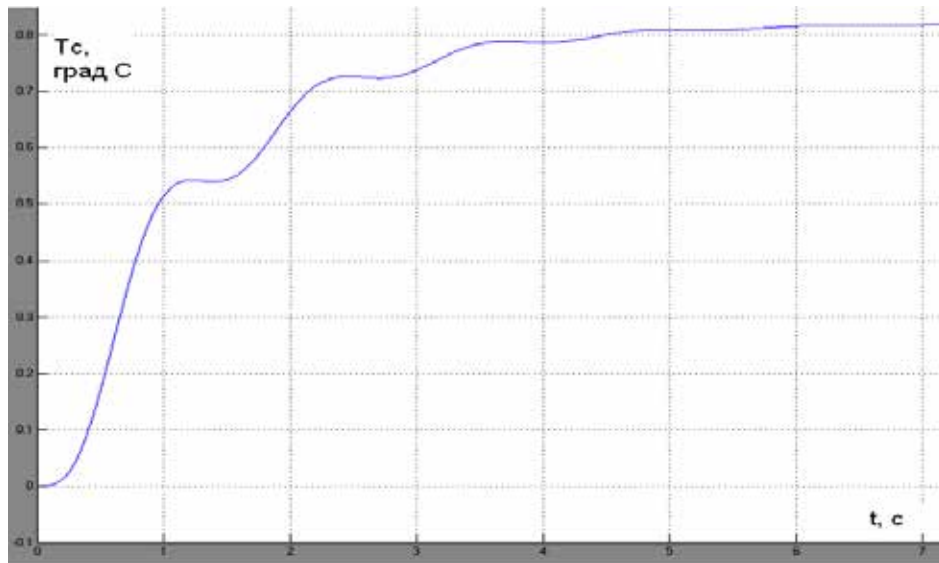


Рис. 4. Результат комп'ютерного моделювання перехідного процесу в системі терморегулювання, яка вибрана як система-прототип

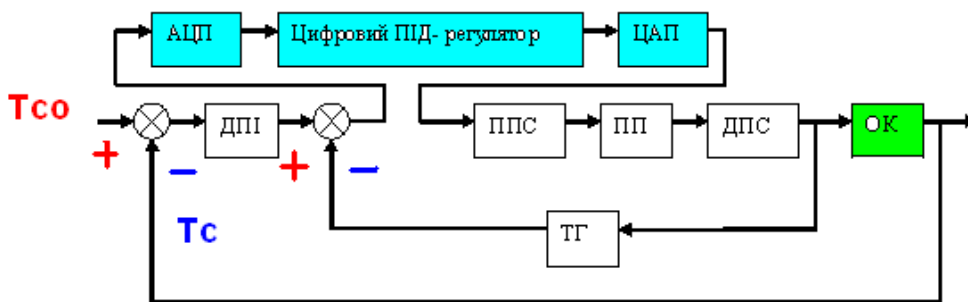


Рис. 5. Структурна схема математичної моделі ЦСАК температурою повітря

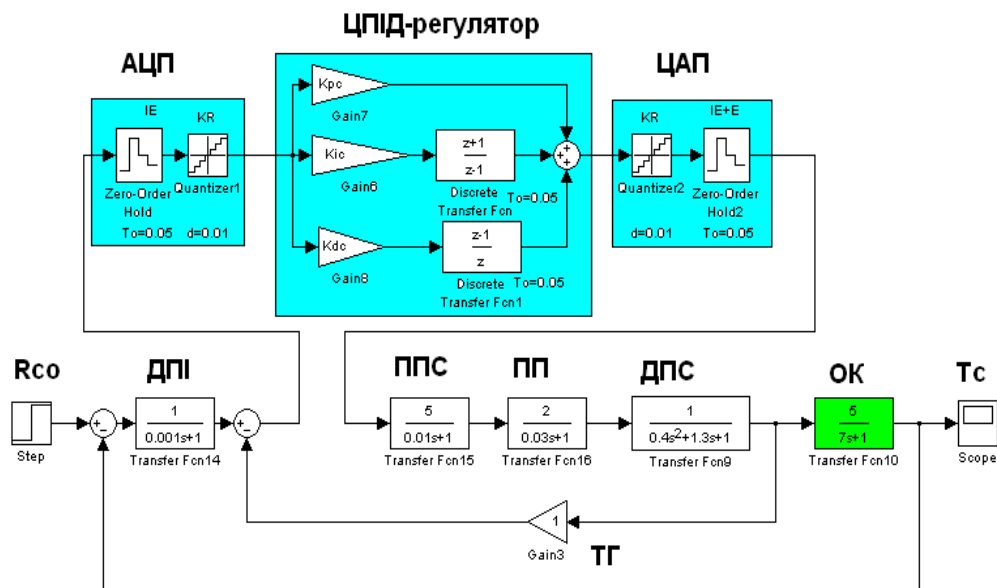


Рис. 6. Комп'ютерна математична модель ЦСАК, яка побудована з використанням цифрового пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (ЦПІД-регулятора): Крс, Кіс, Кдс – коефіцієнти передачі цифрового сигналу в каналах пропорційному, інтегральному та диференціальному відповідно

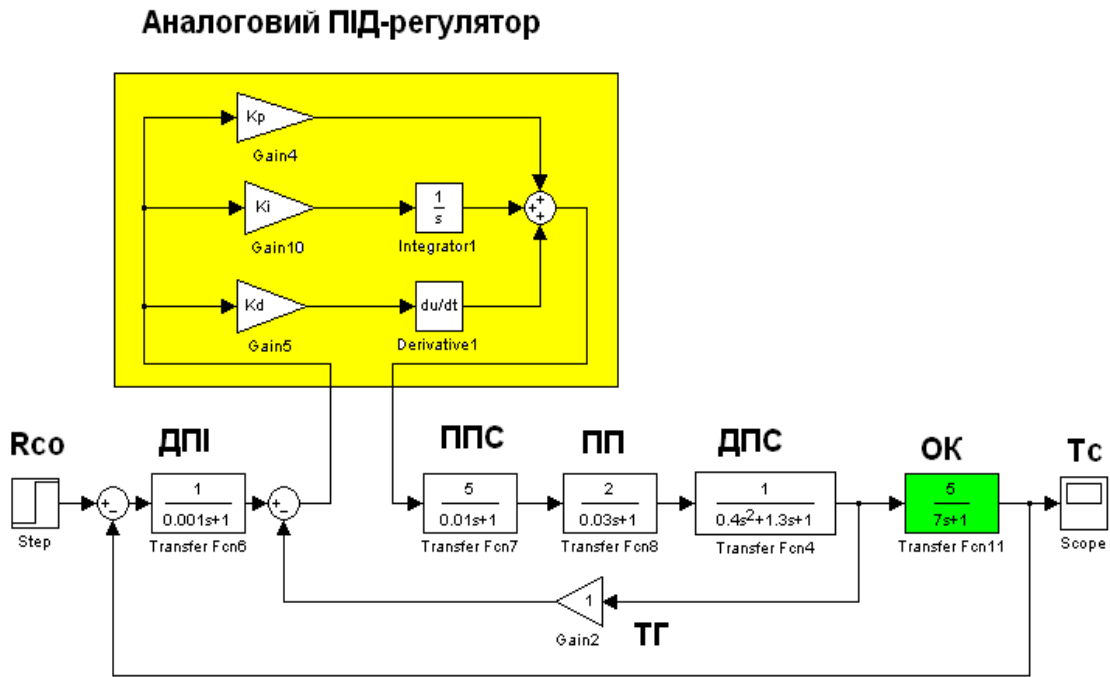


Рис. 7. Комп'ютерна математична модель аналогової (неперервної) САК температурою повітря, яка використовується для налаштування ПІД-регулятора

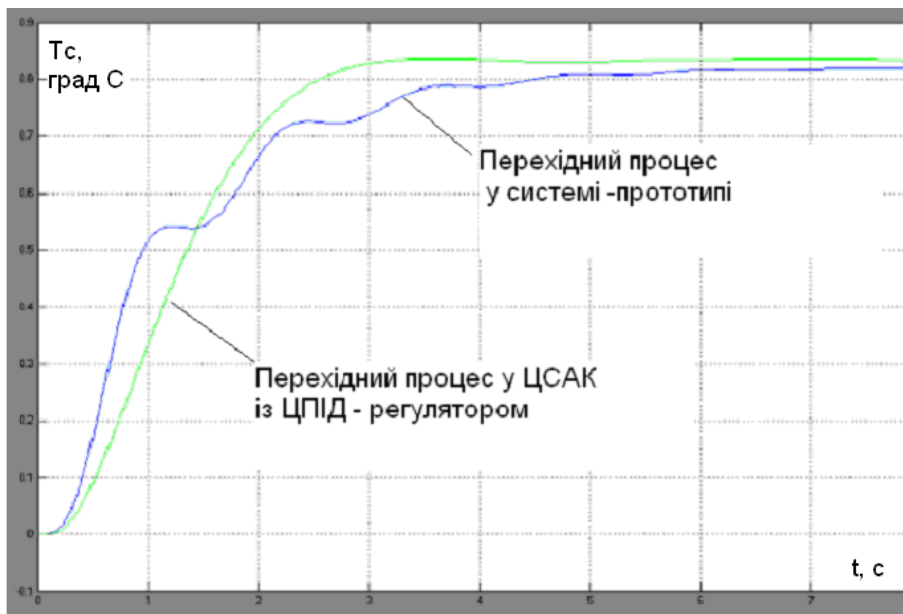


Рис. 8. Результати порівняльного комп'ютерного експерименту

Етапи методу

1. Побудувати комп'ютерну математичну модель аналогової (неперервної) САК температурою повітря з аналоговим ПІД – регулятором (див. рис. 7).

2. Встановити значення коефіцієнтів аналогового ПІД – регулятора $K_i = 0$, $K_d = 0$, а величину коефіцієнта K_p , починаючи з $K_p = 1$, змінювати до того значення K_0 , при якому система стане коли-

вальною і можна виділити приблизно 5–7 точок перетину графіку перехідного процесу зі сталим рівнем.

3. При $K_p = K_0$ необхідно виміряти за графіком перехідного процесу період коливаний цього процесу. Позначимо цей період P_0 .

4. Обчислити раціональні значення коефіцієнтів аналогового та цифрового ПІД-регуляторів (див. табл. 1).

У результаті комп'ютерного моделювання отримано: $K_0 = 2$, $P_0 = 2$ с.

Таблиця 1

Формули для обчислення раціональних (прийнятних) значень коефіцієнтів аналогового та цифрового ПІД-регуляторів

Аналоговий ПІД-регулятор	Цифровий ПІД-регулятор
$K_p = 0,6 * K_0$	$K_{pc} = 0,6 * K_0$
$K_i = 1,2 * (K_0 / P_0)$	$K_{ic} = 1,2 * (K_0 / P_0) * (T_0 / 2)$
$K_d = 0,075 * K_0 * P_0$	$K_{dc} = (0,075 * K_0 * P_0) / T_0$

Після підстановки $K_0 = X2$, $P_0 = 2$ с та $T_0 = 0.05$ с у формули, що записані в табл. 1.1, отримуємо шукані значення коефіцієнтів:

$$K_p = 0,6 * K_0 = 0.6 * 2 = 1.2;$$

$$K_i = 1,2 * (K_0 / P_0) = 1.2 * 2 / 2 = 1.2;$$

$K_d = 0,075 * K_0 * P_0 = 0.075 * 2 * 2 = 0.3$ для аналогового ПІД-регулятора та

$$K_{pc} = 0,6 * K_0 = K_p = 1.2, K_{ic} = 1,2 * (K_0 / P_0) * (T_0 / 2) = K_i * T_0 / 2 = 1.2 * 0.05 / 2 = 0.03,$$

$$K_{dc} = (0,075 * K_0 * P_0) / T_0 = K_d / T_0 = 0.3 / 0.05 = 6,$$

де T_0 – період (крок) квантування за часом, який обрано таким, що він дорівнює 0.05 с, для цифрового ПІД-регулятора.

5. Результати порівняльного комп'ютерного експерименту (імітаційне моделювання) якості функціонування системи-прототипу та вдосконаленої системи керування, в якій застосовано ЦПІД-регулятор, представлені на рис. 8.

Висновки. Завдяки використанню ЦСАК, що побудована на основі алгоритму цифрового пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання (ЦПІД-регулятор), вдалося зменшити майже на 30% тривалість перехідного процесу та уникнути додаткових коливань у цьому процесі.

Таке покращення якості регулювання температури повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації літаючої (повітряної) сенсорної мережі створює умови для підвищення надійності функціонування цього центру.

Подальшого покращення якості роботи ЦСАК температурою повітря в салоні (приміщенні) мобільного центру обробки інформації можна досягти завдяки побудові адаптивної ЦСАК.

Список літератури:

1. Servotechnica. URL: http://www.servotechnica.ru/project/index.pl?id_service=22 (last accessed 2020/2/21).
2. D'yakonov, V.: MATLAB 7.*/R2006/R2007: Self-instruction, DMK-Press, Moscow, (2008).
3. D'yakonov, V. (2008) Simulink 5/6/7: Self-instruction, DMK-Press, Moscow.
4. D'yakonov, V. (2010) VisSim + Mathcad + MATLAB. Visual mathematical modeling. SOLON-Press, Moscow.
5. Lysenko, O., Tachinina, O., Chumachenko, S.: Mathematical formulation of the optimization problem of movement of a group of quadcopters. *Technical mechanics*. 2016. Vol. 1. Pp. 73–78.
6. German-Galkin, S. (2011) Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnykh sistem na PK [Matlab & Simulink. Designing Mechatronic Systems on PC]. KORONA-Vek Publ., St. Petersburg.
7. Isermann, R: Digital Control Systems. Springer-Verlag (1981).
8. Lysenko, O., Tachinina, O., Chumachenko, S., and it. Modeli primeneniya informatsionno-telekommunikatsionnykh tekhnologiy na osnove bespilotnykh aviatsionnykh kompleksov v chrezvychnykh situatsiyakh [Models of application of information-telecommunication technologies on the basis of unmanned aerial systems in emergency situations]. Lap-Lambert Academic-Publishing (2018).
9. Dorf, R., Bishop, R.: Sovremennyye sistemy upravleniya [Modern Control Systems]. Laboratory of Basic Knowledge Moscow (2002).
10. Goodwin, G., Grebe S., Salgado M.: Proyektirovaniye sistem upravleniya [Design Control Systems]. Laboratory of Knowledge, Moscow (2004).
11. Лисенко О.І., Новіков В.І., Петрова В.М., Гуйда О.Г. Процедура синтезу топології безпроводової сенсорної мережі моніторингу цілей із мінімізацією загальної потужності передачі вузлів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, серія «Технічні науки»*. 2018. Том 29 (68) № 6, ч. 1. С. 69–72.

Novikov V.I., Lysenko O.I., Tachinina O.M., Guida O.H. METHODS OF SYNTHESIS ALGORITHM DIGITAL AUTOMATIC TEMPERATURE CONTROL AIR IN THE CABIN MOBILE DATA PROCESSING CENTER FLYING (AIR) SENSOR NETWORKS

The article is devoted to developing methods for the synthesis algorithm of digital automatic control air temperature inside a mobile information center flying (air) sensor network. To maintain the set temperature, it is proposed to use a digital automatic control system, which will provide the nominal mode of operation

of the mobile information processing center. The prototype of the digital automatic control system is chosen and the principle of its operation is studied. A computer mathematical model of the prototype was built and investigated on the model of its properties, which showed the emergence of additional transients that can negatively affect the operation of the mobile information processing center of the flying 9-air) sensor network. The prototype was improved by applying the digital control law, which is based on a digital proportional-integrated controller. A digital proportional-integrated controller is set up using the Ziegler-Nichols method. A comparative computer experiment (simulation) of a prototype and an improved control system was performed. Thanks to the use of digital automatic control system, built on the algorithm of digital proportional-integral-differential control (CPID-regulator), it was possible to reduce the duration of the transient process by almost 30% and avoid additional fluctuations in this process. This improvement in the quality of air temperature control in the cabin (premises) of the mobile information processing center of the flying (air) sensor network creates conditions for improving the reliability of this center. Further improvement of the quality of CSAC operation by the air temperature in the cabin (premises) of the mobile information processing center can be achieved by building an adaptive CSAC.

Key words: *mobile sensors, sensor networks, digital automatic control system, digital proportional-integral-differential controller, Ziegler-Nichols method.*

Семенець Д.А.

Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Української інженерно-педагогічної академії

Васильчук Д.П.

Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Української інженерно-педагогічної академії

Кобилянський Б.Б.

Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Української інженерно-педагогічної академії

Романуша В.О.

Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Української інженерно-педагогічної академії

ВИКОРИСТАННЯ МАТРИЧНО-ОПЕРАТОРНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОВЩИННО-ЗСУВНИХ КОЛИВАНЬ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ

У статті досліджується математична модель товщинно-зсувних коливань п'єзоелектричних пластин обмежених розмірів поверненого Y-зрізу кварцу із симетричним відносним масонавантаженням, яка заснована на рішенні рівнянь стану електропружного поля матрично-операторним методом. Отримані аналітичні рівняння для розрахунків резонансної частоти коливань п'єзоелемента і електричної провідності, що враховують залежність від просторових координат X_2, X_3 (товщина і ширина п'єзоелемента) і симетричного відносного масонавантаження. Вираз для електричної провідності може бути використаний для визначення еквівалентної схеми заміщення. Крім того, отримано аналітичні рівняння для визначення механічного зсуву, електричного потенціалу і механічної напруги.

Представлені результати чисельного аналізу запропонованої математичної моделі для випадку AT-зрізу кварцу: побудовані залежності відносної зміни частоти коливань від відносного масонавантаження для різних мод коливань, побудовані залежності механічного зсуву від двох просторових координат X_2, X_3 , при деяких фіксованих значеннях відносного масонавантаження. Показано, що наявність відносного масонавантаження призводить до зменшення резонансної частоти f , встановлено, що відносне масонавантаження має менший вплив на резонансну частоту на вищих гармоніках.

Встановлено факт залежності механічного зміщення u_1 від просторової координати X_3 , показано, що форма хвилі спотворюється по мірі віддалення від серединної площини $X_3 = 0$, тобто на відміну від поширених одномірних моделей, запропонована модель вказує на те, що форма хвилі стає відмінною від синусоїдальної завдяки граничному ефекту.

Запропонована математична модель коливань п'єзоелектричної пластини може бути використана в проектуванні нових резонаторів, фільтрів, датчиків у пристроях контролю зв'язку, контрольно-вимірвальних приладах та інших п'єзорезонансних коливальних системах.

Ключові слова: кварцовий резонатор, товщинно-зсувні коливання, п'єзоелемент, Y- і AT-зріз кварцу, матрично-операторний метод.

Постановка проблеми. Необхідність вдосконалення відомих і створення нових вимірвальних перетворювачів різноманітних фізичних величин зумовлена всебічним розвитком інформаційних систем вимірювання, контролю та керування. Одними з найбільш перспективних вимірвальних перетворювачів є автогенераторні вимірвальні перетворювачі, які складаються

з частотного автогенераторного датчика з частотним вихідним сигналом та кодуючого перетворювача із цифровим вихідним сигналом.

Застосування в таких перетворювачах п'єзорезонансних датчиків дає змогу забезпечити високу точність вимірювання та чутливість до багатьох фізичних величин. Використання п'єзорезонансних датчиків для визначення невеликої

кількості осадженої речовини було запропоновано Зауербреєм (Sauerbrey) у 1959 р. Він довів, що тонка плівка, осаджена на поверхні електрода п'єзореzonатора, зменшує його резонансну частоту пропорційно вазі плівки. Це стало підґрунтям розробки різноманітних п'єзореzonансних датчиків, які виконують перетворення «маса – частота» або «товщина – частота».

Сучасні тенденції створення інформаційно-вимірювальних систем потребують розв'язання суперечливих завдань, як-от: уніфікація конструкції, лінеаризація характеристики перетворення, підвищення точності, з одного боку, та зниження складності та собівартості – з іншого, що визначає необхідність вдосконалення відомих і пошуки нових математичних моделей п'єзореzonансних датчиків при зовнішніх впливах, зокрема масонавантаженні. Це своєю чергою дасть змогу підвищити точність та адекватність визначення основних електричних та експлуатаційних характеристик п'єзоелектричних резонаторів, які необхідні при розрахунках пристроїв генерації та селекції сигналів та істотно визначаються особливостями механічних коливань п'єзоелектричного елемента.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математичні моделі, що описують товщинно-зсувні коливання (TSh) п'єзоелектричних пластин, представлені як у вітчизняних, так і в іноземних публікаціях, умовно можна поділити на два класи: одновимірні і двовимірні моделі. До першого класу належать моделі, отримані в результаті спрощення точних тривимірних рівнянь коливання п'єзоелемента (ПЕ) в припущенні, що усі параметри, що описують поведінку ПЕ, залежать тільки від однієї просторової координати (яка характеризує товщину ПЕ) [1; 2]. Другий клас математичних моделей отриманий шляхом розкладання в степеневий ряд величин, що характеризують електропружне поле у тривимірному просторі, уздовж однієї з просторових координат [2; 3].

Перший клас математичних моделей детально описаний у роботах [1; 2], де представлені точні рішення одновимірної моделі тонкої п'єзоелектричної пластини нескінченних розмірів, з урахуванням відносного масонавантаження і міжелектродного зазору. Ці моделі описують процеси в п'єзоелектричних пластинах за умов довжини l і ширини t набагато більших товщини h , проте у випадку мікрореzonаторів, які останнім часом отримали велике поширення, ці моделі недосконалі з огляду на прояв граничного ефекту.

У роботі [4] запропонована математична модель другого класу, визначена резонансна частота TSh коливань. У роботі [5], на відміну від [6], врахований вплив відносного масонавантаження та отримані співвідношення для резонансних частот коливання ПЕ, встановлений факт зменшення резонансної частоти TSh коливань в умовах збільшення відносного масонавантаження. У роботі автор [7], ґрунтуючись на лінійній апроксимації TSh коливань, запропонованій Міндліном, отримав рівняння для резонансної частоти у випадку квадратичного закону розподілу відносного масонавантаження уздовж довжини і ширини ПЕ. Встановлено, що резонансна частота чутлива до нерівномірності відносного масонавантаження на поверхні ПЕ.

Загальним недоліком наведених вище математичних моделей другого класу є та обставина, що в них нехтують п'єзоелектричними постійними e_{kij} , отримуючи, по суті, рішення, що описують механічні коливання пружного тіла без урахування п'єзо ефекту.

У представленій роботі для дослідження TSh коливань п'єзоелектричних пластин застосований матрично-операторний метод. Цей метод застосовувався для дослідження планарних коливань п'єзоелектричних пластин (коливаннями розтягування-стискування в площині пластини) [8].

Постановка завдання. Метою статті є розробка математичної моделі TSh коливання поверненого Y-зрізу кварцу на основі матрично-операторного методу, яка враховує симетричне відносне масонавантаження в припущенні, що усі величини, що характеризують електропружне поле, залежать від двох просторових координат X_2, X_3 .

Виклад основного матеріалу дослідження. Тривимірні рівняння стану, руху і електростатики п'єзоелектричної пластини довільної симетрії, що описують TSh коливання [2], мають такий вигляд:

$$\begin{cases} T_{ij} = 0,5c_{ijkl} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) + e_{kij} \frac{\partial \varphi}{\partial x_k} \\ D_i = 0,5e_{kij} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) + \varepsilon_{ik} \frac{\partial \varphi}{\partial x_k} \\ \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \\ \frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0. \end{cases}, \quad (1)$$

де c_{ijkl} , e_{kij} , ε_{ik} – пружні, п'єзоелектричні і діелектричні постійні п'єзоелемента;

ρ, D_i, u_i, φ – щільність п'єзоелемента, електричне і механічне зміщення уздовж координатних осей і електричний потенціал відповідно;

T_{ij} – механічна напруга.

Індекси набувають значень $i, j, k, l = 1, 2, 3$

Пластини різних зрізів кварцу мають різні пружні п'єзодіелектричні матриці кристалів. Один із класів зрізів кварцу, повернений Y-зріз, отримав найбільше поширення в конструюванні п'єзоелектричних пристроїв. У таких п'єзоелектричних пристроях переважно використовують компоненту зміщення $u_1(x_2, x_3)$, а інші компоненти $u_2(x_2, x_3) = u_3(x_2, x_3) = 0$ [2].

Система рівнянь стану, руху і електростатики (1) для випадку поверненого Y-зрізу кварцу за умови використання тільки однієї компоненти механічного зміщення $u_1(x_2, x_3)$ [2] буде такою:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{21} = c_{56} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + c_{66} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + e_{26} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} + e_{36} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \\ D_2 = e_{25} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + e_{26} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \varepsilon_{22} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} - \varepsilon_{23} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \\ T_{31} = c_{55} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + c_{56} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + e_{25} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} + e_{35} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \\ D_3 = e_{35} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + e_{36} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \varepsilon_{23} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} - \varepsilon_{33} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \\ \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial T_{31}}{\partial x_3} \\ \frac{\partial D_3}{\partial x_3} + \frac{\partial D_2}{\partial x_2} = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

Грунтуючись на матрично-операторному методі рішення завдань лінійної теорії п'єзоелектрики для пластини, зображеної на рисунку 1, отримуємо математичну модель, яка враховує як геометричні розміри пластини уздовж координатних осей X_2, X_3 , так і масу електродів.

З рівнянь (3) і (4) системи (2) знайдемо похідні зміщення $u_1(x_2, x_3)$ і потенціалу $\varphi(x_2, x_3)$ за координатою x_3 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_1}{\partial x_3} = -\alpha_4 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \alpha_3 \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} + \alpha_1 T_{31} + \alpha_2 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} = \alpha_7 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} - \alpha_6 \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} + \alpha_2 T_{31} - \alpha_5 D_3, \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \alpha_1 &= \frac{\varepsilon_{33}}{e_{35}^2 + c_{55}\varepsilon_{33}}, \quad \alpha_2 = \frac{e_{35}}{e_{35}^2 + c_{55}\varepsilon_{33}}, \\ \alpha_3 &= \frac{(e_{35}\varepsilon_{23} - e_{25}\varepsilon_{33})}{e_{35}^2 + c_{55}\varepsilon_{33}}, \quad \alpha_4 = \frac{(e_{35}e_{36} + c_{56}\varepsilon_{33})}{e_{35}^2 + c_{55}\varepsilon_{33}}, \end{aligned}$$

$$\alpha_5 = \frac{c_{55}}{e_{35}^2 + c_{55}\varepsilon_{33}}, \quad \alpha_6 = \frac{(e_{25}e_{35} + c_{55}\varepsilon_{23})}{e_{35}^2 + c_{55}\varepsilon_{33}},$$

$$\alpha_7 = \frac{(e_{36}c_{55} - e_{35}c_{56})}{e_{35}^2 + c_{55}\varepsilon_{33}}.$$

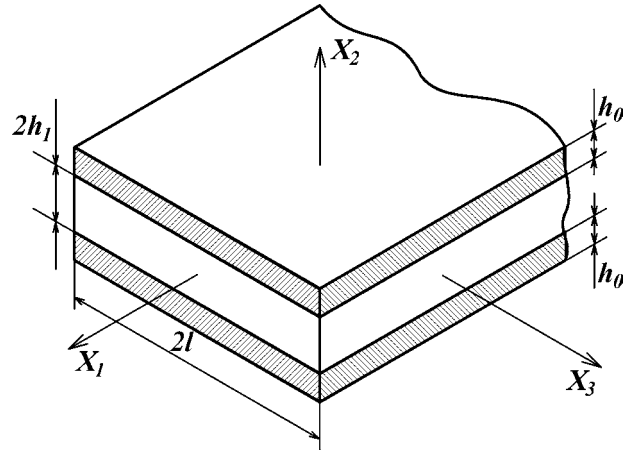


Рис. 1. Тонка п'єзоелектрична пластинка, обмежена в напрямі осей X_2, X_3 і нескінченна в напрямі осі X_1 , у прямокутній системі координат

Використовуючи систему рівнянь (3), виключимо похідні $\frac{\partial u_1}{\partial x_3}$ і $\frac{\partial \varphi}{\partial x_3}$ з рівнянь (1) і (2) системи (2), потім підставимо отримані співвідношення для T_{21} і D_2 у рівняння (5) і (6) системи (2). Отримаємо таку систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_{31}}{\partial x_2} = -\rho\omega^2 u_1 - \alpha_{11} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} - \alpha_{10} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} - \alpha_4 \frac{\partial T_{31}}{\partial x_2} + \\ + \alpha_7 \frac{\partial D_3}{\partial x_2} \\ \frac{\partial D_3}{\partial x_2} = -\alpha_{10} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} - \alpha_{14} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \alpha_3 \frac{\partial T_{31}}{\partial x_2} - \alpha_6 \frac{\partial D_3}{\partial x_2}, \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\alpha_{10} = e_{26} + c_{56}\alpha_3 - e_{36}\alpha_6, \quad \alpha_{11} =$$

$$\text{де } = c_{66} - c_{56}\alpha_4 + e_{36}\alpha_7, \quad \alpha_{14} =$$

$$= e_{25}\alpha_3 - \varepsilon_{22} + \alpha_6\varepsilon_{23}.$$

Системи рівнянь (3) і (4) представимо в матричній формі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U_1}{\partial x_3} = M_{11}U_1 + M_{12}U_2 \\ \frac{\partial U_2}{\partial x_3} = M_{21}U_1 + M_{22}U_2, \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\text{де } U_1 = \begin{bmatrix} u_1 \\ \varphi \end{bmatrix}, U_2 = \begin{bmatrix} T_{31} \\ D_3 \end{bmatrix},$$

$$M_{11} = \begin{bmatrix} -\alpha_4 \frac{\partial}{\partial x_2} & \alpha_3 \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \alpha_7 \frac{\partial}{\partial x_2} & -\alpha_6 \frac{\partial}{\partial x_2} \end{bmatrix}, M_{22} = \begin{bmatrix} -\alpha_4 \frac{\partial}{\partial x_2} & \alpha_7 \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \alpha_3 \frac{\partial}{\partial x_2} & -\alpha_6 \frac{\partial}{\partial x_2} \end{bmatrix},$$

$$M_{12} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ \alpha_2 & -\alpha_5 \end{bmatrix}.$$

$$M_{21} = \begin{bmatrix} -\rho\omega^2 - \alpha_{11} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} & -\alpha_{10} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \\ -\alpha_{10} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} & -\alpha_{14} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \end{bmatrix},$$

$$M_{12} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ \alpha_2 & -\alpha_5 \end{bmatrix}.$$

Позначимо значення векторів U_1, U_2 на середній площині $X_3 = 0$ як

U_{10}, U_{20} :

$$U_{10} = \begin{bmatrix} u_{10} \\ \varphi_{10} \end{bmatrix}, U_{20} = \begin{bmatrix} T_{310} \\ D_{310} \end{bmatrix}.$$

Тоді загальне рішення системи (5) представляється через матричну експоненту у вигляді:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = e^{Mx_3} \begin{bmatrix} U_{10} \\ U_{20} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\text{де } M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}.$$

$$\begin{cases} T_{31}(x_2; +l) - T_{31}(x_2; -l) = 2T_{310} - 2l \left(\rho\omega^2 u_{10} + \alpha_4 \frac{\partial^2 T_{310}}{\partial x_2^2} - \alpha_7 \frac{\partial^2 D_{310}}{\partial x_2^2} + \alpha_{11} \frac{\partial^2 u_{10}}{\partial x_2^2} + \alpha_{10} \frac{\partial^2 \varphi_{10}}{\partial x_2^2} \right) \\ D_3(x_2; +l) - D_3(x_2; -l) = 2 \left(D_{310} + l\alpha_3 \frac{\partial T_{310}}{\partial x_2} \right) - 2l \left(\alpha_6 \frac{\partial D_{310}}{\partial x_2} + \alpha_{10} \frac{\partial^2 u_{10}}{\partial x_2^2} + \alpha_{14} \frac{\partial^2 \varphi_{10}}{\partial x_2^2} \right) \\ \frac{T_{31}(x_2; +l) + T_{31}(x_2; -l)}{2} = T_{310}(x_2) \\ \frac{D_3(x_2; +l) + D_3(x_2; -l)}{2} = D_{310}(x_2) \end{cases}, \quad (9)$$

де $T_{31}(x_2; +l), T_{31}(x_2; -l), D_3(x_2; +l), D_3(x_2; -l)$ – відомі значення величин при $x_3 = \pm l$.

Представимо матричну експоненту у вигляді степеневого ряду $e^{Mx_3} = E_4 + Mx_3 + M^2 \frac{x_3^2}{2} + \dots$

й обмежимося двома членами в цьому розкладанні.

Тоді:

$$\begin{cases} U_1 = (E_2 + M_{11}x_3)U_{10} + M_{12}x_3U_{20} \\ U_2 = M_{21}x_3U_{10} + (E_2 + M_{22}x_3)U_{20}. \end{cases} \quad (7)$$

Запишемо систему (7) в розгорнутому виді, тобто з урахуванням рівнянь (5):

$$\begin{cases} u_1 = u_{10} + x_3 \left(\alpha_1 T_{310} + \alpha_2 D_{310} - \alpha_4 \frac{\partial u_{10}}{\partial x_2} + \alpha_3 \frac{\partial \varphi_{10}}{\partial x_2} \right) \\ \varphi = \varphi_{10} + x_3 \left(\alpha_2 T_{310} - \alpha_5 D_{310} + \alpha_7 \frac{\partial u_{10}}{\partial x_2} - \alpha_6 \frac{\partial \varphi_{10}}{\partial x_2} \right) \\ T_{31} = T_{310} - x_3 \left(\rho\omega^2 u_1 + \alpha_4 \frac{\partial T_{310}}{\partial x_2} - \alpha_7 \frac{\partial D_{310}}{\partial x_2} + \alpha_{11} \frac{\partial^2 u_{10}}{\partial x_2^2} + \alpha_{10} \frac{\partial^2 \varphi_{10}}{\partial x_2^2} \right) \\ D_3 = D_{310} + x_3 \left(\alpha_3 \frac{\partial T_{310}}{\partial x_2} - \alpha_6 \frac{\partial D_{310}}{\partial x_2} - \alpha_{10} \frac{\partial^2 u_{10}}{\partial x_2^2} - \alpha_{14} \frac{\partial^2 \varphi_{10}}{\partial x_2^2} \right) \end{cases}, \quad (8)$$

Якщо припускати, що на боковій поверхні пластини задані механічна напружка T_{31} і електричне зміщення D_3 , то, приймаючи в рівняннях (3) і (4) системи (8) $x_3 = \pm l$, можемо записати систему диференціальних рівнянь щодо невідомих $u_{10}, \varphi_{10}, T_{310}, D_{310}$, яка після елементарних перетворень матиме вигляд:

Оскільки бокова поверхня п'єзоелемента вільна від механічного впливу, можна прийняти $T_{31} = 0$, крім того, будемо вважати, що $D_3 = 0$, оскільки бокова поверхня ПЕ граничить із повітрям, діелектрична проникність якого значно менша за діелектричні постійні ϵ_{ij} ПЕ. З урахуванням вищезгаданих припущень система рівнянь (9) набуде вигляду:

$$\begin{cases} \rho\omega^2 u_{10} + \alpha_{11} \frac{\partial^2 u_{10}}{\partial x_2^2} + \alpha_{10} \frac{\partial^2 \varphi_{10}}{\partial x_2^2} = 0 \\ \alpha_{10} \frac{\partial^2 u_{10}}{\partial x_2^2} + \alpha_{14} \frac{\partial^2 \varphi_{10}}{\partial x_2^2} = 0 \\ T_{310} = 0 \\ D_{310} = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

Варто зауважити, що рівняння системи (10) не містять геометричний розмір l , хоча в роботі [9] ця величина в аналогічних виразах присутня.

Система рівнянь (10) вільна від розміру l , тому що при розкладанні матричної експоненти в степенеий ряд було взято два перших члена розкла-

$$\begin{cases} u_1 = \sin(\eta x_2)(C_1 + \eta x_3 \alpha_{24} C_2) + \cos(\eta x_2)(C_2 - \eta x_3 \alpha_{24} C_1) + x_3 \alpha_3 C_4 \\ \varphi = \sin(\eta x_2)(C_1 \alpha_{19} - \eta x_3 \alpha_{25} C_2) + \cos(\eta x_2)(C_2 \beta_{19} + \eta x_3 \alpha_{25} C_1) + (x_2 - x_3 \alpha_6) C_4 + C_3 \\ T_{31} = 0 \\ D_3 = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

де $\alpha_{24} = \alpha_4 - \alpha_3 \alpha_{19}$, $\alpha_{25} = \alpha_7 - \alpha_6 \alpha_{19}$.

Закони зміни T_{21} і D_2 можна встановити, якщо рівняння для $u_1, \varphi, D_3, T_{31}$ з (12) підставити в рівняння для T_{21} і D_2 системи (2), які були отримані на етапі

виключення з них похідних $\frac{\partial u_1}{\partial x_3}$ і $\frac{\partial \varphi}{\partial x_3}$. В результаті підстановки з урахуванням $T_{31} = 0, D_3 = 0$, отрима-

ємо такі рівняння для T_{21} і D_2 :

$$\begin{cases} T_{21} = C_4 \alpha_{10} + \eta [C_1 \cos(\eta x_2) - C_2 \sin(\eta x_2)] \alpha_{20} \\ D_2 = C_4 \alpha_{14}, \end{cases} \quad (13)$$

де $\alpha_{20} = \alpha_{11} + \alpha_{10} \alpha_{19}$.

Для визначення констант C_1, C_2, C_3, C_4 , що входять в (11, 12, 13), необхідно врахувати граничні умови для T_{21} і φ :

$$\begin{cases} -T_{21} = 2\rho_0 h_0 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}, x_2 = h \\ T_{21} = 2\rho_0 h_0 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}, x_2 = -h \\ \varphi = \pm \varphi_0, x_2 = \pm h \end{cases}, \quad (14)$$

данья, на відміну від роботи [9], де зберігалися перші три члени розкладання. Таке спрощення прийняте з метою врахування відносного масонавантаження, яке вноситься електродами збудження. У математичній моделі [9] відносне масонавантаження не враховувалося з причини складності і громіздкості отримання математичного рівняння при традиційному підході до перетворень.

Вирішуючи систему рівнянь (10) знайдемо рівняння що описують механічне зміщення $u_{10}(x_2)$ і електричний потенціал $\varphi_{10}(x_2)$ у серединній площині:

$$\begin{cases} u_{10} = C_1 \sin(\eta x_2) + C_2 \cos(\eta x_2) \\ \varphi_{10} = \alpha_{19} [C_1 \sin(\eta x_2) + C_2 \cos(\eta x_2)] + C_3 + C_4 x_2 \end{cases}, \quad (11)$$

де $\eta = \sqrt{\rho \alpha_{16}} \omega$ – хвилеве число

$$\alpha_{16} = \frac{\alpha_{14}}{-\alpha_{10}^2 + \alpha_{11} \alpha_{14}}, \alpha_{19} = -\frac{\alpha_{10}}{\alpha_{14}}.$$

Маючи в розпорядженні рішення (11), можна визначити рівняння для $u_1, \varphi, D_3, T_{31}$ системи рівнянь (8):

Підставляючи рівняння для T_{21} і φ з (12, 13), в (14) визначаємо константи C_1, C_2, C_3, C_4 :

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\alpha_{21} \varphi_0}{W_1} \\ C_4 = \frac{\eta \varphi_0 W_1}{W_2} \\ C_2 = C_3 = 0, \end{cases} \quad (16)$$

де $W_1 = 2R\eta h_1 \sin(\eta h_1) - \cos(\eta h_1)$,

$W_2 = (2R\eta^2 h_1^2 + \alpha_{23}) \sin(\eta h_1) - \eta h_1 \cos(\eta h_1)$,

$\alpha_{21} = \alpha_{10} \alpha_{16}$, $R = \frac{\rho_0 h_0}{\rho_1 h_1}$ – відносне масонавантаження.

Маючи в розпорядженні співвідношення для констант C_1, C_2, C_3, C_4 можна визначити усі початкові параметри товщинно-зсувних коливань п'єзоелектричних пластин. У рамках проведеного дослідження запишемо лише рівняння для u_1 і D_2 , оскільки ці параметри дають змогу визначити резонансну частоту коливань п'єзоелектричної пластини.

$$\begin{cases} u_1 = \frac{\varphi_0 [\alpha_{21} \sin(\eta x_2) + \eta x_3 (W_1 \alpha_3 - \cos(\eta x_2) \alpha_{30})]}{W_2}, \\ D_2 = \frac{\eta \varphi_0 [\alpha_{14} W_1 + \eta \alpha_{29} x_3 \sin(\eta x_2)]}{W_2} \end{cases}, \quad (17)$$

де $\alpha_{29} = \alpha_{21} (\alpha_{10} \alpha_{24} - \alpha_{14} \alpha_{25})$, $\alpha_{30} = \alpha_{21} \alpha_{24}$.

Резонансну частоту коливань ω п'єзоелектричної пластини визначимо, виходячи з рівняння повної провідності ПЕ Y .

Згідно [8] повну провідність можна визначити з рівняння:

$$Y = \frac{I}{U} = \frac{1}{U} \frac{\partial}{\partial t} \int_{-m}^m \int_{-l}^l D_2(x_2, x_3) dx_1 dx_3. \quad (18)$$

Враховуючи, що $D_2(x_2, x_3)$ не залежить від координати x_1 , тоді співвідношення для провідності, можна розглянути в такому виді:

$$Y = \frac{2j\omega m}{U} \int_{-l}^l D_2(x_2, x_3) dx_3, \quad (19)$$

Підставляючи в (19) рівняння для D_2 з (17), приймаючи при цьому $x_2 = h_1$, отримуємо:

$$Y = \frac{2j\omega m}{U} \left[\frac{2l\eta\alpha_{14}\varphi_0}{\eta h_1 + \frac{\alpha_{23}}{(2R\eta h_1 - \cot(\eta h_1))}} \right], \quad (20)$$

На резонансній частоті $Y \rightarrow \infty$ отже, послідовний резонанс настає, коли знаменник в (20) дорівнює нулю. Після нескладних перетворень отримаємо наступне трансцендентне рівняння для визначення послідовної резонансної частоти коливань:

$$\cot(\eta h_1) = 2R\eta h_1 + \frac{\alpha_{23}}{\eta h_1}, \quad (21)$$

Рівняння (21) визначає послідовну резонансну частоту товщинно-зсувних коливань антисиметричних мод, збуджуваних електрично в п'єзоелектричній пластині. Коректність рівняння (21) можна перевірити, зіставивши його з аналогічним рівнянням, отриманим у роботі [2], що описує процеси у п'єзоелектричній пластині, нескінченних розмірів.

$$\cot(\zeta h) = 2R\zeta h + \frac{\bar{k}_{26}^2}{\zeta h}, \quad (22)$$

Зіставляючи рівняння (21) і (22), можна зробити висновок, що, незважаючи на різну структуру коефіцієнтів α_{23} і \bar{k}_{26}^2 , їх числові значення незначно відрізняються один від одного, те саме стосується коефіцієнтів

$\sqrt{\alpha_{16}\rho}$ і $\sqrt{\frac{\rho}{c_{66}(1+k_{26}^2)}}$, що входять до хвильових чисел η і ξ .

Трансцендентне рівняння (21) можна вирішити приблизно, якщо врахувати, що електроди тонкі і R відповідно мале, а чисельне значення коефіцієнта α_{23} для АТ-зрізу кварцу становить $\alpha_{23} = 0,0085$. Нехтуючи відносно малими величинами R і α_{23} Рішення запишемо в такому виді:

$$\eta h_1 = \frac{n\pi}{2} - \Delta, \quad (23)$$

де Δ – невідома мала величина.

Підставляючи рівняння (23) в (21) і враховуючи, що $\cot\left(\frac{n\pi}{2} - \Delta\right) = \tan(\Delta)$, а перший член розкладання в степеневий ряд функції $\tan(\Delta) = \Delta$, отримаємо:

$$\Delta_{1,2} = \frac{\pi + 4\pi R \pm \sqrt{\pi^2 - 16(1+2R)\alpha_{23}}}{4 + 8R}, \quad (24)$$

Підставляючи менше значення Δ_1 з (24) в (23) з урахуванням рівняння для хвильового числа η з (11), отримаємо рівняння для визначення резонансної частоти коливань п'єзоелектричної пластини ω :

$$\omega = \frac{\pi(4R(n-1) + 2n-1) + 4\pi R + \sqrt{\pi^2 - 16(1+2R)\alpha_{23}}}{4h_1(1+2R)\sqrt{\alpha_{16}\rho_1}}, \quad (25)$$

Рівняння резонансної частоти ω не містить величину геометричного розміру пластини l , але в роботі [9] цей параметр у співвідношенні для резонансної частоти був присутнім, з тієї самої причини, що була згадана вище для системи рівнянь (10). Крім того, в роботі [9] було показано, що резонансна частота коливань пластини залежить від геометричних розмірів у напрямі осі x_3 незначним чином.

Чисельний аналіз розробленої математичної моделі. Для чисельного аналізу запропонованої моделі розглянемо АТ-зріз кварцу з параметрами, взятими з [9]: резонансна частота коливань $f_0 = 10$ МГц, частотний коефіцієнт $N = 1661$ кГц·мм; товщина п'єзоелемента $h_{ПЭ} = \frac{nN}{f_0} = 0,1661$ мм. Матеріальні константи АТ-зріз кварцу узяті з роботи J. Yang [2].

Побудуємо характеристику, що описує залежність відносної зміни частоти резонатора від відносного масонавантаження R для різних

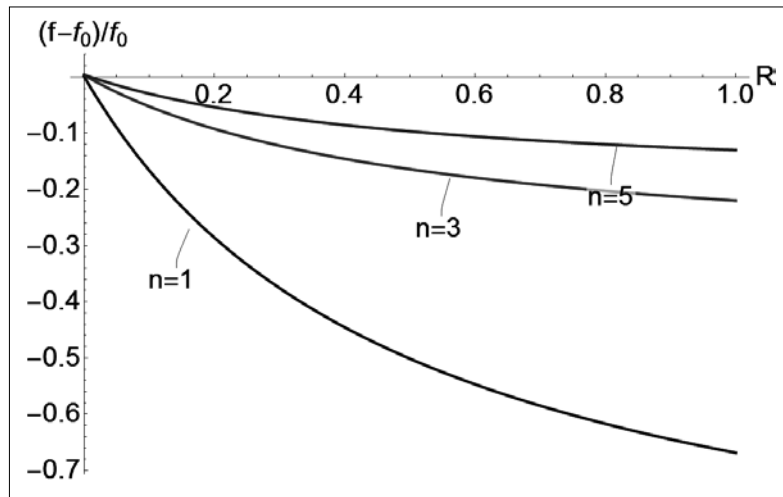
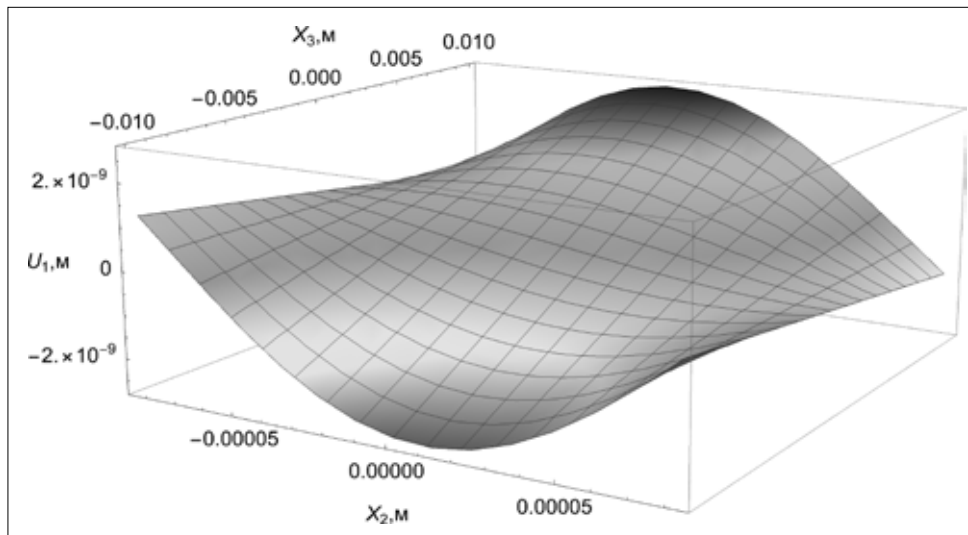
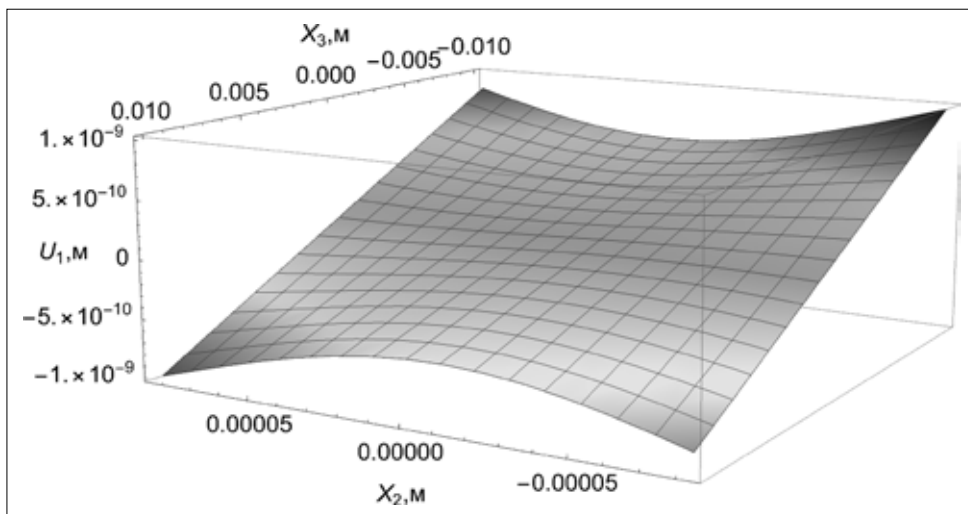


Рис. 2. Залежність відносної зміни частоти $(f - f_0) / f_0$ від відносного масонавантаження R , для різних гармонік



а)



б)

Рис. 3. Залежність зміщення u_1 від координат X_2, X_3 і масонавантаження R :
а – при $R = 0,0048$; б – при $R = 0,048$

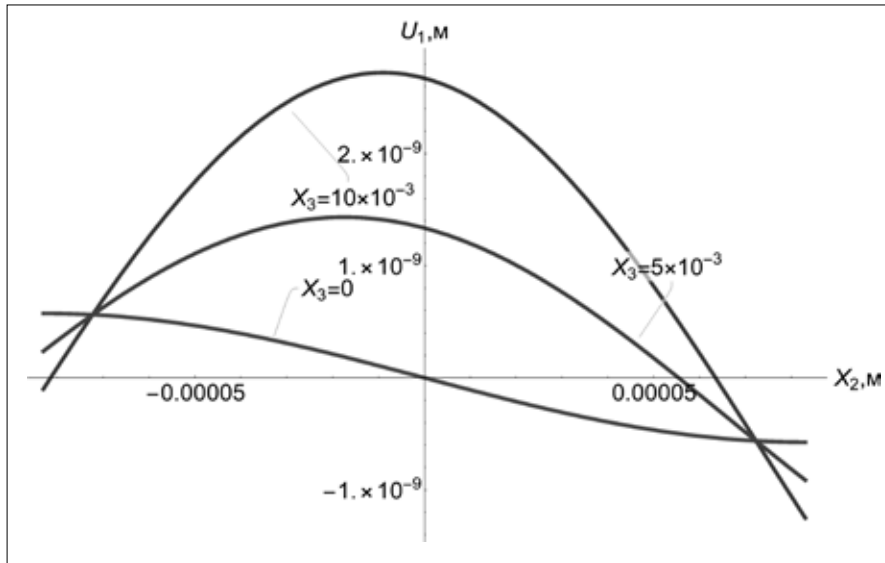


Рис. 4. Залежність зміщення u_1 від координат X_2 , для деяких фіксованих значень X_3 при $R = 0,0048$

гармонік (рисунок 2). Ця характеристика є залежністю відносної перебудови частоти $\frac{f - f_0}{f_0}$ від величини відносного масонавантаження R , де f_0 – резонансна частота товщинно-зсувних коливань п'єзоелектричної пластини, коли $R = 0$ [2]:

$$\frac{f - f_0}{f_0} = \frac{\pi(4R(n-1) + 2n-1) - \theta_1 + \sqrt{\pi^2 - 16(1+2R)\alpha_{23}}}{\theta_1}, \quad (26)$$

$$\text{де } \theta_1 = \sqrt{2n(1+2R)} \sqrt{c_{66}\alpha_{16} \left(2\pi^2 + (\pi^2 - 8)k_{26}^2 \right)}$$

Отримані залежності демонструють, що наявність відносного масонавантаження призводить до зменшення резонансної частоти f , крім того, відносно масонавантаження має менший вплив на резонансну частоту на вищих гармоніках. Так, для першої (основної) гармоніки при зміні відносного масонавантаження R у діапазоні $(0 \div 1)$ відносна перебудова частоти, виражена у відсотках, становитиме 67,5%, а для п'ятої гармоніки ця зміна становитиме 12,5%.

На рисунку 3 представлені тривимірні графіки залежності механічного зміщення u_1 на основній гармоніці, від геометричних розмірів пластини X_2 і X_3 . Ці графіки побудовані згідно з рівнянням 1 системи (17), якщо частота послідовного резонансу $f = 10 \text{ МГц}$, а відносно масонавантаження дорівнює значенню $R = 0,0048$ (рис. 3.а, електрод виконаний зі срібла завтовшки $h_0 = 0,1 \text{ мкм}$) і $R = 0,048$ (рис. 3.б, $h_0 = 1 \text{ мкм}$).

На рисунку 4 представлені двовимірні графіки залежності механічного зміщення u_1 на основній (першій) гармоніці від товщинної координати X_2

при деяких фіксованих значеннях координати X_3 і при $R = 0,0048$. Аналіз представлених залежностей механічного зміщення u_1 свідчить про те, що в серединній площині $X_3 = 0$, зміщення має таку саму форму як у разі TSh коливань пластин нескінченних розмірів уздовж осей X_3 і X_1 [2]. У разі зміщення від серединної площини до краю пластини спостерігається спотворення форми хвилі, тобто, на відміну від поширених одномірних моделей, запропонована модель вказує на те, що форма хвилі в разі зміщення уздовж осі X_3 відмінна від синусоїдальної за рахунок граничного ефекту.

Висновки. Отримала подальший розвиток математична модель чутливого елемента датчика на основі п'єзорезонатора, яка, на відміну від наявних, враховує геометричні розміри пластини як від координат X_2 і X_3 , так і від симетричного відносного масонавантаження R . Отримано рівняння для провідності, що дасть змогу надалі отримати еквівалентну електричну схему такого елемента для застосування його у складі автогенераторів або фільтрів.

Виявлені особливості розподілу механічного зміщення u_1 уздовж координати X_3 , які вказують на те, що форма хвилі спотворюється в міру віддалення від серединної площини $X_3 = 0$, на відміну від ідеалізованих моделей, що не враховують цю особливість. Факт спотворення форми хвилі необхідно врахувати в процесі проектування нових п'єзорезонансних пристроїв, що працюють на TSh типах коливань.

Запропонований чутливий елемент, що враховує відносно масонавантаження і геометричні розміри уздовж координат X_2 і X_3 , може бути застосований у прецизійних датчиках фізичних величин.

Список літератури:

1. Tiersten H.F. Linear Piezoelectric Plate Vibrations: Elements of the Linear Theory of Piezoelectricity and the Vibrations of Piezoelectric Plates. Springer US, 1995. 212 p.
2. Yang J. Analysis of Piezoelectric Devices. World Scientific, 2006. 520 p.
3. Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применение / Пер. с чеш. Москва : Мир, 1990. 594 с.
4. Mindlin R.D. High frequency vibrations of piezoelectric crystal plates. *Int. J. Solids Structures*. 1972. Vol. 8. P. 895–906.
5. Huijing H. Thickness-shear vibration of a rectangular quartz plate with partial electrodes / H. Huijing, J. Yang, J.A. Kosinski, J. Wang. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2013. Vol. 26, N. 2. P. 121–128.
6. Wang J. Resonant frequency function of thickness-shear vibrations of rectangular crystal plates / J. Wang, Iijun Y., Qiaoqiao P., Min-chiang C., Jianke D. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control*. 2011. Vol. 58, N. 5. P. 1102–1107.
7. Liu N. Effects of a Mass Layer With Gradually Varying Thickness on a Quartz Crystal Microbalance / N. Liu, S.Y. Jiashi, C. Weiqiu. *IEE Sensors journal*. 2011. Vol. 11, N. 8. P. 1635–1639.
8. Партон В.З. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел. / Партон В.З., Кудрявцев Б.А. Москва : Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1988. 472 с.
9. Васильчук Д.П., Семенець Д.А., Романуша В.О., Кобылянський Б.Б., Нефьодова І.В. Математична модель п'єзорезонансної коливальної системи на основі матрично-операторного методу. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал*. Кременчук : КрНУ, 2019. Вип. 2/2019 (46). С. 25–32.

Semenets D.A., Vasylchuk D.P., Kobylanskyi B.B., Romanusha V.O.

USE OF THE MATRIX-OPERATOR METHOD FOR RESEARCH OF THICKNESS-SHEAR OSCILLATIONS OF QUARTZ RESONATORS

In article mathematical model of thickness-shear oscillations of piezoelectric plates of the limited sizes of Y-cut quartz with symmetric relative mass-load, based on the decision of the equations of a condition of an electroelastic field by a matrix-operator method is research. Analytical expressions for calculation of resonant frequency of oscillations of the piezoelectric element and electric conductivity which take into account dependence on spatial coordinates X_2, X_3 (thickness and width of the piezoelectric element) and symmetric relative mass load are obtained. The expression for electric conductivity can be used to determine an equivalent replacement scheme. In addition, analytical expressions for mechanical shear, electrical potential and mechanical stress are obtained.

The results of the numerical analysis of the proposed mathematical model for the case of AT-cut quartz are presented: the dependences of the relative frequency change on the relative mass load for different vibration modes are constructed; the dependences of the mechanical shear from two spatial coordinates are constructed, at some fixed values of the relative mass load. It is shown that the shape of the mechanical shift is distorted as the distance from the median plane, this fact should be taken into account when designing new piezoresonance devices.

The results of the numerical analysis of the proposed mathematical model for the case of AT-cut of quartz are presented: the dependences of the relative change in the frequency of oscillations on the relative mass load for different modes of oscillations are constructed, the dependences of the mechanical shift on the two spatial coordinates X_2, X_3 , at some fixed values of the relative mass load are constructed. It is shown that the presence of the relative mass load leads to a reduction in the resonance frequency f , it is found that the relative mass load has less influence on the resonance frequency at the higher harmonics. It is established the fact of dependence of mechanical displacement on the spatial coordinate, it is shown that the wave shape is distorted with the distance from the median plane $X_3 = 0$, that is, in contrast to the common one-dimensional models, the proposed model indicates that the wave shape becomes different from sinusoidal due to the boundary effect.

The proposed mathematical model of piezoelectric plate oscillations can be used in the design of new resonators, filters, sensors in communication control devices, instrumentation and other piezoresonance vibrating systems.

Key words: quartz resonator; thickness-shear oscillations piezoelement, Y and AT-cut quartz, matrix-operator method.

Ушкаренко А.О.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОДСИСТЕМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

У статті розглядається вдосконалений метод опису структур цифрових фільтрів, який відрізняється підвищеним інформаційним змістом отриманих моделей систем цифрової обробки сигналів. Використання запропонованого підходу дає змогу виконати синтез графоаналітичних моделей систем цифрової обробки сигналів та провести її аналіз шляхом багаторівневої декомпозиції. Це дає змогу оцінити якість структури системи та елементів, що входять до її складу, з позицій загального системного підходу, і спрощує проведення інтеграційного тестування системи цифрової обробки сигналів за рахунок формального визначення всіх можливих схем взаємодії апаратно-програмних засобів. При цьому всі елементи системи представлені у вигляді функціональних структур, а обробка дискретною системою вхідного відліку розглядається як процес перетворення вхідних аргументів за допомогою цих функціональних структур. Розроблено правила формального опису елементів систем цифрової обробки сигналів і отримані графоаналітичні моделі базових структур нерекурсивних і рекурсивних цифрових фільтрів, відмінною рисою яких є підвищений інформаційний зміст. Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості використання формального підходу в процесі вирішення завдання синтезу оптимізованих структур цифрових фільтрів. Запропонований у статті метод використаний при синтезі оптимізованої структури цифрового фільтра для обчислення середнього і діючого значень детермінованого періодичного сигналу при оптимальній швидкодії дискретної системи та інваріантності до частоти дискретизації. Час, необхідний для обчислення чергового вихідного значення оптимізованим цифровим фільтром, у 2,5 рази менше ніж час, який необхідний для виконання всіх обчислень при використанні неоптимізованої структури цифрового фільтра. Представлені в статті моделі структур цифрових фільтрів можуть бути використані в радіоелектронних та телекомунікаційних системах різного призначення у вигляді вбудовуваних модулів після їх інтеграції з об'єктно орієнтованою мовою програмування.

Ключові слова: цифровий фільтр, функціональна структура, аналітична модель, оптимізація, перетворення аргументів.

Постановка проблеми. Цифровая обработка сигналов имеет большое фундаментальное и прикладное значение в электронике, телекоммуникациях, радиотехнике и смежных отраслях. Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы характеризуются большим количеством элементов, множеством связей и значительным объемом обрабатываемой информации. Для разработчика электронной и телекоммуникационной аппаратуры важно глубокое понимание процессов преобразования сигналов, которое выполняет система, для разработки соответствующих алгоритмов.

Все чаще возникает необходимость в разработке более сложных цифровых систем в более короткие сроки. В таких случаях работа на компонентном уровне больше не является эффективной, что приводит к необходимости работать на более высоком уровне абстракции проекта [1, с. 43].

Здесь проектировщик разрабатывает и использует высокоуровневые системные модели, которые затем реализуются схемотехнически с использованием регистровой логики или программно в виде исходного кода на одном из языков высокого уровня. Поэтому актуальной является задача усовершенствования метода описания систем цифровой обработки сигналов и ее отдельных элементов, а также применение алгоритмов цифровой фильтрации для улучшения качества функционирования радиотехнических и телекоммуникационных систем.

Анализ последних исследований и публикаций. Известны несколько эквивалентных форм представления цифровых фильтров. Это представление в форме передаточной функции, разностных уравнений, в виде разложения передаточной функции на простые дроби, в каскадной форме, в пространстве состояний, а также в виде

зр-представления [2, с. 133; 3, с. 27]. При этом информация о структуре системы обработки сигналов или отсутствует, или представлена в неявном виде. Также широко используется описание в виде структурных схем, принципиальных схем, а также системы моделирования Matlab Simulink [4, с. 60; 5, с. 126], SciCos [6, с. 38], Proteus, Multisim и другие, в которых исследуемые системы, а также их элементы, представлены с использованием различных уровней абстрагирования, полученных в результате декомпозиции исходной системы на отдельные подсистемы [7, с. 1335]. Однако основным недостатком такого описания систем является отсутствие информации о структуре ее отдельных элементов, которые рассматриваются как «черный ящик». Глубина описания, уровень детализации определяется назначением системы и используется для построения моделей систем. Изучение особенностей этой информации является предметом анализа систем [8, с. 3295].

К параметрам цифровых фильтров в современных системах цифровой обработки сигналов (ЦОС) предъявляются повышенные требования [9, с. 29; 10, с. 116]. Порядки фильтров нередко достигают тысяч и более. Это ведет к увеличению объемов вычислений и резкому росту аппаратных затрат, а в случае программной реализации фильтра – к увеличению затрат процессорного времени на выполнение всех необходимых вычислений. При синтезе цифровых фильтров наибольшие затраты времени и оборудования приходятся на операции умножения [11, с. 128]. Таким образом, задача минимизации времени вычислений и уменьшения аппаратных затрат сводится к уменьшению количества умножений, необходимых для вычисления очередного отфильтрованного отсчета [12, с. 133]. При этом главное внимание в литературе уделяется вопросам параметрической оптимизации цифровых фильтров как при их проектировании на основе аналоговых прототипов, так и при разработке адаптивных фильтров [13, с. 122; 14, с. 336]. В связи с этим методы описания структур систем ЦОС и процессов преобразования сигналов в них требуют усовершенствования, и как показывает проведенный анализ литературы, имеют значительные резервы для развития.

Предлагаемый в этой работе подход к описанию систем ЦОС расширяет и дополняет методы описания структур цифровых систем управления и логико-динамических процессов преобразования информации, представленные в работах [15, с. 279; 16, с. 30].

Постановка задания. Целью статьи является усовершенствование метода описания структур цифровых нерекурсивных и рекурсивных фильтров для построения их графоаналитических моделей, в которых все элементы представлены в виде функциональных структур, выполняющих преобразование входных аргументов, что позволит представить системы ЦОС на различных уровнях декомпозиции и реализовать формальный подход к решению задач их структурной оптимизации.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1) проанализировать работу нерекурсивных и рекурсивных фильтров с точки зрения взаимодействия различных функциональных структур, а обработку входного отсчета дискретной системой рассмотреть как процесс преобразования аргументов с помощью этих функциональных структур;

2) разработать правила формального описания элементов систем цифровой обработки сигналов и представить структуры нерекурсивных и рекурсивных цифровых фильтров в виде графоаналитических выражений, отличительной особенностью которых является повышенное информационное содержание;

3) разработать оптимизированную структуру подсистемы цифровой обработки сигналов для вычисления среднего и среднеквадратического значений периодического сигнала, отличительной особенностью которой является независимость количества вычислений для получения выходного отсчета от частоты дискретизации входного сигнала.

Изложение основного материала исследования. Если входной сигнал подсистемы ЦОС рассматривать как аргумент, а выходной сигнал как функцию, то подсистема представляет собой некоторую функциональную структуру. Таким образом, полное описание системы можно представить в виде взаимодействующих функциональных структур, каждая из которых выполняет преобразование входных аргументов. Первый уровень понимания процессов преобразования сигналов реализован для разработчика в виде структурной схемы и принципиальной схемы. Второй уровень понимания реализован в виде вычислительных математических моделей с входными и преобразованными аргументами.

Если простейшую схемную реализацию фильтра нижних частот (ФНЧ) первого порядка на основе одного элемента задержки $Z^{-1} \rightarrow \langle f_i(\text{RS}Z^{-1}) \rangle$ представить в виде регистра памяти и сумматора $f_i(\Sigma)$, которые записать в виде графоаналитического

выражения, представленного на рис. 1, а, то это выражение может быть записано в виде аналитического выражения вида:

$$x(n) \rightarrow f(\text{Action}) \rightarrow y(n), \quad (1)$$

которое адекватно отображает процесс преобразования аргументов и полностью соответствует понятию функциональной структуры, с помощью которой складываются прямой сигнал « $x(n)$ » и задержанный сигнал (или отсчет) с выхода элемента задержки. Для функциональной структуры регистра памяти «Action» представляет собой задержку на один такт. Тогда, согласно этой формы записи, элемент задержки Z^{-1} будет обозначаться как « $f_1(rsZ^{-1})$ », сумматор обозначается как « $f_1(\Sigma)$ », а умножитель – как « $f_1(\Sigma_2)$ », поскольку с математической точки зрения умножение – это многократное сложение. При этом в обозначении функциональной структуры, выполняющей задержку входного отсчета на один такт, используется дополнительная информация, отражающая некоторые особенности реализации этого элемента. В данном случае указано, что в составе элемента задержки имеются RS-триггеры. Этот тип триггеров является базовым для построения триггеров других типов, в частности D-триггеров. В свою очередь, на основе D-триггеров строятся регистры памяти, которые и используются при аппаратной реализации линий задержки в системах ЦОС. Таким образом, становится частично известным внутреннее устройство (теоретическая структура) элементов, из которых состоит система ЦОС. Такие элементы в графоаналитической модели представляют собой «серый ящик».

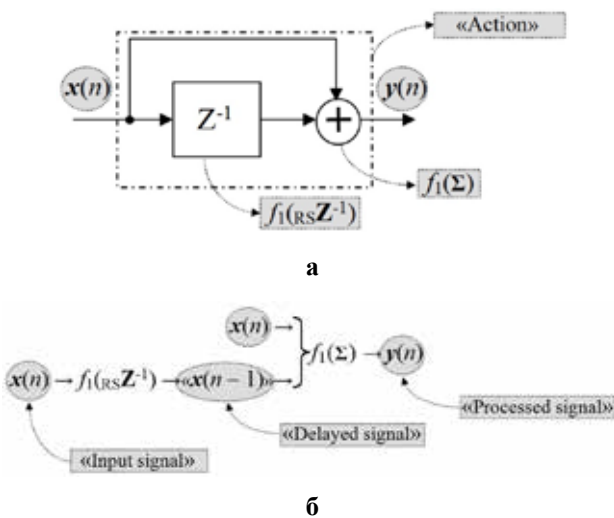


Рис. 1. Структура аппаратной реализации КИХ-фильтра (а) и графоаналитическое выражение, которое описывает функциональную структуру фильтра (б)

Если вернуться к общепринятой математической записи логико-динамического процесса преобразования входного аргумента $x(n)$ графоаналитического выражения (рис. 1, а), то работа такого фильтра нижних частот описывается разностным уравнением вида:

$$y(n) = x(n) + x(n-1), \quad (2)$$

При аналитическом описании структур цифровых фильтров символ « $\}$ » математического анализа является «идеальным» символом. Он включает в себя содержание функциональной структуры и может быть уточнен с применением различных индексов и символов, которые широко используются в науке [16, с. 30].

Если структуру фильтра (рис. 1, а) представить в виде аналитического выражения (1), то может быть сформировано аналитическое выражение функциональной структуры фильтра, представленное на рис. 1, б. В этом выражении, в отличие от разностного уравнения (2), исходным является «Input signal», над которым выполняются определенные действия для активизации «Processed signal» $y(n)$.

Вариант построения фильтра ФНЧ/ФВЧ первого порядка с одним полюсом представлен в виде структурной схемы на рис. 2.

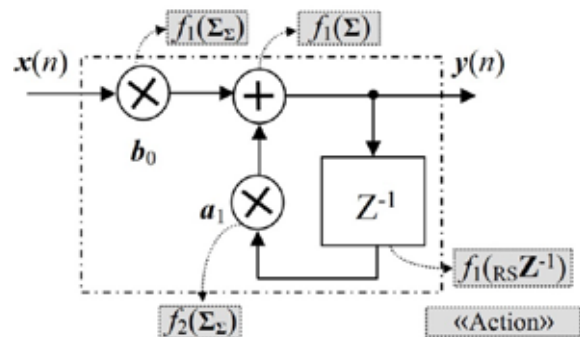


Рис. 2. Структура аппаратной реализации рекурсивного цифрового фильтра

В этой схеме фильтра с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) используется обратная связь, с помощью которой складываются прямой и задержанный сигналы:

$$y(n) = b_0x(n) + a_1y(n-1), \quad (3)$$

Z – преобразование этого уравнения и передаточная функция фильтра определяются уравнениями:

$$Y(z) = b_0X(z) + a_1z^{-1}Y(z),$$

$$H(z) = \frac{b_0}{1 - a_1z^{-1}}.$$

Для этой схемы фильтра, если $a_1 > 0$ – это ФНЧ, если $a_1 < 0$ – это ФВЧ [9, с. 35]. Если структуру фильтра (рис. 2) записать в виде графоаналитического выражения (1), то вместо алгебраического выражения (3) может быть сформировано графоаналитическое описание функциональной структуры, представленное на рис. 3. В этом выражении, в отличие от разностного уравнения (3), исходным является «Input signal» и «Delayed feedback signal», над которыми выполняются определенные действия для активизации «Processed signal» $y(n)$. Направление передачи данных отображается с помощью стрелки (\uparrow). Входной информационный поток обозначается стрелкой вниз (\downarrow).

Для рекурсивного фильтра 2 порядка (биквадратный фильтр) может быть сформирована графоаналитическая модель функциональной структуры, представленная на рис. 4.

Из анализа полученной графоаналитической модели можно видеть, что в структуре цифрового фильтра имеется 5 умножителей, 4 сумматора и 2 линии задержки, которые представляют собой регистры памяти. При этом видно, что быстродействие фильтра может быть увеличено за счет параллельного выполнения процессов вычислений. В частности, процедуры умножения, выполняемые функциональными структурами умножителей f_2, f_3, f_4, f_5 , могут быть выполнены параллельно при выполнении алгоритма на многоядерном процессоре, что следует учитывать при программной реализации фильтра. Представление структур фильтров в виде структурных схем или разностных уравнений не позволяет сделать таких выводов. Также могут параллельно выполняться операции суммирования сумматорами f_3 и f_4 .

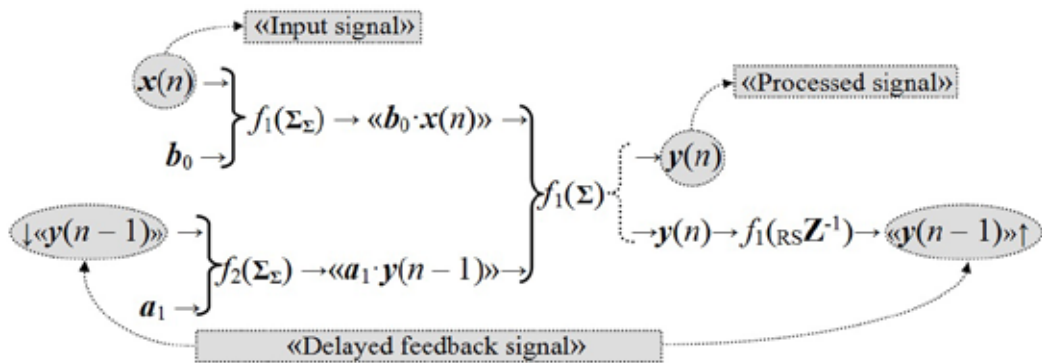


Рис. 3. Графоаналитическое описание функциональной структуры цифрового БИХ-фильтра

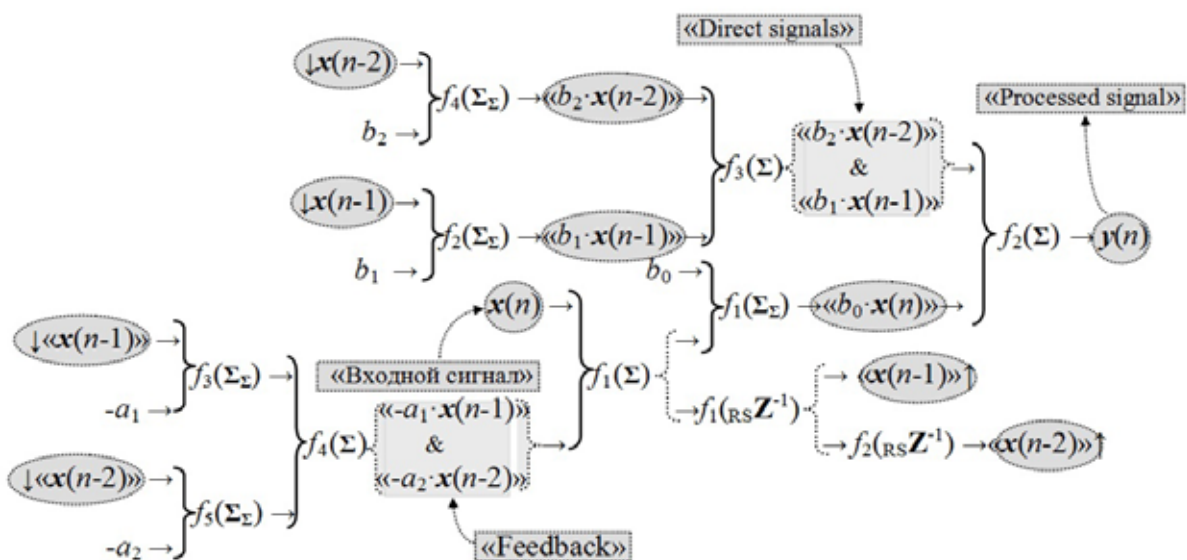


Рис. 4. Графоаналитическое описание биквадратного фильтра

В результате для активизации конечного результирующего аргумента $Y(kT_s)$ выражения (5) необходимо выполнить преобразование входных аргументов в соответствии с графоаналитической моделью, представленной на рис. 7.

Представленная графоаналитическая модель описывает структуру линейного фильтра с импульсной характеристикой конечной длительности $N-1$.

На рис. 8 представлена графоаналитическая модель оптимизированной структуры цифрового фильтра. Для вычисления очередного выходного отсчёта оптимизированного цифрового фильтра необходимо выполнить 3 операции сложения и одну операцию умножения, против N операций сложения и N операций умножения в исходной структуре. Платой за снижение количества арифметических операций является увеличение длины цифровой линии задержки на один элемент памяти и выделение дополнительного элемента

памяти для хранения промежуточного результата. Введя дополнительные функциональные блоки A^2 и \sqrt{A} , оптимизированную структуру цифрового фильтра для расчета среднего значения периодического сигнала с равными весовыми коэффициентами можно использовать для вычисления действующего (среднеквадратического) значения входного сигнала.

Для проверки эффективности полученной структуры цифрового фильтра проводился эксперимент с использованием микроконтроллера ATmega128, работающего от внешнего генератора с тактовой частотой 8 МГц. На вход фильтров была подана ступенчатая функция (функция Хэвисайда) для определения значения интервала времени, необходимого цифровым фильтрам для выполнения всех вычислений и формирования выходного значения. Эксперимент проводился для разных значений порядков цифровых фильтров – 16, 32, 64, 128, 256, 512 и 1000. В качестве ком-

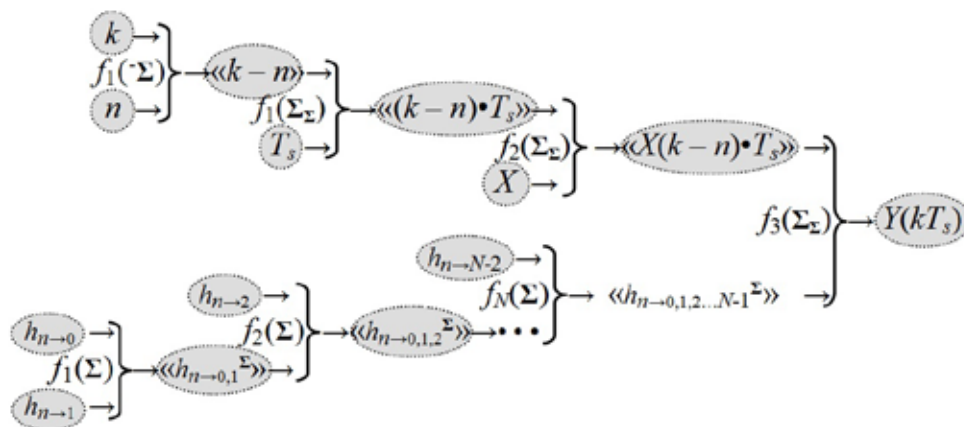


Рис. 7. Графоаналитическая модель структуры цифрового фильтра для вычисления среднего значения периодического сигнала

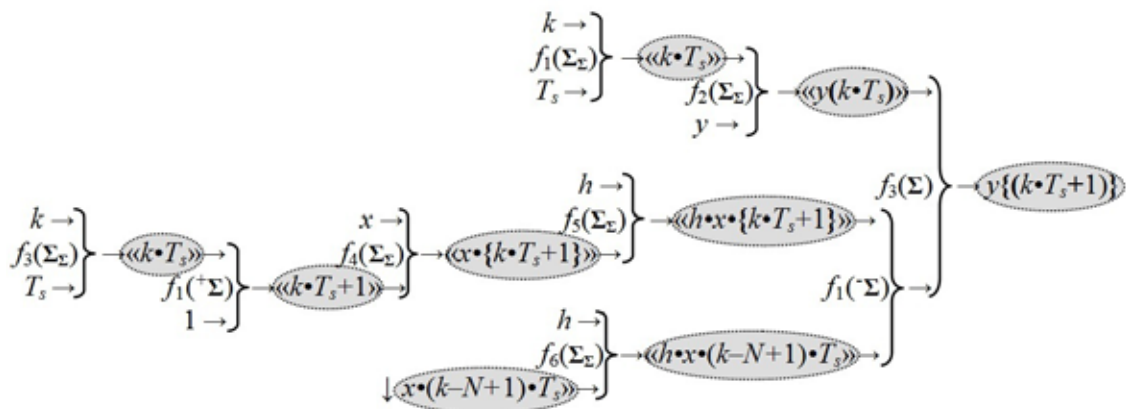


Рис. 8. Графоаналитическая модель оптимизированной структуры цифрового фильтра для вычисления среднего значения периодического сигнала

пильатора использовался Image Craft ICCAVR Ver 7.22C. Моделирование работы фильтров и определение времени выполнения алгоритмов ЦОС проводилось с использованием AVR Studio 4.12. В результате моделирования было установлено, что эффективность оптимизированной структуры цифрового фильтра растет с увеличением порядка фильтра нелинейно. Для высоких порядков фильтра (более 1000) время вычисления очередного выходного значения цифровым фильтром с оптимизированной структурой приблизительно в 2,5 раза меньше времени, требуемого для аналогичных вычислений цифровым фильтром с прямой (неканонической) реализацией.

Время реакции в рассмотренной структуре цифрового фильтра, реализующего алгоритм расчета среднего и среднеквадратического значений напряжения, составляет T_s . При этом увеличение частоты дискретизации в оптимизированной структуре фильтра не приводит к возрастанию количества арифметических операций сложения и умножения, что является преимуществом предлагаемой структуры фильтра по сравнению с аналогичными. Если длина линии задержки цифрового фильтра не совпадает с количеством выборок, приходящихся на один период периодических сигналов, в сигнале на выходе фильтра будут наблюдаться колебания. Использование микропроцессорной техники и программной реализации алгоритмов расчета позволяет исключить

это явление путем корректировки длины линии задержки цифрового фильтра в зависимости от частоты входного сигнала. Это придает разработанной системе свойство адаптивности, чем не обладают похожие системы.

Выводы. В статье предложен усовершенствованный метод описания структур цифровых фильтров путем формирования графоаналитической формы записи процедуры преобразования информационных аргументов в функциональных структурах. Такой подход дает возможность повысить информационное содержание математических моделей подсистем цифровой обработки сигналов и выполнить анализ системы путем многоуровневой декомпозиции. В свою очередь, это позволяет оценить качество ее структуры и элементов с позиции общего системного подхода, что упрощает проведение интеграционного тестирования системы ЦОС за счет формального определения всех возможных схем взаимодействия аппаратно-программных средств. Практическая ценность полученных результатов состоит в возможности формального решения задачи синтеза оптимизированных структур цифровых фильтров. С использованием предложенного метода выполнена оптимизация структуры системы ЦОС для определения среднего значения напряжения, которую можно использовать в радиоэлектронных и телекоммуникационных системах различного назначения.

Список литературы:

1. Grout Ian. Digital Systems Design with FPGAs and CPLDs. Oxford : Newnes, 2008. 784 p.
2. Kehtarnavaz N. Digital signal processing system design: LabVIEW-Based Hybrid Programming. Cambridge : Academic Press, 2008. 344 p.
3. Жуков К.Г., Бутусов Д.Н. Реализация цифровых фильтров методом последовательного интегрирования. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление.* 2009. № 6(91). С. 26–35.
4. Солонина А.И., Клионский Д.М., Меркучева Т.В., Перов С.Н. Цифровая обработка сигналов и Matlab. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2013. 512 с.
5. Мефедова Ю.А. Разработка модели для расчета коэффициентов цифрового БИХ-фильтра. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2016. № 4(46). С. 126–128.
6. Campbell St.L., Chancelier J.-P., Nikoukhah R. Modeling and Simulation in Scilab/Scicos with ScicosLab 4.4. New York : Springer, 2006. 330 p.
7. Zhao Jie. Modeling and Simulation of Digital Filter. *Proc. 4th National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (NCEECE 2015)*, December 12–13, 2015, Xi'an, China. P. 1333–1338.
8. Kocherzhinskaya Yu.V., Logunova O., Sibileva N. Usage of System Analysis Methods in the Software Products Engineering. *Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2018. Vol. 13. No. 9. P. 3294–3298.
9. Nikolic Sasa, Stancic Goran, Cvetkovic Stevica. Realization of digital filters with complex coefficients. *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics.* 2018. Vol. 17. No. 1. P. 25–38.
10. Wai-Kai Chen. Passive, Active, and Digital Filter. Boca Raton : CRC Press, 2009. 838 p.
11. Tian Xiao-hua, Zhao Xiao-lei, Zhang Dong, Gao Rui. Design and Implementation of Digital Filter for PMR. *Proc. International Conference on Modeling, Analysis, Simulation Technologies and Applications (MASTA 2019)*, May 26–27, 2019, Hangzhou, China. P. 127–131.
12. Каплун Дмитрий. Цифровые фильтры без умножений. *Компоненты и технологии.* 2007. № 67. С. 132–135.

13. Рябенкий В.М., Ушкаренко А.О. Метод синтеза математических моделей логико-динамических процессов контроля и управления. *Техническая электродинамика. Тем. выпуск.* 2011. № 2. С. 121–125.

14. Kadriu Edona, Bina Lufti. Design of recursive digital filters (IIR). *Proc. UBT International Conference*, 26–28 October, 2018, Durres, Albania. P. 336–337.

15. Mahmoud M.S. Al-suod, Ushkarenko O.O. Analytical Representation of Control Processes of Induction Motor and Synchronous Generator in Power Plants. *Jordan Journal of Electrical Engineering*. 2016. Vol. 2. No. 4. P. 278–288.

16. Mahmoud M.S. Al-suod, Ushkarenko O., Petrenko L. Analysis of logical-dynamic conversion processes in arithmetic devices of digital control systems. *Eastern European Journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 6. No. 4 (90). P. 28–34.

17. Попов Д. Оптимизация цифровых систем обработки сигналов. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2017. № 1(41). С. 96–104.

Ushkarenko A.O. USING OF MULTILEVEL DECOMPOSITION IN THE DEVELOPMENT OF GRAPHO-ANALYTICAL MODELS OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING SUBSYSTEMS

The paper presents an improved method for describing the structures of digital filters, which is featured by the increased information content of the obtained models of digital signal processing systems. The use of the proposed approach allows to synthesize graphic-analytical models of digital signal processing systems and analyze it by means of multilevel decomposition. This makes it possible to assess the quality of its structure and elements from the point of a general system approach and simplifies the integration testing of the digital signal processing system by formal defining all possible interaction schemes for hardware and software. In this case, all elements of the system are presented in the form of functional structures, and the processing of the input sample by a discrete system is considered as a process of converting input arguments using these functional structures. Rules for formal description of elements of digital signal processing systems have been developed and graphical-analytical models of basic structures of FIR and IIR digital filters have been obtained, the distinctive feature of which is increased information content. The practical value of the obtained results is the possibility of using a formal approach to solving the problem of synthesizing optimized structures of digital filters. The proposed method is used in the synthesis of an optimized structure of a digital filter for calculating the average and rms value of a deterministic periodic signal at the optimal speed of the discrete system and invariance to the sampling frequency. The time required to calculate the next output value by the optimized digital filter is 2.5 times less than the time required to perform all calculations when using an unoptimized digital filter structure. The models of digital filter structures presented in the paper can be used in radio-electronic and telecommunication systems for various purposes in the form of embedding units after integration with an object-oriented programming language.

Key words: digital filter, functional structure, analytic model, optimization, argument conversion.

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 62-503.56+681.514+628.538

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/08>**Бабіч В.Ф.**

Одеська національна академія харчових технологій

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ ДИСКРЕТНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЛАНЦЮГА ЗА ДІЇ ВИПАДКОВИХ ЗБУРЕНЬ

Оптимальний процес горіння в котельних та інших установках відбувається за стехіометричного співвідношення горючої частини палива і повітря в топковій камері з коефіцієнтом надлишку повітря 1,01...1,05 за умови повного змішування палива і повітря в пальникових пристроях. При цьому в димових газах або повністю відсутні продукти недопалювання – водень, окисли вуглецю тощо, або в них містяться їх сліди на рівні порогів чутливості газоаналізаторів, тобто в концентраціях, значно менших від гранично допустимих.

Безперервна оптимізація процесу горіння в промислових установках можлива шляхом підтримання оптимального коефіцієнту надлишку повітря. Рішення цієї задачі можливе лише у разі використання високочутливих методів аналізу продуктів горіння, наприклад, хроматографічних, поріг чутливості яких складає 10^{-3} ... 10^{-4} об.% щодо водню та окису вуглецю.

Дискретний принцип роботи хроматографічного аналізатора-коректора, а також обмежений ресурс його роботи в умовах випадкових збурень з боку складу палива та витрат повітря вимагає визначення оптимального періоду дискретності вимірювання складу димових газів, за якого по дискретним відлікам можливе одержання відтворюючої функції.

Виконаний аналіз дає підстави стверджувати, що у випадках, коли автокореляційні функції вхідних сигналів включають гармонійні складові, а транспортне запізнювання в дискретному ланцюзі вимірювання перевищує постійну часу, на величину інтервалу дискретності необхідно накладати як обмеження, як за максимальною величиною згідно з теоремою В.А. Котельникова, так і обмеження за мінімальною величиною, згідно з яким величина інтервалу дискретності повинна бути більше часу запізнювання.

Ключові слова: склад димових газів, оптимізація процесу горіння, дискретний аналіз, автоматичний газовий хроматограф, автокореляційна функція.

Постановка проблеми. Під час спалювання газоподібних та рідких органічних палив в котельних установках, в установках вогневого знешкодження токсичних відходів хімічних технологій тощо в атмосферне повітря надходить велика кількість потенційно небезпечних компонентів у димових газах (окисли: вуглецю CO , азоту NO , сірки SO_2 та ін.). Хімічні речовини, що надходять в атмосферне повітря від роботи технологічних установок промислових підприємств, можуть трансформуватися з утворенням більш токсичних сполук.

Для мінімізації токсичних газових викидів у навколишнє середовище з пристроїв спалювання необхідно використовувати високочутливі датчики концентрації небезпечних складових компонентів недопалювання в димових газах, поріг

чутливості яких повинен складати 10^{-3} ... 10^{-4} об.%. При цьому можливе підтримання оптимального коефіцієнту надлишку повітря 1,01...1,05 в топковій камері в умовах змінного складу палива [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для аналітичного контролю складу продуктів горіння палива застосовують різні фізико-хімічні методи аналізу, в тому числі з цією метою широко використовується газова хроматографія, яка дозволяє отримати інформацію про індивідуальний і груповий склад продуктів горіння [1–4]. Для використання в автоматичних системах оптимізації процесу спалювання нами був розроблений високочутливий автоматичний газовий хроматографічний аналізатор-коректор з мікропроцесорним управлінням «Хромавтокор-5» [5]. За принципом дії він виконує

циклічні аналізи складників димових газів водню H_2 , азоту N_2 та окису вуглецю CO , концентрація яких представляється у вигляді хроматографічних піків, площі яких пропорційні концентраціям відповідних аналізованих газів, та формує коригуючі впливи в регулятор повітря. Для підвищення надійності і тривалості безперервної експлуатації приладу як датчик складу димових газів потрібно визначити оптимальний період повторення його аналізів, тобто оптимальний інтервал дискретності у часі T .

Величина періоду повторення аналізів повинна вибиратися такою, щоб за миттєвими значеннями функції входу $x(t)$ за мінімальної кількості відліків можна було отримати із заданою точністю відтворюючу функцію $y(t)$. Збільшення періоду повторення відліків призводить до зниження точності відтворення, зменшення – до надмірної кількості відліків, що знижує ресурс приладу, зокрема його елементів – термокаталітичного детектора і адсорбенту хроматографічної розділової колонки. Необхідно враховувати також обмеження на мінімальну величину періоду повторення аналізу: $T > T_a$. Це означає, що інтервал дискретності аналізу T не може бути меншим за мінімально допустимий час циклу аналізу хроматографа T_a . Величина часу T_a визначається конструктивними і режимними характеристиками приладу: довжиною хроматографічної розділової колонки, витратою газу-носія, видом адсорбенту тощо.

Для сигналів з обмеженим спектром справедлива теорема В.А. Котельникова [10], згідно з якою безперервний сигнал повністю відновлюється за дискретними відліками, якщо дотримується умова $T \leq \pi/\omega_{gr}$, де ω_{gr} – верхня гранична частота безперервного сигналу. Теорему, очевидно, слід розглядати як наближене твердження для реальних сигналів, що мають зменшувальні за модулем спектри при $\omega \rightarrow \infty$, але фактично не є обмеженими [12]. Визначення ω_{gr} при цьому має умовний характер і оцінюється, наприклад, за енергетичними характеристиками спектра сигналу [7].

У роботі [9] були виконані дослідження дискретних ланцюгів, що включають транспортне запізнювання і фіксуючу ланку, на вхід яких подається випадковий процес з автокореляційною функцією

$$R(\tau) = R(0)e^{-\alpha|\tau|} \quad (1)$$

У подібних вимірювальних ланцюгах спостерігається переважання транспортного запізнювання τ_u над постійною часу T_u , причому виконується умова

$$\frac{\tau_u}{T_u} > 1,5. \quad (2)$$

Аналітичні дослідження ланцюгів такого типу показали, що як у разі детермінованих вхідних сигналів, так і під час вхідних сигналів з автокореляційною функцією виду (1) додаткова помилка дискретного вимірювання у разі використання фіксуючої ланки нульового порядку мінімальна, якщо інтервал дискретності обмежений «зверху» і «знизу» [9]:

$$\frac{\pi}{\omega_{gr}} \geq T \geq \tau_u. \quad (3)$$

Формулювання цілей статті. Визначимо справедливості цього твердження для випадку, коли функція входу є випадковим процесом з автокореляційною функцією типу «нерегулярної качки», характерної для сигналів зі складу димових газів установок спалювання газоподібних та рідких органічних палив та відходів хімічних технологій

$$R(\tau) = R(0)e^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \Omega\tau + \frac{\alpha}{\Omega} \sin \Omega\tau \right), \quad (4)$$

а також оцінимо доцільність адаптації властивостей фіксуючої ланки до несучої частоти процесу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відбірковий пристрій для подачі на аналіз димових газів розташовується в газоході установки якомога ближче до топкової камери. Аналізований газ перш ніж потрапити в детектор аналізатора, проходить через газохід в систему підготовки газу на аналіз.

Передавальні функції окремих включених послідовно елементів, що беруть участь у передачі інформації про склад аналізованого газу, мають вигляд:

– об'єму топкової камери і газоходу котельної установки до місця відбору газу на аналіз

$$W_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-\tau_m s}; \quad (5)$$

– ліній транспортування аналізованого газу від газовідбірного пристрою до аналізатора

$$W_n(s) = e^{-\tau_n s}; \quad (6)$$

– фільтрів підготовки газу на аналіз

$$W_\phi(s) = \frac{1}{T_\phi s + 1} e^{-\tau_\phi s}; \quad (7)$$

– розділової хроматографічної колонки і детектора аналізатора

$$W_a(s) = \frac{K_a}{T_a s + 1} e^{-\tau_a s}; \quad (8)$$

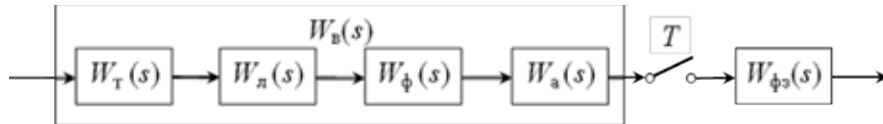


Рис. 1. Структурна схема дискретного вимірювального ланцюга складу димових газів

В автоматичному хроматографічному коректорі автоматичний дозатор, що є модулятором, розташований між фільтрами та колонкою. Віднесемо все транспортне запізнювання до безперервної частини ланцюга, умовно прийнявши розташування модулятора за колонкою (рисунок 1). Тоді загальний час запізнювання можна уявити як суму

$$\tau_u = \tau_m + \tau_n + \tau_\phi + \tau_a \quad (9)$$

Встановлено, що постійна часу фільтрів пристрою підготовки газу значно перевищує постійні часу інших елементів.

Не припускаючи значної похибки, можна ланцюг послідовно включених ланок розглядати таким, що складається з двох елементів: ємнісної ланки – фільтра і ланки транспортного запізнювання з передавальною функцією

$$W_u(s) = \frac{K_u}{T_u s + 1} e^{-\tau_u s}, \quad (10)$$

де $K_u = K_m K_u$ – коефіцієнт передачі вимірювального ланцюга;

$T_u \cong T_\phi$ – постійна часу вимірювального ланцюга.

У дискретному вимірювальному ланцюгу складу димових газів роль модулятора виконує автоматичний дозуючий пристрій, що подає в моменти часу nT дозу газів на аналіз у автоматичний газовий хроматограф. Отримані в кожному циклі аналізу піки хроматограм відображають безперервні функції вмісту водню H_2 і окису вуглецю CO , модульовані ґратчастою функцією з інтервалом повторення T . Перетворення дискретної інформації на неперервну виконується за допомогою екстраполятора, звичайно нульового порядку. Як екстраполятор застосовуються як аналогові фіксуючі ланки [6; 13], так і мікропроцесорні обчислювальні пристрої, що дозволяють зняти проблему розрядки фіксуючих конденсаторів загалом.

Передавальна функція фіксуючої ланки нульового порядку має вигляд [13]:

$$W_{\phi3}^0(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s}. \quad (11)$$

Застосування фіксуючих ланок вищого порядку може покращити точність відновлення функції входу, розширити спектр вхідних сигналів [6; 13]. Фіксуюча ланка першого порядку, що більш точно апроксимує вхідну функцію, має передавальну функцію [7]:

$$W_{\phi3}^1(s) = T(1 + Ts) \frac{1 - e^{-sT}}{s}. \quad (12)$$

Для певного класу вхідних сигналів узагальнена фіксуюча ланка з дробовим коефіцієнтом K може більш точно відновлювати функцію входу в порівнянні з ланкою першого порядку [7]. Передавальна функція такої ланки має вигляд

$$W_{\phi3}^K(s) = \frac{1}{s} (1 - e^{-sT}) \left[1 - Ke^{-sT} + \frac{K}{sT} (1 - e^{-sT}) \right], \quad (13)$$

причому, при $K = 0$ вона відображає властивості ланки нульового порядку, а при $K = 1$ – ланки першого порядку. Вибір величини K визначається насамперед зміною несучої частоти вхідного сигналу і вимагає надання фіксуючій ланці властивостей адаптації до неї.

Оцінку точності дискретного вимірювального ланцюга виконаємо за дисперсією сигналу на виході умовної схеми (рисунок 2), що формує різницю вхідного випадкового і вихідного, перетвореного ланцюгом, сигналів:

$$D_\varepsilon^*(\omega) = \frac{T}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{T}}^{+\frac{\pi}{T}} |1 - W^*(j\omega)|^2 S_{xx}^*(\omega) d\omega, \quad (14)$$

де $W^*(j\omega)$ – частотна характеристика дискретного вимірювального ланцюга (імпульсного фільтра);

$S_{xx}^*(\omega)$ – спектральна щільність потужності вхідного дискретного випадкового процесу $x^*(nT)$.

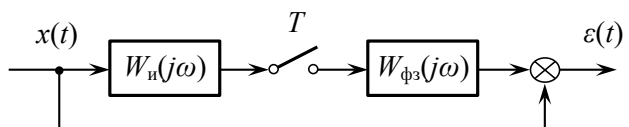


Рис. 2 Розрахункова схема дискретного вимірювального ланцюга

Дискретну передавальну функцію вимірювального ланцюга, що включає безперервну частину з передавальною функцією (10), модулятор з періодом повторення T і фіксуючу узагальнену ланку першого порядку, отримуємо, застосовуючи до виразу (10) модифіковане z -перетворення

$$W^*(z, m) = (1 - z^{-1})(1 - Kz^{-1})Z_m \left\{ \frac{W_u(s)}{s} \right\} + \frac{K}{T}(1 - z^{-1})^2 Z_m \left\{ \frac{W_u(s)}{s} \right\}, \quad (15)$$

де Z_m – символ операції модифікованого z -перетворення.

Виконавши Z_m -перетворення з урахуванням виразу (10), отримуємо наступне співвідношення

$$W^*(z, m) = (1 - z^{-1})(1 - Kz^{-1}) \left(\frac{1}{z-1} \right) + \frac{K}{T}(1 - z^{-1})^2 \left[\frac{e^{-m\omega_u T}}{\omega_u(z - e^{-m\omega_u T})} + \frac{T}{(z-1)^2} + \frac{m\omega_u T}{\omega_u(z-1)} \right], \quad (16)$$

де $m = 1 - \frac{\tau_u}{T}$; $\omega_u = \frac{1}{T}$.

Підінтегральний вираз $1 - W^*(j\omega)$ визначимо шляхом заміни змінної $z = e^{j\omega T}$. Після ряду перетворень виразу (16) отримуємо

$$1 - W^*(j\omega) = \frac{B_0 e^{3j\omega T} + B_1 e^{2j\omega T} + B_2 e^{j\omega T} + B_3}{e^{2j\omega T} (A_0 e^{j\omega T} + A_1)} = \frac{B_0 e^{j\omega T} + B_1 + B_2 e^{-j\omega T} + B_3 e^{-2j\omega T}}{A_0 e^{j\omega T} + A_1}, \quad (17)$$

де $B_0 = 1$; $B_1 = -\frac{K}{\beta}(e^{-\nu} + \nu - 1) - (e^{-\beta} - e^{-\nu} + 1)$;

$$B_2 = -\frac{K}{\beta} \left[(e^{-\beta} + 1)(1 - \nu) - e^{-\nu}(\beta - 2) \right] - (e^{-\nu} - e^{-\beta});$$

$$B_3 = -\frac{K}{\beta} \left[(e^{-\nu} - e^{-\beta}) + e^{-\beta}\nu - \beta e^{-\nu} \right];$$

$$A_0 = 1; \quad A_1 = -e^{-\beta}; \quad \beta = mT; \quad \nu = m\omega_u T.$$

Дискретна кореляційна функція випадкового процесу, характерного для зміни складу продуктів горіння, що надходить на вхід вимірювального ланцюга, отримана з виразу (4) шляхом підстановки $\tau = nT$.

$$R_{xx}(nT) = R(0)e^{-\alpha|nT|} \left(\cos \Omega nT + \frac{\alpha}{\Omega} \sin \Omega nT \right). \quad (18)$$

Дискретна спектральна щільність потужності дискретного випадкового процесу визначена з урахуванням (18) за співвідношенням

$$S_{xx}^*(z) = R_{xx}^*(z) + R_{xx}^*(z^{-1}) - R(0), \quad (19)$$

де $R_{xx}^*(z)$ – z -перетворення від кореляційної функції $R_{xx}(nT)$. З урахуванням перетворень окремих складових $S_{xx}^*(z)$ за таблицею 1 [10] отримуємо

$$R_{xx}^*(z) = R(0) \left[\frac{z(z - qb)}{z^2 - 2qbz + q^2} + \frac{czqa}{z^2 - 2qbz + q^2} \right] = R(0) \frac{z^2 + zq(ca - b)}{z^2 - 2qbz + q^2}, \quad (20)$$

$$R_{xx}^*(z^{-1}) = R(0) \left[\frac{z^{-1}(z^{-1} - qb)}{z^{-2} - 2qbz^{-1} + q^2} + \frac{cz^{-1}qa}{z^{-2} - 2qbz^{-1} + q^2} \right] = R(0) \frac{1 + zq(ca - b)}{1 - 2qbz^{-1} + q^2 z^2}, \quad (21)$$

де $q = e^{-\alpha T}$; $b = \cos \Omega T$; $a = \sin \Omega T$; $c = \frac{\alpha}{\Omega}$.

Розглядаючи спільно вирази (19)–(21), одержимо вираз для дискретної спектральної щільності:

$$S_{xx}^*(z) = R(0) \frac{z(D_0 z^2 + D_1 z + D_0)}{C_0 z^4 + C_1 z^3 + C_2 z^2 + C_1 z + C_0}, \quad (22)$$

де $D_0 = q[(ca - b) + q^2(ca + b)]$;

$$D_1 = 1 - 4cbqa^2 - q^4;$$

$$C_0 = q^2;$$

$$C_1 = -2qb(1 + q^2);$$

$$C_2 = 1 + 4q^2 b^2 + q^4.$$

Замінивши z на $e^{j\omega T}$, після перетворень одержаного виразу знайдемо вираз для функції спектральної щільності в частотній області

$$S_{xx}^*(\omega) = R(0) \frac{D_0 e^{2j\omega T} + D_1 e^{j\omega T} + D_0}{e^{j\omega T} |E_0 e^{2j\omega T} + E_1 e^{j\omega T} + E_2|^2} = R(0) \frac{D_0 e^{j\omega T} + D_1 + D_0 e^{-j\omega T}}{|E_0 e^{2j\omega T} + E_1 e^{j\omega T} + E_2|^2}, \quad (23)$$

де $E_0 = 1$; $E_1 = -2qb$; $E_2 = q^2$, а для отримання більш простого виразу знаменника використаємо співвідношення [8]:

$$e^{2j\omega T} (C_0 e^{2j\omega T} + C_1 e^{j\omega T} + C_2 + C_1 e^{-j\omega T} + C_0 e^{-2j\omega T}) = (24)$$

$$= e^{2j\omega T} (E_0 e^{2j\omega T} + E_1 e^{j\omega T} + E_2) (E_0 e^{-2j\omega T} + E_1 e^{-j\omega T} + E_2).$$

Покажемо, що рівняння (23) при $\Omega = 0$ приводиться до рівняння дискретної спектральної щільності

$$S_{xx}^*(\omega) = R(0) \frac{1 - q^2}{|e^{j\omega T} - q|^2}, \quad (25)$$

отриманої в роботі [9] для випадкового процесу з автокореляційною функцією (1). Для рівняння (23) при $\Omega = 0$

$$a = 0; \quad b = 1; \quad D_0 = -q(1 - q^2);$$

$$D_1 = 1 - q^4 = (1 - q^2)(1 + q^2);$$

$$E_0 = 1; \quad E_1 = 2q; \quad E_2 = q^2.$$

Підставляючи ці вирази в (23), отримуємо:

$$S_{xx}^*(\omega) = R(0) \frac{(1 - q)(-q e^{j\omega T} + 1 + q^2 - q e^{-j\omega T})}{|e^{2j\omega T} - 2q e^{j\omega T} + q^2|^2} = (26)$$

$$= R(0) \frac{(1 - q^2) |e^{j\omega T} - q|^2}{|e^{j\omega T} - q|^4},$$

Після скорочення чисельника і знаменника на $|e^{j\omega T} - q|^2$, одержимо шуканий вираз (25), що й треба було довести.

Вираз для відношення дисперсії вихідного сигналу цієї схеми до дисперсії вхідного сигналу отримаємо, вирішуючи спільно співвідношення (14), (17), (23):

$$\frac{D_x(\omega)}{R(0)} = \frac{T}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{T}}^{+\frac{\pi}{T}} \left| \frac{B_0 e^{j\omega T} + B_1 + B_2 e^{-j\omega T} + B_3 e^{-2j\omega T}}{G_0 e^{3j\omega T} + G_1 e^{2j\omega T} + G_2 e^{j\omega T} + G_3} \right|^2 \times (27)$$

$$\times (D_0 e^{j\omega T} + D_1 + D_2 e^{-j\omega T}),$$

$$\text{де } G_0 = 1; \quad G_1 = -(2qb + e^{-\beta});$$

$$G_2 = q(q + 2be^{-\beta}); \quad G_3 = -q^2 e^{-\beta}.$$

Подібні інтеграли обчислюються за стандартною методикою у вигляді суми інтегралів

$$J_{m,k} = \int_{-\frac{\pi}{T}}^{+\frac{\pi}{T}} \frac{e^{j\omega k T}}{|M_m(e^{j\omega T})|^2} d\omega, \quad (28)$$

$$\text{де } M_m(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^m M_{m-n}(e^{j\omega T}).$$

Позначимо

$$J_{3,k} = \int_{-\frac{\pi}{T}}^{+\frac{\pi}{T}} \frac{e^{j\omega k T}}{G_0 e^{3j\omega T} + G_1 e^{2j\omega T} + G_2 e^{j\omega T} + G_3} d\omega. \quad (29)$$

Виконавши ряд перетворень рівняння (27), а також з огляду на те, що для інтегралів виду (28) справедливе співвідношення

$$J_{m,k} = J_{m,-k}, \quad (30)$$

отримаємо вираз для визначення точності дискретного ланцюга:

$$\frac{D_x(\omega)}{R(0)} = (31)$$

$$= \frac{T}{2\pi} (2H_0 J_{3,4} + 2H_1 J_{3,3} + 2H_2 J_{3,2} + 2H_3 J_{3,1} + H_4 J_{3,0}),$$

де $H_0 = D_0 B_0 B_3$;

$$H_1 = D_0 (B_0 B_2 + B_1 B_3) + D_1 B_0 B_3;$$

$$H_2 = D_0 (B_1 B_3 + B_0 B_1 + B_1 B_2 + B_2 B_3) + D_1 (B_0 B_2 + B_1 B_3);$$

$$H_3 = D_0 (B_0 B_2 + B_1 B_3 + B_0^2 + B_1^2 + B_2^2 + B_3^2) + D_1 (B_0 B_1 + B_1 B_2 + B_2 B_3);$$

$$H_4 = D_0 (B_0 B_1 + B_1 B_2 + B_2 B_3) +$$

$$+ D_1 (B_0^2 + B_1^2 + B_2^2 + B_3^2).$$

Згідно з таблицею 2.4 [8] з урахуванням прийнятих вище позначень одержимо розрахункові вирази

$$J_{3,0} = \frac{2\pi}{TF} (G_0^2 + G_3^2 + G_0 G_2 - G_1 G_3); \quad (32)$$

$$J_{3,1} = \frac{2\pi}{TF} (G_0 G_1 - G_2 G_3); \quad (33)$$

$$J_{3,2} = \frac{2\pi}{TF} [G_1^2 - G_2^2 - (G_0 G_2 - G_1 G_3)]; \quad (34)$$

$$J_{3,3} = \frac{2\pi}{TF G_0} (G_1^3 - G_1 G_2^2 - 2G_0 G_1 G_2 + G_0^2 G_3 + G_1^2 G_3 + G_2^2 G_3 + G_0 G_2 G_2 - G_1 G_3^2 - G_1^3); \quad (35)$$

$$J_{3,4} = \frac{2\pi}{TF G_0^2} (G_1^4 - G_1^2 G_2^2 + G_0^2 G_2^2 + G_0 G_2^3 + 3G_0 G_1^2 G_2 + 2G_0^2 G_1 G_3 + -G_0 G_2 G_3^2 + G_1 G_2^2 G_3 + +G_1^3 G_3 - G_1^2 G_3^2 - G_1 G_3^3); \quad (36)$$

$$F = [G_0^2 - G_3^2 - (G_0G_2 - G_1G_3)] [(G_0 + G_2)^2 - (G_1 + G_3)^2]. \quad (37)$$

Алгоритм розрахунку точності дискретного вимірювального ланцюга (31) був реалізований в середовищі Matlab 7.

Розрахунки були виконані для значень комплексів $\tau_u/T_u = 1,0 \dots 7,5$; $\alpha T_u = 0,01 \dots 0,10$; $\alpha/\Omega = 0,1 \dots 1,0$ і 10^8 при

$m = 0,0 \dots 0,8$, характерних для реальних паливоспалюючих установок.

Відношення α/Ω , рівне 10^8 , взяте для одержання граничного випадку $\Omega = 0$, коли автокореляційна функція не містить гармонійних складників. Досліджувався вплив порядку фіксуючої ланки K зі значеннями порядку 0, 0,5 і 1,0.

Як показують розрахунки, відношення $\frac{D_\varepsilon(\omega)}{R(0)}$

має мінімум при $m = 0,1 \dots 0,29$, більш яскраво виражений в області великих значень τ_u/T_u . Збільшення відношення α/Ω від 0,2 до 1,0 призводить до десятиразового збільшення точності вимірювання (рисунок 3).

Незначне зміщення величини m при десятикратній зміні несучих частот вхідного сигналу α і Ω доводить недоцільність адаптації інтервалу дискретності T до цих частот. Це означає, що доцільно приймати $T = (1,15 \dots 1,37) \cdot \tau$, що відповідає $m = 0,15 \dots 0,27$. Зі збільшенням відношення τ_u/T_u оптимальне значення параметра m зменшується, а зменшення добутку αT_u не має істотного впливу на характер зміни m_{opt} (рисунок 4). При цьому параметр m залишається позитивним, що

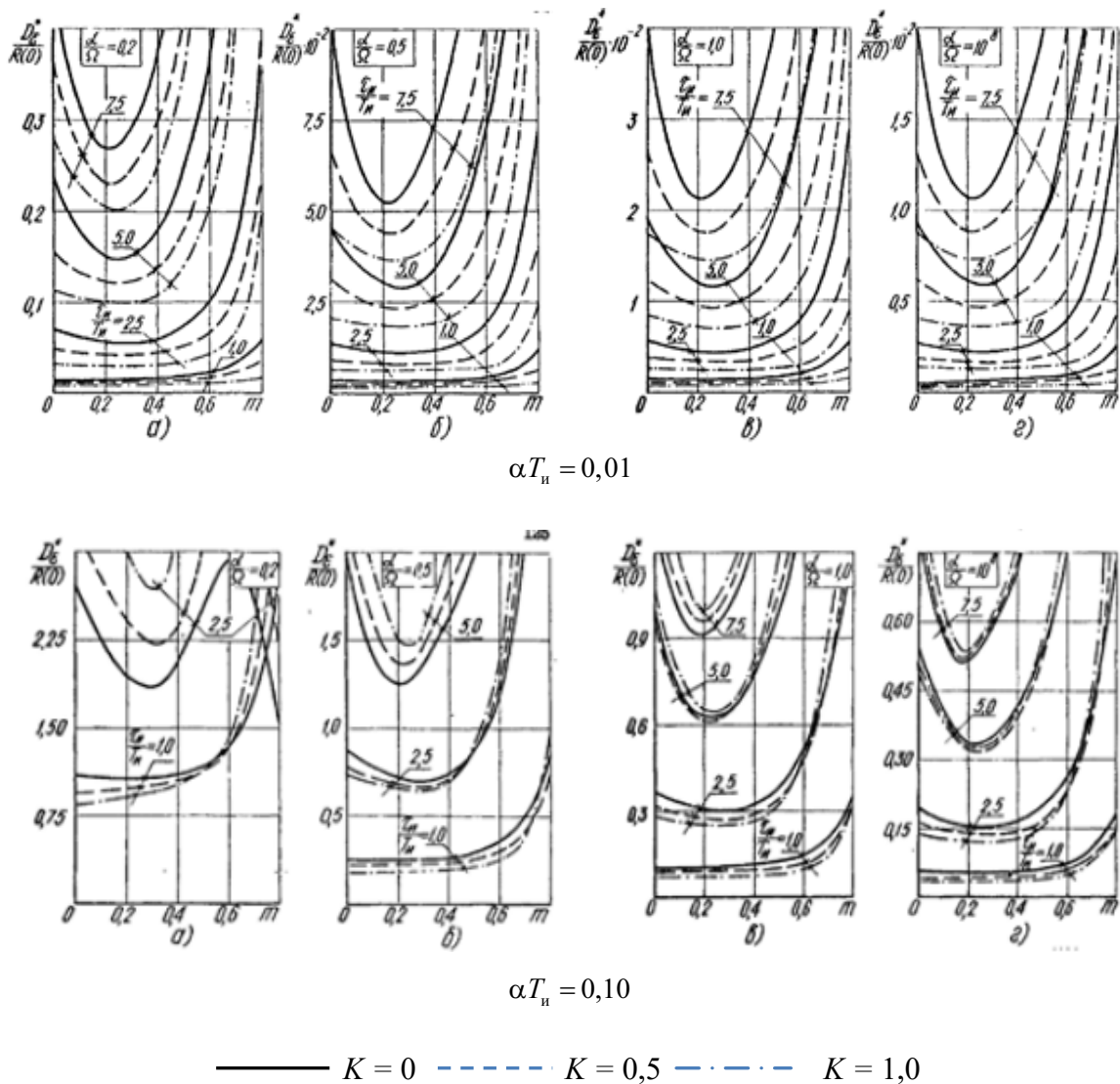


Рис. 3 Залежність відносної дисперсії помилки вимірювання від параметра m

означає виконання умови $T \geq \tau_u$. У разі невиконання цієї умови динамічна помилка вимірювання різко зростає.

Отже, за наявності в ланцюзі вимірювання транспортного запізнювання інтервал дискретності необхідно додатково обмежувати за мінімальною величиною, прийнявши умову

$$T \geq \tau_u. \quad (38)$$

Зміна порядку K фіксуєчої ланки може привести як до збільшення, так і до зменшення точності вимірювання (рисунок 5).

Теорема В.А. Котельнікова, виражена в прийнятих нами позначеннях відносного запізнювання m і визначальних комплексів $\alpha/T_u, \tau_u/T_u, \alpha/\Omega$ має вигляд:

$$D = \pi(1 - m), \quad (39)$$

$$\text{де } D = \frac{\left(\frac{\alpha}{T_u}\right) \left(\frac{\tau_u}{T_u}\right)}{\left(\frac{\alpha}{\Omega}\right)}.$$

Підвищення порядку фіксуєчої ланки збільшує точність вимірювання під час виконання більш жорсткої умови

$$D = 1 - m. \quad (40)$$

Залежність параметра D від визначальних комплексів наведена в таблиці 1.

Умову (39) можна виконати зміною як інтервалу дискретності, так і транспортного запізнювання в ланцюзі вимірювання. На рисунку 5 заштри-

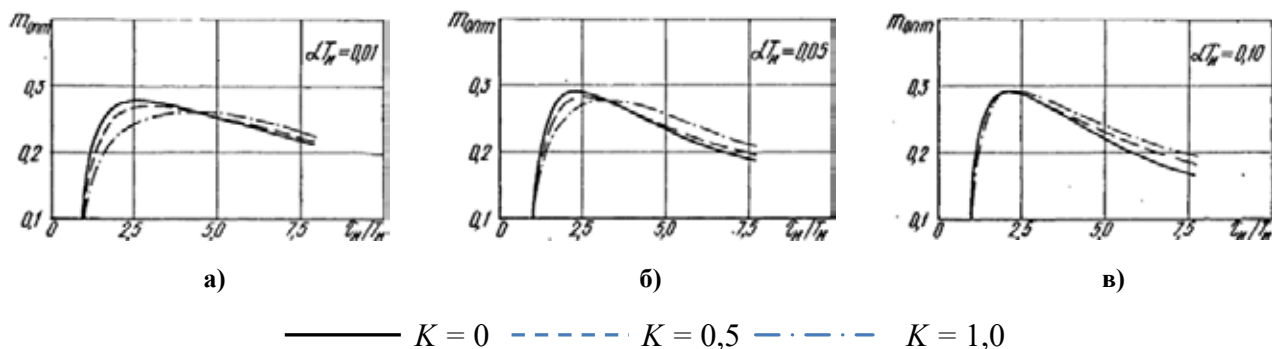


Рис. 4. Залежність оптимального значення параметра m від τ_u/T_u при $\alpha/\Omega = 0,1 \dots 1,0$

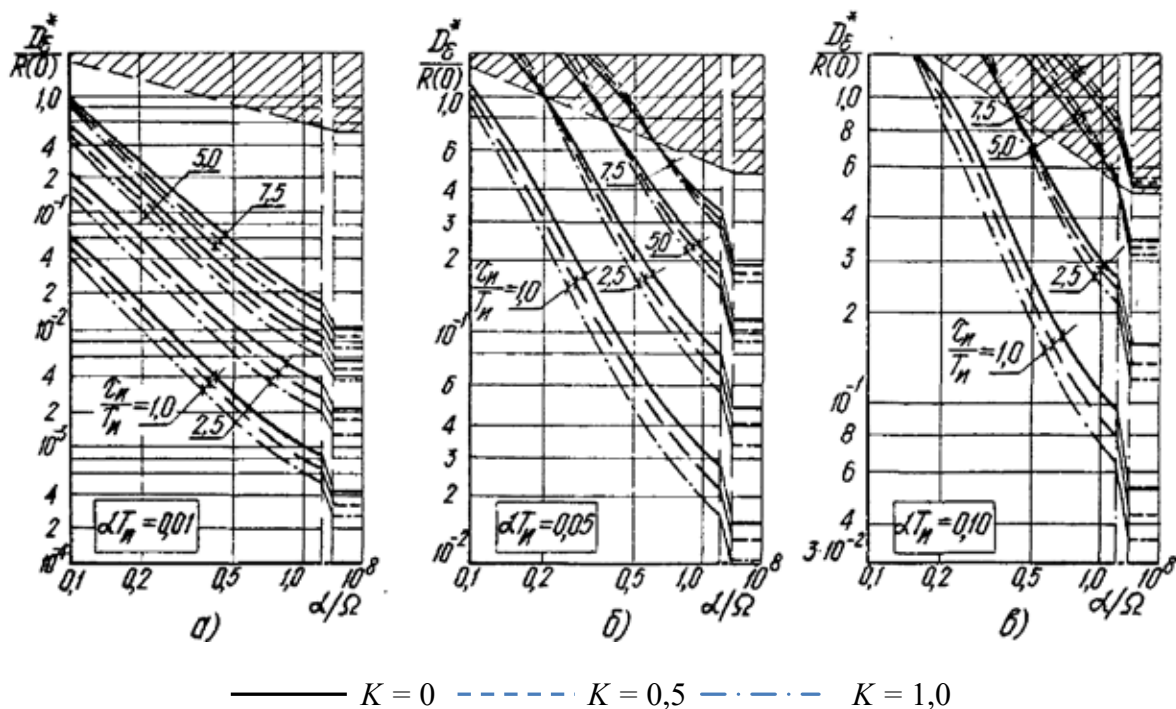


Рис. 5. Залежність мінімуму відносної дисперсії помилки від параметра α/Ω

Залежність параметра D від визначальних комплексів

αT_u	τ_u / T_u	α / Ω		
		0,20	0,50	1,0
0,01	1,0	0,050	0,025	0,010
	2,5	0,125	0,050	0,025
	5,0	0,250	0,100	0,050
	7,5	0,375	0,150	0,075
0,05	1,0	0,250	0,100	0,050
	2,5	0,625	0,250	0,125
	5,0	1,250	0,500	0,250
	7,5	1,375	0,750	0,375
0,10	1,0	0,500	0,200	0,100
	2,5	1,250	0,500	0,250
	5,0	2,500	1,000	0,500
	7,5	3,750	1,500	0,750

хована область, у якій недоцільне підвищення порядку фіксуючої ланки. Під час виконання умови (40) збільшення точності становить 10...50 відсотків, причому більший ефект досягається при $\tau_u / T_u = 1,0 \dots 2,5$ і α / Ω більше 0,3.

Висновки. Виконаний аналіз дає підстави стверджувати, що у випадках, коли автокореляційні функції вхідних сигналів включають гармонійні складники, а транспортне запізнювання

в дискретному ланцюзі вимірювання перевищує постійну часу, на величину інтервалу дискретності необхідно накладати як обмеження за максимальною величиною згідно з теоремою В.А. Котельникова, так і обмеження за мінімальною величиною, згідно з яким величина інтервалу дискретності повинна бути більше часу запізнювання. Ускладнення конструкції фіксуючої ланки звичайно не виправдовується одержаним ефектом.

Список літератури:

1. Гохберг Ж.-Г.Л. Исследование и оптимизация топочных процессов сжигания газа и мазута дискретным хроматографическим анализатором-корректором : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1968. 19 с.
2. Авдеева А.А. Хроматография в энергетике. Москва : Энергия, 1980. 271 с.
3. Александров Ю.Б., Савельева Н.И. Совершенствование газохроматографического метода анализа газообразного топлива и продуктов его горения. *Ученые записки Казанского государственного университета. Том 151, кн. 1. Естественные науки*, 2009. С. 73–78.
4. Сажин В.А. Оптимизация систем управления процессом термического обезвреживания отходов. *В кн.: Сборник докл. Междунар. Конф. «Математические методы в технике и технологиях»*. Псков. 2009.
5. А.с. 1046662 (СССР). Автоматическое устройство для определения и корректировки полноты сжигания углеводородных смесей и газов. / В.Ф. Бабич, В.Ю. Вадов, В.С. Полоник. Заявл. 5.06.1981, №3298866/18-25; Опубл. В Б.И., 1983, № 37.
6. Догановский С.А., Иванов В.А. Устройства запаздывания и их применение в автоматических системах. Москва : Машиностроение, 1966 . 280 с.
7. Кузин Л.Т. Расчет и проектирование дискретных систем управления. Москва : Машгиз, 1962. 684 с.
8. Лившиц Н.А., Пугачев В.И. Вероятностный анализ систем автоматического управления. Москва : Советское радио, 1963. Кн. 1, 896 с., кн. 2, 484 с.
9. Полоник В.С. Исследование и оптимизация огневого обезвреживания горючесоержащих газовых выбросов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 1974. 23 с.
10. Ротач В.Я. Импульсные системы автоматического регулирования. М.-Л.: Энергия, 1964. 224 с.
11. Солодов А.В. Теория информации и ее применение к задачам автоматического управления и контроля. Москва : Наука, 1967. 432 с.
12. Темников Ф.Е., Афонин В.А., Дмитриев В.И. Теоретические основы информационной техники: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, испр. и доп. Москва ; Энергия, 1979. 512 с.
13. Ту Ю.Т. Цифровые и импульсные системы автоматического управления: Пер. с англ. Под ред. В.В. Солодовникова. Москва : Машиностроение, 1964. 704 с.
14. Ялышев А.У., Разоренов О.И. Многофункциональные аналоговые регулирующие устройства автоматики. Москва : Машиностроение, 1981. 399 с.

Babich V.F. DETERMINATION OF DYNAMIC PRECISION DISCRETE MEASURING CIRCUIT UNDER THE ACTION OF RANDOM PERTURBATIONS

Optimal combustion process in the boiler and other installations to occur when the stoichiometric ratio of the combustible portion of fuel and air in the combustion chamber with the excess air ratio of 1.01 to 1.05... assuming complete mixing of fuel and air in the burner devices. At the same time in the flue gas or no products of incomplete combustion – hydrogen, oxides of carbon, etc., or they contain their footprints on the level of thresholds of sensitivity of gas analyzers, that is in concentrations much lower limit.

Continuous optimization of the combustion process in industrial installations possible by maintaining optimal air excess factor. The solution to this problem is possible only when using highly sensitive methods of analysis of combustion products, for example, chromatography, the sensitivity threshold is 10^{-3} ... 10^{-4} vol.% relative hydrogen and carbon monoxide.

Discrete principle of operation of a chromatographic analyzer corrector and limited resource of his work in terms of the random disturbances from the fuel and air flow requires the determination of the optimal period of discreteness measure the composition of flue gases, at which the discrete samples it is possible to obtain a reproducing function.

The analysis gives grounds to assert that in cases where the autocorrelation function of the input signals include harmonic components, and transport delay in the discrete-time measuring circuit exceeds the time constant, the magnitude of the interval of discreteness is necessary to impose restrictions as to the maximum size according to the theorem of V. A. Kotelnikov, and a restriction on the minimum value, whereby the spacing of the discontinuity must be greater than the time delay.⁷

Key words: *composition of flue gases, optimizing combustion process, discrete analysis, automated gas chromatograph, autocorrelation function.*

Вакалюк Т.А.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Болотіна В.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Чижмотря О.Г.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Чижмотря О.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Генвальдт А.С.

Державний університет «Житомирська політехніка»

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ FREELANCE БІРЖІ

У статті проаналізовано та досліджено найбільш важливу та актуальну інформацію щодо розробки додатка, а саме основні принципи створення вебдодатків, їх структури та функціональні можливості та взаємодію основних компонентів. Аналіз наявних web-орієнтованих систем freelance біржі дав змогу встановити, що основними рисами розроблюваного продукту мають бути: сучасний мінімалістичний дизайн, наявність зручного інтерфейсу, особистий кабінет, де користувач зможе налаштувати власний профіль, можливість для створення портфоліо виконавців та проектів замовниками. Були розглянуті сучасні технології створення сайтів, які використовуються розробниками у всьому світі. Для збереження створених записів та персональних даних користувачів було вибрано СУБД MySQL, оскільки вона проста у використанні, має практично всі необхідні інструменти, які можуть знадобитися в реалізації будь-якого проекту, є безпечною, масштабованою та швидкою. Під час проектування web-орієнтованої системи було проаналізовано функціональні вимоги до вебсайту, розроблено діаграму сутностей класу та побудовано діаграму використання користувачами додатка. Для реалізації серверної частини вибрано популярний фреймворк Symfony, який реалізує архітектурний шаблон MVC, клієнтська частина реалізована за допомогою javascript-бібліотеки – ReactJS. Були вибрані оптимальні архітектурні шаблони для реалізації системи. Варто зазначити, що взаємодія між бекенд та фронтенд частинами відбувається за допомогою архітектурного стилю – RESTAPI. Під час розробки сайту було проведено тестування функціональної частини та зручності використання системи користувачами. Реалізований програмний продукт готовий для використання користувачами. Надалі систему можливо розширювати, створюючи новий функціонал та покращувати наявний.

Ключові слова: розробка, проектування, web-орієнтована система.

Постановка проблеми. Останніми роками Інтернет чинить величезний вплив на розвиток світових компаній, змінюючи засоби ведення бізнесу на світовому ринку праці у режимі онлайн, наприклад, служба технічної підтримки користувачів 24/7, а також створює нові умови конкуренції між світовими лідерами. Натепер із розвитком малого, середнього та великого бізнесу за допомогою всесвітньої мережі економічний стан країни дещо покращився: з'явилися нові робочі місця та посади.

Проаналізувавши зацікавленість користувачів у сфері зайнятості та пасивний дохід від реклами,

сучасний світ створює все більше веб та мобільних додатків, які допомагають так званим «фрілансерам» (особи, які шукають роботу самостійно) та замовникам (ті, хто пропонують роботу) укласти між собою неофіційну угоду про виконання проекту та вчасну виплату узгодженої заздалегідь оплати праці. Об'єднавши критерій масового маркетингу та інтерес людей у отриманні/наданні роботи, ми створюємо потужну вебсистему, яка надає послуги зручного, швидкого та надійного пошуку замовлень для фрілансерів та їх створення безпосередньо роботодавцями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наявних web-орієнтованих системи freelance біржі [1] (FL [2], Freelancer [3], Doit.ua [4]) дав змогу встановити, що основними рисами розроблюваного продукту мають бути: сучасний мінімалістичний дизайн, наявність зручного інтерфейсу, особистий кабінет, де користувач зможе налаштувати власний профіль, можливість для створення портфоліо виконавців та проектів замовниками.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення вебдодатка для пошуку роботи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Такий програмний продукт повинен працювати у двох режимах: режим замовника та режим «фрілансера» (вільнонайманця). Отже, у такий спосіб користувачі зможуть як заохочувати нових працівників до проекту та створювати вакансії на посади, так і заробляти, виконуючи відповідні замовлення. Кожен зможе вибрати той режим роботи, який більше до вподоби.

Для розробки бекенд частини вебдодатка був вибраний архітектурний патерн “MVC”, який ідеально підходить для вищезазначеного сценарію написання сайту. Цей шаблон проєктування поділяє такі програми, призначені для користувацького інтерфейсу, та керуючу логіку на три окремі компоненти, а саме: контролер, модель та представлення таким чином, що зміна кожного компонента може здійснюватися незалежно.

Опишемо основні компоненти шаблону проєктування “MVC”:

1. Контролер (Controller) зазвичай виконує роль сполучення між запитом користувача, моделлю та представленням. Саме контролер є точкою входу на сайт. Його основна функція – викликати і координувати дію необхідних ресурсів і об'єктів, потрібних для виконання дій, що задаються користувачем, наприклад, зберегти дані до бази даних чи, навпаки, відправити дані у представлення. Зазвичай контролер викликає відповідну модель для задачі і вибирає відповідний вид.

2. Модель (Model) – це той компонент, який працює з даними. Цей компонент вміє додавати записи в базу даних, видаляти їх, змінювати або ж просто отримувати їх звітти. Завдання моделі – отримати дані і передати їх у такому разі до контролера. Таким чином, контролер може отримувати дані від моделі або ж передавати ці дані в модель.

3. Представлення (View) – частина програми, що забезпечує різні способи представлення даних, які отримані з моделі. Цей компонент може бути шаблоном, який заповнюється даними. Може бути

кілька різних представлень, і контролер вибирає, який підходить якнайкраще для поточної ситуації.

Окрім шаблону проєктування “MVC” для виконання відповідних задач та написання якісного та розширюваного програмного продукту, було вибрано ще декілька патернів, а саме: «Одинак» (Singleton), «Наслідування з єдиною таблицею» (SingleTableInheritance), «Репозиторій» (Repository).

Варто зазначити, що бекенд та фронтенд частини вебдодатка працюють окремо, особливо коли розміщені під різними доменами. Тому для їх коректної взаємодії між собою використовується архітектура “REST”. “REST” (Representational state transfer) – це стиль архітектури програмного забезпечення для розподілених систем, таких як World Wide Web. У загальному випадку “REST” є дуже простим інтерфейсом передачі інформації у тому вигляді, у якому вона представлена.

Для створення web-орієнтованої системи було вибрано такі програмні продукти та середовища розробки: PHP фреймворк Symfony 5.1, JavaScript бібліотека React, фреймворк для роботи з api – APIPlatform, середовище розробки PhpStorm 2019.3, середовище розробки IntelliJIDEA 2019.3, середовище тестування REST, SOAP та GraphQL запитів Postman.

Однією з найголовніших цілей створення web-орієнтованої системи freelance-біржі є насамперед залучення нових користувачів всесвітньої мережі до працевлаштування у режимі онлайн. Постає завдання створити зручний та максимально зрозумілий для користування сервіс, який би надав певний аналітичний функціонал для статистики прибутку для фрілансерів та замовників, а також кількість зайнятих у роботі користувачів. Таким чином, реалізувавши такий вебдодаток, зможемо дослідити зацікавленість людей у залученні до праці на біржах фрілансу.

Визначимо низку вимог до такого програмного продукту. *Бізнес-вимоги:*

1. Основні цілі: проєкт створюється з метою долучення людей до працевлаштування через Інтернет.

2. Можливості: однією з можливостей web-орієнтованої системи є аналітика прибутку та виконаних робіт за певний проміжок часу для фрілансера та замовника, а також статистика для адміністрації сайту, наприклад, яка кількість нових зареєстрованих користувачів та скільки фрілансерів отримали замовлення.

3. Представлення проєкту: проєкт буде реалізовано у вигляді вебсайту, який має зручний та привабливий інтерфейс, а також містить необхідні відомості з цієї тематики.



Рис. 1. Варіанти використання користувачем web-орієнтованої системи freelance біржі

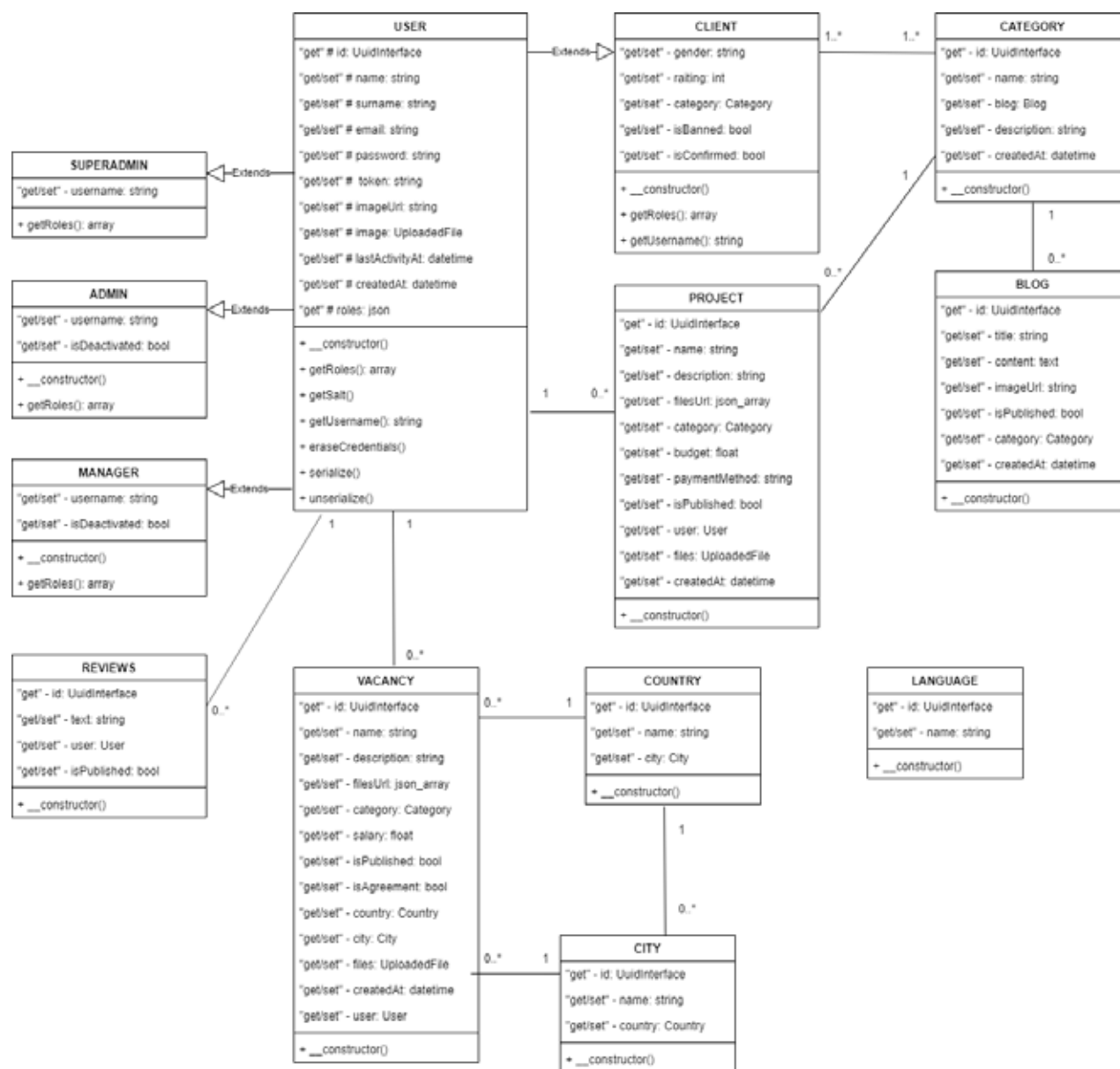


Рис. 2. Діаграма класів

Вимоги до дій користувачів:

1. Можливість реєстрації на сайті користувачів з підтвердженням електронної пошти через унікальне посилання.
2. Можливість авторизації на сайті та доступ до особистої «адміністративної» панелі.
3. Можливість створення замовлення, а також редагування та видалення запису (доступ лише у тому разі, коли користувач авторизований як замовник).
4. Можливість створення вакансії, а також редагування та видалення запису (доступ лише у тому разі, коли користувач авторизований як замовник).
5. Можливість зміни пароллю та персонального фото профілю.
6. Можливість пошуку даних, фільтрація та сортування.
7. Можливість перегляду рейтингу фрілансера для користувачів та відвідувачів сайту.
8. Можливість перегляду статистики виконаних замовлень за відповідний проміжок часу.

Функціональні вимоги:

1. Використання web-орієнтованої системи: у додатку повинна бути представлена можливість створення замовлень та вакансій замовниками, а також відгук на ці записи фрілансерами. Такий функціонал є однією з найважливіших реалізацій сайту біржі.
2. Розміщення даних: розміщення замовлень та вакансій відбувається безпосередньо за участю менеджера-модератора, який після перевірки коректності даних розміщує записи для публічного перегляду користувачами додатка.
3. Оплата за виконану роботу: оплата замовлення відбувається безпосередньо за угодою між замовником та фрілансером.

Аналіз функціональних вимог дав змогу виділити такі сутності, що забезпечать реалізацію програмного комплексу системи. На рис. 2 наведено діаграму класів, які використовуються користувачами web-орієнтованої системи freelance біржі.

За результатами UML діаграми можна виділити класи, які спроектовані за допомогою патерну «Наслідування з єдиною таблицею». Така архітектура реалізує одну з трьох основних парадигм ООП, а саме поліморфізм. Поліморфізм – це здатність об'єкта використовувати методи похідного класу, який не існує на момент створення базового.

У такому разі абстрактний клас User – це клас-шаблон. Він реалізує функціональність тільки на тому рівні, на якому вона відома на поточний момент. Похідні ж класи її доповнюють.

На діаграмі класів (рис. 2) зображені такі сутності:

– User – абстрактний клас, який реалізує логіку авторизованих користувачів вебдодатка. Клас наслідує інтерфейс Serializable для авторизації користувача у системі та збереження всіх даних у сесії сайту. Також абстрактний клас User наслідує та перевизначає п'ять основних методів інтерфейсу UserInterface, які необхідні для визначення користувача у системі та збереження особистих даних користувачів від потенційних зловмисників:

– getUsername() – такий метод повинен повернути будь-яке призначене для користувача унікальне поле, наприклад, адресу електронної пошти, логін чи ідентифікатор типу uuid. Функціонал реалізовано тільки для того, щоб показати розробнику додатка, хто увійшов у систему у разі налагодження;

– getRoles() – повертає роль авторизованого користувача у вигляді масиву даних;

– getPassword(), getSalt(), eraseCredentials() – реалізація таких методів необхідна тільки в тому разі, якщо додаток несе особисту відповідальність за зберігання і перевірку користувальницьких паролів;

– Superadmin – клас реалізований для збереження особистих даних користувачів, які мають найвищі привілеї над усіма ролями додатка. Такий користувач має доступ до всіх даних web-орієнтованої системи;

– Admin – зберігає дані адміністраторів додатка, які мають права суперадміністратора. Винятком є те, що користувач не має можливості реєструвати у системі адміністраторів;

– Manager – клас зберігає дані менеджерів сайту, які виконують модерацию даних на сайті та публікують узгоджені з правилами web-орієнтованої системи записи. Це стосується даних, які будуть відображатися на сторінках сайту, які не мають обмежень у разі перегляду контексту;

– Client – такий клас реалізований для збереження даних про зареєстрованого користувача вебдодатка. Користувач має можливість створювати замовлення та вакансії у тому разі, якщо він авторизований як замовник, у іншому разі брати замовлення у роботу;

– Category – зберігає інформацію про категорії, наприклад, дизайн інтер'єру чи мобільну розробку, за якими створюються замовлення, вакансії та статті. Такий функціонал створений для зручної навігації по сайту та швидкого пошуку необхідної інформації користувачами вебдодатка;

- Blog – клас зберігає статті вебдодатка, які пишуть користувачі сайту за відповідною тематикою, за якою спеціалізуються та яку вибрали під час реєстрації на сайті. Після модерації менеджером пост блогу відображається разом з іншими статтями;
- Project – клас реалізує збереження даних про створені замовлення користувачами або здебільшого адміністрацією сайту. Запис містить назву, детальний опис про роботу, яку потрібно виконати разом з файлами (якщо наявні), вартість, спосіб оплати та автора проєкту;
- Vacansy – такий клас зберігає інформацію про вакансії, які розміщують на сайті замовники для пошуку нових співробітників. Вакансія містить детальний опис, запропоновану заробітну плату та інформацію про країну та місто, у якому проживає потенційний працівник;
- Country – містить інформацію про всі країни світу;
- City – такий клас зберігає назву міста та ідентифікатор країни, де розташований;
- Reviews – зберігає відгуки користувачів на сайті.

Таким чином, така система реалізує функціонал web-орієнтованої системи freelance біржі.

Серверна частина вебдодатка зберігає додані файли до відповідних замовлень та вакансій, а також зображення профілю зареєстрованих у системі користувачів. Файли зберігаються у відповідну директорию, яку розробник створює на початку проєктування. Для вакансій – це каталог “vacansy”, замовлення – “project”, а для зображення про-

філю – “profile”. Перед завантаженням файлів створюється підкаталог з унікальним іменем. У цьому разі береться унікальний ідентифікатор замовлення чи вакансії. Таким чином, час, витрачений на пошук конкретних файлів, значно мінімізується.

Вебдодаток, як і більшість подібних сайтів, розділений на загальнодоступну (клієнтську) та адміністративну частини. Адміністративна частина сайту є окремим його складником, вхід у який можливий тільки користувачам з відведеним доступом. По суті, це додатковий сайт зі своїм дизайном та функціоналом. Завдання до адміністративної частини ставляться, виходячи з функціоналу сайту.

Кожен співробітник вебсайту має відведений обліковий запис та роль. Нижче наведений детальний опис користувачів адміністративної панелі:

- Суперадміністратор є керівником над усіма співробітниками. Він не має обмежень щодо функціональності на сайті. Загалом такий користувач слідкує за порядком на сайті та реєструє адміністраторів. Але також може створювати замовлення та вакансії, банити клієнта та опублікувати статті.

- Адміністратор є заступником суперадміністратора. Як і керівник, він не має обмежень. Адміністратор може реєструвати менеджерів, слідкувати за статистикою і т. д.

- Менеджер-модератор має більш обмежені права ніж керівництво. Головним завданням співробітника є модерація замовлень, вакансій та постів блогу.

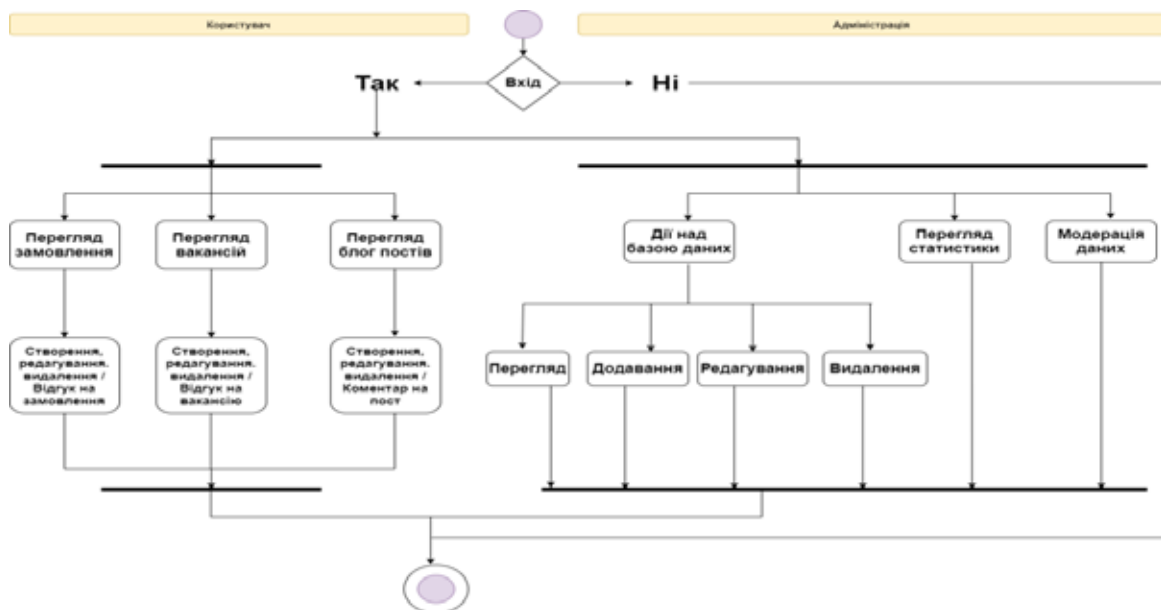


Рис. 3. Діаграма активності роботи програми

Після того як користувач потрапив на сайт (рис. 3), він має можливість продивлятися загальнодоступну інформацію, а саме: проекти для виконання замовниками, вакансії та статті блогу, які пишуть фрілансери за індивідуальною сферою спеціалізації. Функціонал створення відповідної інформації доступний лише для авторизованих користувачів, отже, наступним кроком є реєстрація на сайті. Після підтвердження електронної пошти та авторизації користувачу доступні вищеперелічені функції, а також редагування інформації особистого профілю та зміна паролю.

Для того щоб створити запис, користувач повинен заповнити відповідну форму та зберегти дані. Якщо вхідні дані були введені некоректно, то система видасть відповідну помилку для користувача.

Варто зазначити, що після створення замовлення, вакансії чи статті запис не відразу відображається для перегляду іншим. Для того щоб опублікувати інформацію, вона повинна пройти модерацию адміністрацією вебдодатка. Менеджер-модератор авторизується у системі та перевіряє текст. У разі якщо запис відповідає вимогам системи, то співробітник натискає на спеціально відведену кнопку й інформація автоматично з'являється на загальнодоступних сторінках вебсайту.

Для більш детального пошуку роботи супер-адміністратори та адміністратори можуть створювати категорії спеціалізації різних напрямів, наприклад, вебдизайн або переклад текстів з іноземних мов. Після того як вони будуть опубліковані для перегляду, на головній сторінці з'являється список усіх категорій, які є посиланнями на сторінку з усіма проектами від замовників. Фрілансер може вибрати собі роботу та домовитися персонально з власником щодо оплати праці та більш детальних рекомендацій.

Список вакансій, як і блог постів, розміщується на окремих сторінках сайту. На таких сторінках є фільтр по категоріях для зручного пошуку за спеціальностями, а також можливість продивлятися увесь список. Варто зазначити, що у разі першого перегляду даних для користувача відображаються тільки ті записи, які відповідають вибраній спеціалізації під час реєстрації на сайті. Це може бути як одна категорія, так і декілька. Також присутня пагінація для коректного відображення та зручної навігації.

Для користувачів у особистому кабінеті є окрема сторінка зі статистикою за певний період. Авторизований користувач може переглядати, наскільки його рейтинг покращився або погіршився, скільки замовлень було отримано і виконано.

Керівництво системи має можливість слідкувати за статистикою всього проекту для аналізу зацікавленості користувачів та прибутку. На сторінці продемонстровано кількість зареєстрованих користувачів за певний період, кількість нових замовлень та вакансій, найпопулярніші спеціалізації, а також скільки фрілансерів відгукнулися на проекти.

На сайті присутня можливість створювати відгуки для авторизованих користувачів. Клієнт може висловити власну думку щодо додатка та сервісу обслуговування. Коментар виводиться на сторінку тільки після модерації. Також можливо зазначити, що адміністрація не може створювати відгуки на сайт.

На рис. 4 та рис 5. зображені діаграми послідовності для варіантів використання web-орієнтованої системи freelance біржі.

Структура інтерфейсу та порядок роботи з web-орієнтованою системою freelance біржі

У разі переходу на сайт за відповідним URL з'являється домашня сторінка додатка. На рис. 6 наведено зображення головної сторінки з вибором відповідного пункту меню: «Головна», «Вакансії», «Блог», «Про нас», «Увійти», які є посиланнями. Неавторизований користувач має змогу переглядати замовлення, вакансії та статті блогу, але не може створювати персональні записи та писати коментарі.

Для того щоб почати повноцінну роботу з додатком, користувачеві, який вперше увійшов на сайт, потрібно зареєструватися. Перед тим як зареєструвати сайт пошуковими системами, адміністрація повинна наповнити динамічні записи вебдодатка для подальшого користування. Система автоматично створює обліковий запис для супер-адміністратора, основним завданням якого є створення адміністраторів. Для цього на адміністративній панелі у пункті «Адміністратори» потрібно натиснути на кнопку «Зареєструвати адміністратора». Відкриється форма, де потрібно ввести дані та натиснути на «Створити». Варто зазначити, перед полями вводу у формі присутній текст, який коротко описує як зареєструвати адміністратора. Після успішної операції надсилається лист на вказану електронну пошту з логіном та паролем, а у списку з'являються дані співробітників.

На кожній сторінці адміністративної панелі є можливість фільтрувати дані, таким чином пошук серед багатьох даних спрощується. У тому разі, якщо адміністратор більше не працює у компанії, його можна деактивувати, а після певного часу обліковий запис видаляється автоматично системою. Якщо під час створення адміністратора



Рис. 4. Алгоритм роботи створення відгуку на сайт



Рис. 5. Алгоритм створення вакансії на сайті

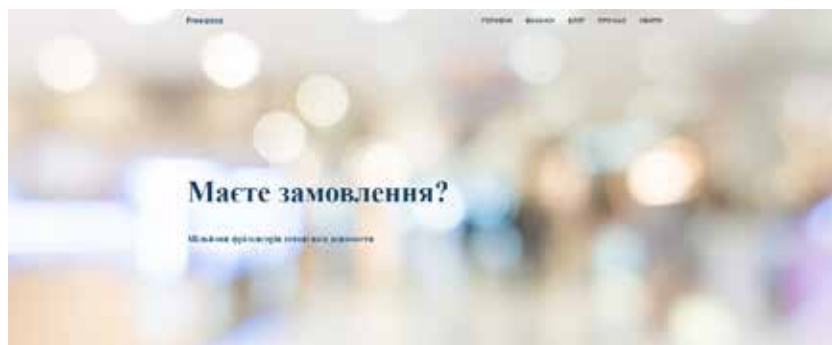


Рис. 6. Головна сторінка сайту

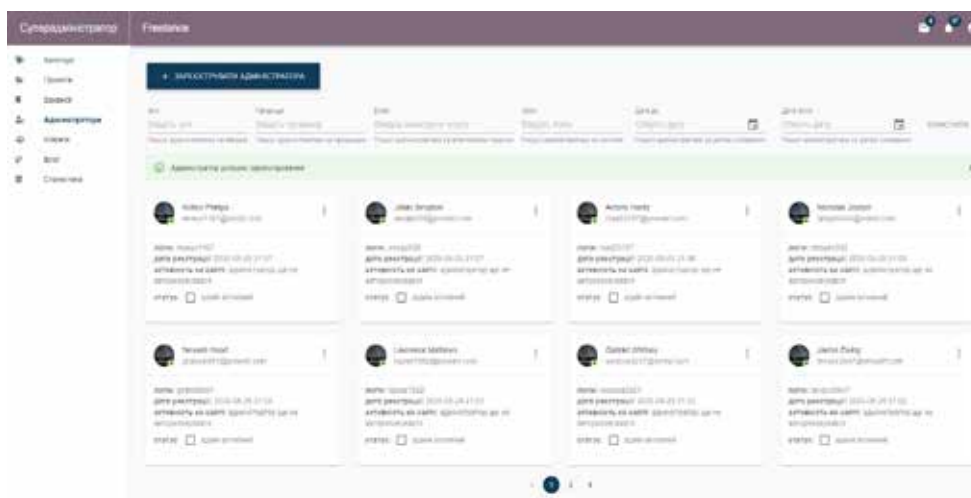


Рис. 7. Список усіх адміністраторів системи з пагінацією

суперадмін припускається помилки, він може у пункті меню вибрати «Редагувати адміністратора» та виправити помилку у формі (рис. 8).

Перед тим як створювати нові замовлення, вакансії та статті блогу потрібно створити декілька категорій, з якими будуть працювати користувачі системи. Створення категорії відбувається суперадміном або адміном, менеджери-модератори не мають такої можливості. Для створення спеціалізацій потрібно натиснути на посилання «Категорії» у пункті меню панелі. Натиснувши на кнопку «Створити категорію», з'являється форма, де потрібно ввести назву та опис до спеціалізації (рис. 9). Після того як співробітник системи ввів усі дані, необхідно натиснути на кнопку «Створити», а у разі якщо потрібно закрити форму без збереження даних – «Скасувати». Якщо під час створення дані не коректні, виведеться повідомлення з помилкою.

Після створення всіх категорій користувач може створити замовлення або вакансію. У адмі-

ністративній панелі для створення проекту замовник повинен перейти за посиланням «Проекти».

Після натискання кнопки «Створити запис» у новому вікні відкривається форма. Користувачу потрібно заповнити всі обов'язкові поля, а саме: назву проекту, опис, спеціальність (категорія), бюджет та спосіб оплати (з банківської карти або незахищена угода).

Під полями вводу назви та опису є підказка у вигляді максимальної кількості символів та кількість введених. Файли не є обов'язковими для заповнення, але за бажанням можна додати для більш детальної інформації для фрілансера. У разі, якщо дані не є коректними, наприклад, файл не відповідає одному з форматів, прописаних системою або занадто коротка назва для проекту, система видасть повідомлення про помилку і не збереже дані у базі даних. Якщо потрібно повернутися до списку проектів, на сторінці є посилання у вигляді стрілки.

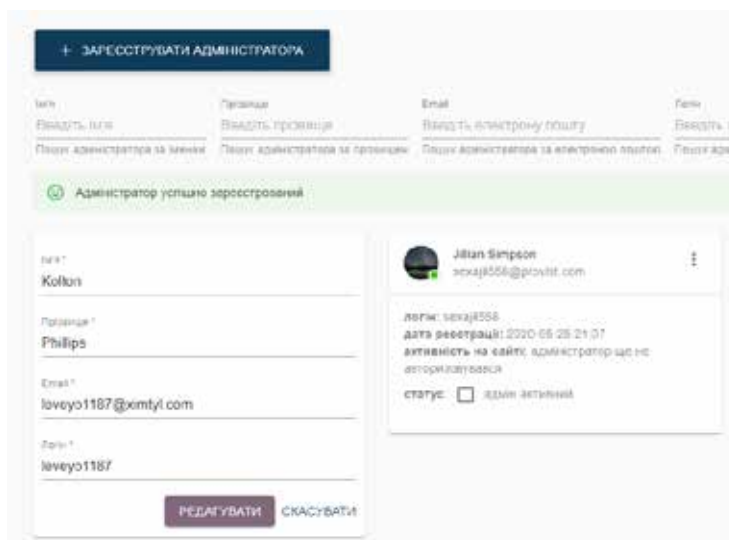


Рис. 8. Форма редагування адміністратора

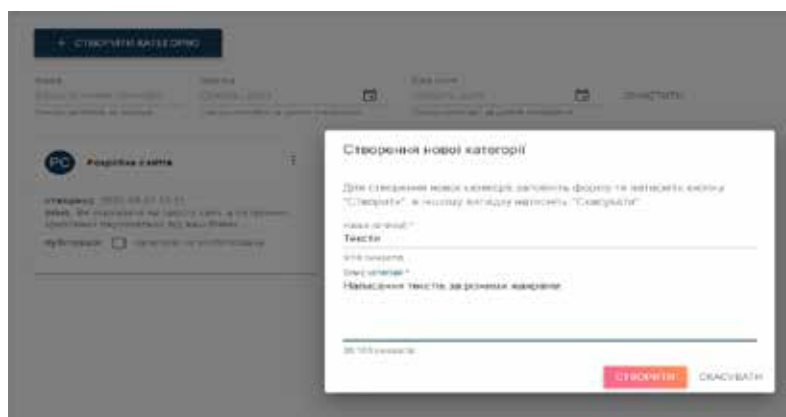


Рис. 9. Форма створення категорій

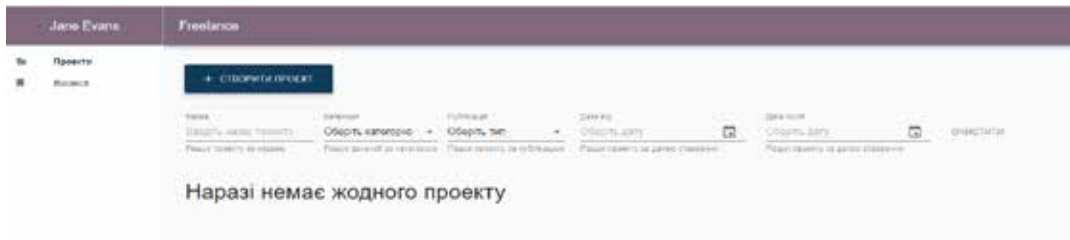


Рис. 10. Сторінка проєктів

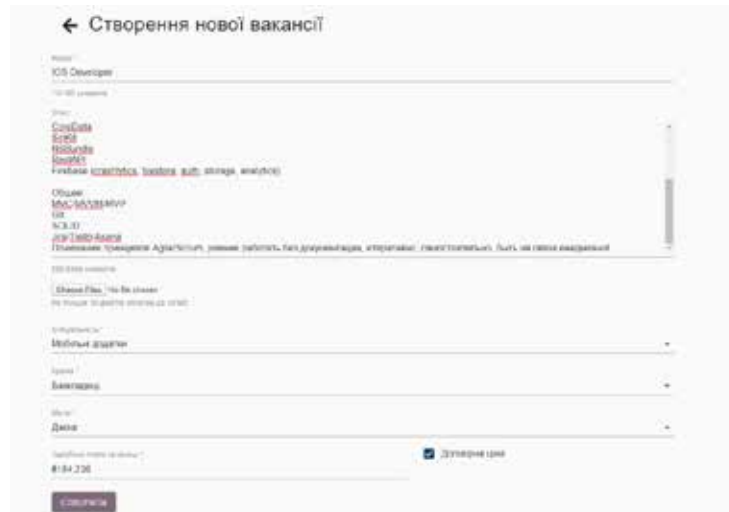


Рис. 11. Створення вакансії користувачем

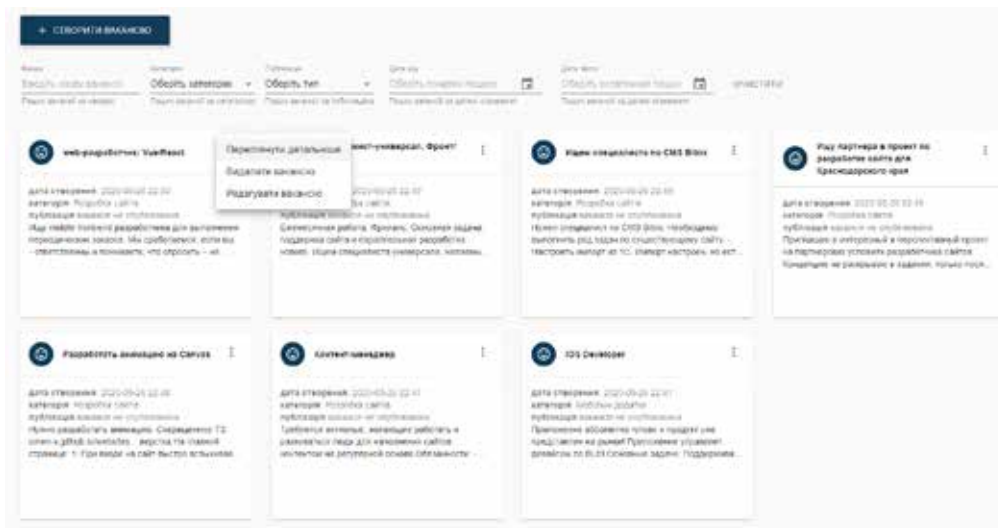


Рис. 12. Список вакансій

Надалі створений проєкт перевіряє менеджер-модератор та опубліковує для перегляду, якщо запис відповідає нормам системи. Для користувача доступний функціонал детального перегляду, видалення та редагування. Під час перегляду запису відкривається нова сторінка. Якщо до запису додані

файли, їх можна завантажити. Проєкти відображаються у вигляді списку. Для зручності додана пагінація. Проєкти можна сортувати за назвою, категорією, публікацією та датою створення.

Створення нової вакансії дещо ідентичне до створення проєкту. Однак користувачу обов'язково

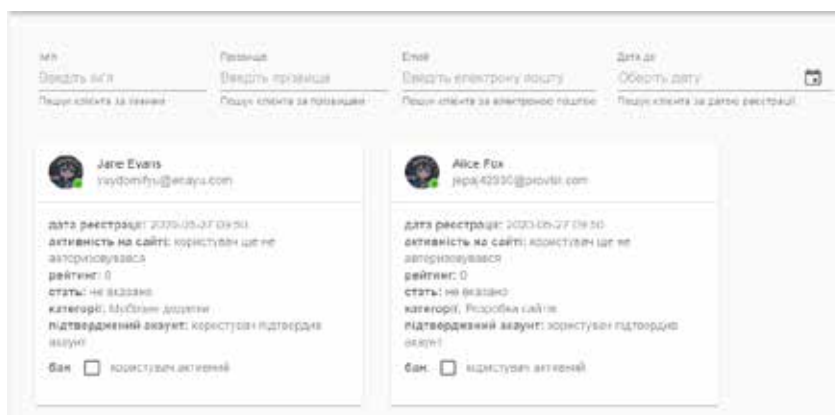


Рис. 13. Список зареєстрованих клієнтів у системі

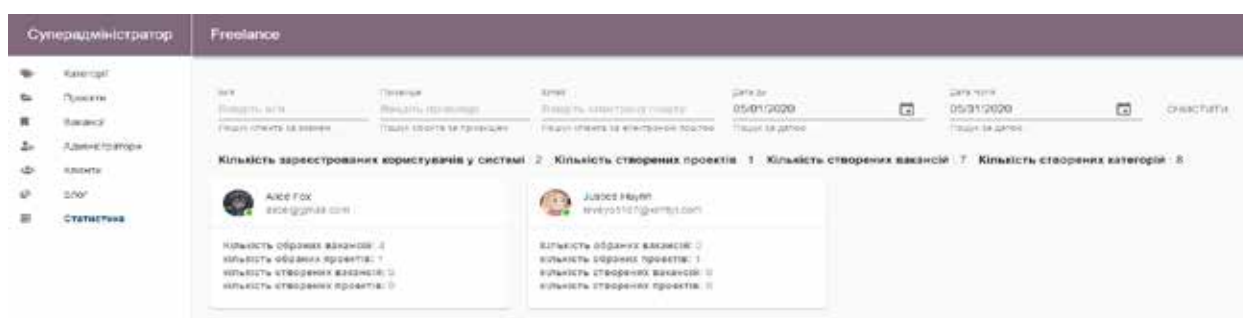


Рис. 14. Сторінка зі статистикою

потрібно вказати місто та країну, а замість «бюджету» виступає «заробітна плата», яка може бути договірною.

Під час створення нового запису система видає користувачу відповідне повідомлення. Усі вакансії виводяться у списку (рис. 12). Як і проекти, інформація про вакансію не є доступною для перегляду, оскільки повинна пройти модерацію. На сторінці присутня пагінація та фільтрування даних. Записи можна переглядати, видаляти та редагувати.

Усі зареєстровані у системі клієнти у вигляді списку відображаються на окремій сторінці (рис. 13).

Для перегляду загальнодоступних проектів на головній сторінці є посилання за категоріями. Далі відкривається сторінка зі списком проектів за вибраною тематикою. Назва запису є посиланням на сторінку з детальною інформацією. Для того щоб узяти проект у роботу, потрібно натиснути на відповідну кнопку у деталях проекту.

Адміністрація сайту має можливість продивлятися статистику за певний період. На панелі є відповідне меню. На сторінці відображена кількість зареєстрованих користувачів та створених записів, а також інформація за відповідним клієн-

том (рис. 14). Присутня фільтрація для зручного пошуку та пагінація.

Висновки. Проаналізовано та досліджено найбільш важливу та актуальну інформацію щодо розробки додатка, а саме основні принципи створення вебдодатків, їх структури та функціональні можливості та взаємодії основних компонентів. Під час проєктування web-орієнтованої системи було проаналізовано функціональні вимоги до вебсайту, розроблено діаграму сутностей класу та побудовано діаграму використання користувачами додатка. Для реалізації серверної частини вибрано популярний фреймворк Symfony, який реалізує архітектурний шаблон MVC, клієнтська частина реалізована за допомогою javascript-бібліотеки – ReactJS. Під час розробки сайту проведено тестування функціональної частини та зручності використання системи користувачами. Усі виявлені недоліки були усунені, система працює коректно та виконує поставлені на початку розробки завдання.

Реалізований програмний продукт готовий для використання користувачами. Надалі систему можна розширювати, створюючи новий функціонал, та покращувати наявний.

Список літератури:

1. Вакалюк Т.А., Болотіна В.В., Байлюк Є.М., Покотило О.А., Генвальдт А.С. Аналіз наявних web-орієнтованих систем freelance біржі. The 11th International scientific and practical conference “*Scientific achievements of modern society*” (June 24–26, 2020). Cognum Publishing House, Liverpool, United Kingdom. 2020. С. 206–212.
2. Фриланс – сайт удаленной работы. URL: <https://www.fl.ru/>.
3. Фриланс. URL: www.freelancer.com.ua.
4. Услуги фрилансеров. URL: Doit.ua.
5. Генвальдт А.С., Болотіна В.В. Розробка web-орієнтованої системи freelance біржі. Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «*Інформаційно-комп'ютерні технології – 2020 (ІКТ-2020)*», м. Житомир, 09–11 квітня 2020 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2020. С. 6–7.

Vakaliuk T.A., Bolotina V.V., Chyzhmotria O.G., Chyzhmotria O.V., Henvaldt A.S.

DEVELOPMENT OF A FREELANCE EXCHANGE INFORMATION SYSTEM

The article analyzes and explores the most important and relevant information on application development, namely: the basic principles of creating web applications, their structure and functionality, and the interaction of the main components. Analysis of the existing web-oriented freelance exchange system revealed that the main features of the developed product should be: modern minimalist design, user-friendly interface, the personal account where the user can customize their profile, the ability to create a portfolio of performers and projects by customers. Modern technologies for creating sites used by developers around the world were considered. MySQL was chosen to save the created records and personal data of users, because it is easy to use, has almost all the necessary tools that may be needed in the implementation of any project, is secure, scalable, and fast. During the design of the web-oriented system, the functional requirements for the website were analyzed, a diagram of the essence of the class was developed and a diagram of the use of the application by users was built. The popular Symfony framework, which implements the MVC architectural template, was chosen to implement the server part, and the client part was implemented using the javascript library – ReactJS. The optimal architectural templates for the system implementation were selected. It is worth noting that the interaction between the backend and frontend parts is through the architectural style – RESTAPI. During the development of the site, the functional part and usability of the system were tested by users. The implemented software product is ready for use by users. In the future, the system can be expanded, creating new functionality, and improving existing ones.

Key words: development, design, web-oriented system.

Глухова Н.В.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ВИЯВЛЕННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ОЗНАК ЗОБРАЖЕНЬ НА БАЗІ АНАЛІЗУ ГІСТОГРАМ ЯСКРАВОСТІ

У статті розглянуто проблеми виявлення інформативних ознак зображень. Проаналізовано актуальність та переваги методів вимірювань та контролю, які ґрунтуються на реєстрації, обробці та аналізі зображень. Описано напрями застосування засобів вимірювань та контролю на базі реєстрації рентгенівських знімків.

Розглянуто стандартну методику побудови гістограми яскравості півтонового зображення для 256 стовпчиків, які відповідають окремим рівням яскравості. Наведено результати побудови гістограм для знімків газорозрядного випромінювання різних типів води на рентгенівській плівці. Проаналізовано способи вибору кількості інтервалів гістограми з точки зору метрологічної практики. Усі відомі на тепер способи розрахунку кількості інтервалів гістограм носять емпіричний характер.

Запропоновано методику скорочення кількості стовпчиків гістограми, яка дає змогу виділити інформативні ознаки газорозрядного світіння, придатні для подальшого експертного оцінювання та побудови систем програмної класифікації об'єктів за характеристиками зображень їх газорозрядного випромінювання.

Спосіб виділення інформативних ознак на базі побудови гістограм яскравості зображень для 12 інтервалів знайшов практичне впровадження у галузі біології та медицини. Гістограма яскравості зображення зі скороченою кількістю інтервалів використана у разі експертного аналізу біологічних властивостей води. Інформативні ознаки зображення у вигляді 12 ординат стовпчиків гістограми яскравості використано для створення програмної класифікації води різних типів на основі розрахунку евклідової відстані. Інформативні ознаки, вилучені з гістограми зі скороченою кількістю інтервалів, також застосовано у галузі медичної діагностики під час побудови системи програмної класифікації на базі нечіткого кластерного аналізу параметрів випромінювання зразків крові.

Ключові слова: *аналіз даних, цифрова обробка зображень, гістограма, газорозрядне випромінювання.*

Постановка проблеми. Більшість сучасних наукових досліджень у різних галузях як первинні дані використовує результати вимірювань. При цьому спектр можливих методів вимірювань постійно розширюється, у тому числі завдяки швидкій еволюції технічних засобів для збору, передачі, обробки та зберігання даних.

Забезпечення автоматизованого збору та обробки великих обсягів інформації дало змогу останніми роками суттєво розширити сфери застосування методів вимірювань, які ґрунтуються на реєстрації та подальшому аналізі зображень. Незважаючи на те, що зображення містять значну кількість інформації про досліджувані об'єкти або процес, їх використання у метрологічній практиці потребує синтезу відповідних інформаційних технологій для їх обробки, аналізу та інтерпретації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різноманіття об'єктів, дослідження яких ґрунтується на отриманні візуальних даних, не дозволяє нині запропонувати універсальні способи обробки

зображень та вилучення їх інформативних ознак. Тому під час розв'язання багатьох прикладних завдань використовуються візуальні оцінки характеристик зображень. Зрозуміло, що такі оцінки мають суб'єктивний характер і обмежені можливості щодо отримання кількісних значень інформативних ознак. Часто алгоритми аналізу зображень будують як автоматизований програмний аналог експертних оцінок.

Особливу роль серед усього спектра методів вимірювань та контролю, які використовують як первинні дані зображення, відіграють методи, що базуються на реєстрації рентгенівських знімків. Незважаючи на те, що вибираючи об'єктом досліджень у цій роботі тільки рентгенівські знімки, значно звужується коло об'єктів аналізу, все ж таки воно залишається дуже широким та охоплює багато практичних завдань.

Наприклад, процедура отримання рентгенівських зображень застосовується у складі інспекційно-доглядових комплексів у митних органах. При цьому отримані зображення розпізнаються

співробітниками, які проходять відповідну спеціальну підготовку [1].

Рентгенівські зображення використовуються також для дослідження поверхонь та внутрішньої структури різноманітних речовин. Єдиного підходу для аналізу рентгенівських зображень у цій галузі також не запропоновано. Дослідники розробляють різні способи залежно від поставленого практичного завдання. Наприклад, у роботі [2] запропонований підхід до аналізу рентгенівських зображень у разі деформації кристалів за розподілами енергетичного спектра Фур'є.

Для виявлення певних деталей або фрагментів зображень натепер розроблено низку способів зафарбовування, підкреслення меж, а також алгоритми для нелінійного підсилення яскравості [3], але вони також можуть застосовуватися для обмеженого кола завдань.

Одним з найпоширеніших методів аналізу зображень (не тільки на рентгенівській плівці) є побудова гістограми зображення [4]. Гістограма яскравості зображення являє собою дискретну функцію, яка для рівня яскравості надає кількість пікселів, що характеризуються відповідною яскравістю.

У цій роботі предметом досліджень виступають зображення, зафіксовані на рентгенівській плівці, тому є півтоновими, тобто містять відтінки сірого кольору. Півтонові зображення можна охарактеризувати на основі побудови однієї гістограми, яка охоплює всі пікселі зображення.

Натепер у більшості прикладних програм для обробки й аналізу зображень цифрові растрові півтонові зображення представляються 256 різними відтінками яскравості, що стандартно кодуються цілими числами від 0 (чорний колір) до 255 (білий). Усі проміжні значення між граничними 0 та 255 являють собою відтінки сірого кольору. Натомість кольорове зображення неможливо представити на основі використання однієї гістограми. Для аналізу кольорових зображень зазвичай будують три гістограми, що відповідають палітрі RGB (тобто три гістограми розподілу яскравості для червоного, зеленого та блакитного кольорів) [5–6]. Окрім гістограм яскравості, також застосовуються гістограми контрасту [7], які являють собою дискретну функцію, що вказує на кількість пікселів з певним рівнем контрасту.

Перевагами застосування гістограм для обробки й аналізу цифрових зображень є те, що вони забезпечують інтегральну оцінку параметрів зображення, враховуючи яскравість (або контраст) кожного пікселя.

Гістограми є універсальним інструментом для аналізу, який може бути застосований фактично

для будь-якого цифрового зображення. Гістограми застосовуються на різних етапах опрацювання візуальних даних: як на етапах попередньої обробки [7], так і на етапі виділення інформативних ознак та інтерпретації зображень [8]. Однак, оскільки гістограма охоплює всі пікселі зображення, вона містить великий обсяг параметрів, а саме 256 значень кількості пікселів з певною яскравістю. Це призводить до ускладнення можливості аналізу людиною-експертом гістограм та виділення інформативних ознак візуальних даних на етапі інтерпретації зображення.

Наприклад, під час аналізу зображень газорозрядного випромінювання зразків води, зафіксованих на рентгенівській плівці, враховуються експертні оцінки як самого зображення, так і отриманої гістограми. Оскільки 256 кількісних параметрів гістограми (ординати висот її стовпчиків) не можуть усі аналізуватися експертом, то необхідно скоротити обсяг інформації. У роботі [8] зменшення обсягу кількісної інформації виконано шляхом розбиття гістограми на окремі ділянки (зони). Недоліком такого способу є суб'єктивний та неточний характер розподілу на зони.

Другим прикладом, який демонструє необхідність зменшення обсягів кількісної інформації про інформативні ознаки зображень, може слугувати завдання класифікації (розбиття на окремі класи або групи зображень для об'єктів зі схожими властивостями). У такому разі кількісна інформація про 256 ординат пікселів відповідної яскравості, отримана під час побудови гістограми, може виявитися надлишковою і для побудови автоматизованої програмної системи класифікації зображень буде досить значно меншої кількості числових інформативних ознак [9–11].

Постановка завдання. З метою забезпечення зручності інтерпретації гістограм зображень людиною-експертом і у разі розв'язання завдань автоматизованої програмної класифікації зображень актуальним є завдання розробки обґрунтованої методики скорочення кількості числових інформативних ознак зображень, які виділяються на основі побудови їх гістограм.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Під час розробки методики виділення числових інформативних ознак зображень було проаналізовано декілька вибірок зображень, отриманих на основі методу газорозрядного випромінювання [11]. Вибірki зображень формувались у експериментальному дослідженні властивостей різних типів води, зокрема дистильованої, природної, водопровідної, питної бутильованої тощо.

На рис. 1 представлено зображення (негатив) для зразка стічної води. У разі візуального аналізу людиною-експертом виявляються такі характерні для зображень зразків забрудненої води ознаки, як: наявність більш темного, ніж колір фону рентгенівської плівки, нерівномірного забарвлення внутрішнього кола зображення (внутрішнє коло відповідає зоні безпосереднього контакту зразка води з поверхнею рентгенівської плівки); нерівномірно розташовані навколо зовнішнього контуру випромінювання краплі рідини газоподібні розряди.

Характерною особливістю гістограм для зображень газорозрядного випромінювання забрудненої води є наявність чітко вираженого екстремуму в ділянці яскравостей, що умовно кодуються для цифрових зображень значеннями в діапазоні від

50 до 100. Наявність екстремуму огинаючої гістограми в цьому діапазоні відповідає забарвленню внутрішньої ділянки світіння краплі в зоні контакту з плівкою.

Для порівняння розглянемо зображення газорозрядного випромінювання на рентгенівській плівці для зразків дистильованої і природної вод (відповідно рис. 2 і 3) та відповідні гістограми яскравості. Випромінювання крапель дистильованої води характеризується світлим фоном внутрішнього кола в зоні контакту зразка з поверхнею плівки. Фактично відтінок внутрішнього кола збігається з фоном плівки поза межами зображення, що відображається наявністю декількох екстремумів у діапазоні відтінків яскравості 120–150.

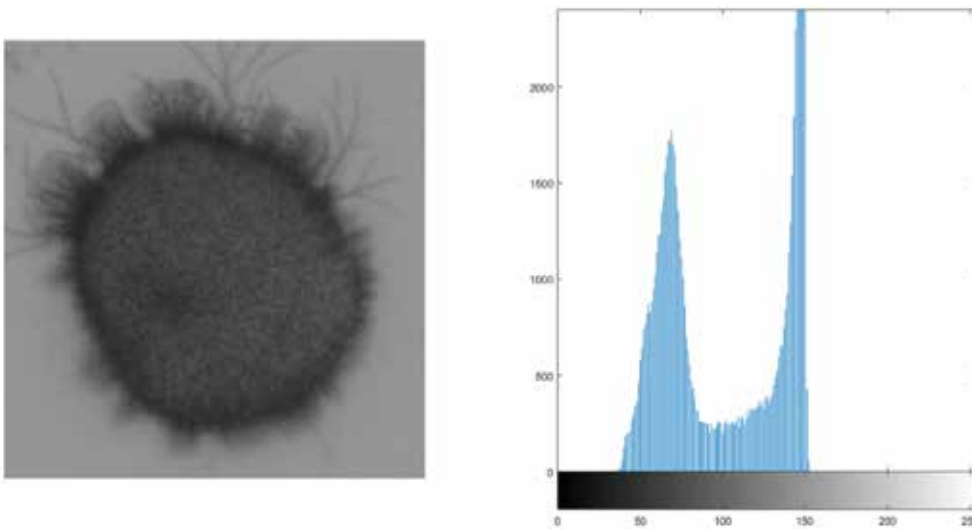


Рис. 1. Знімок (негатив) для стічної води та гістограма

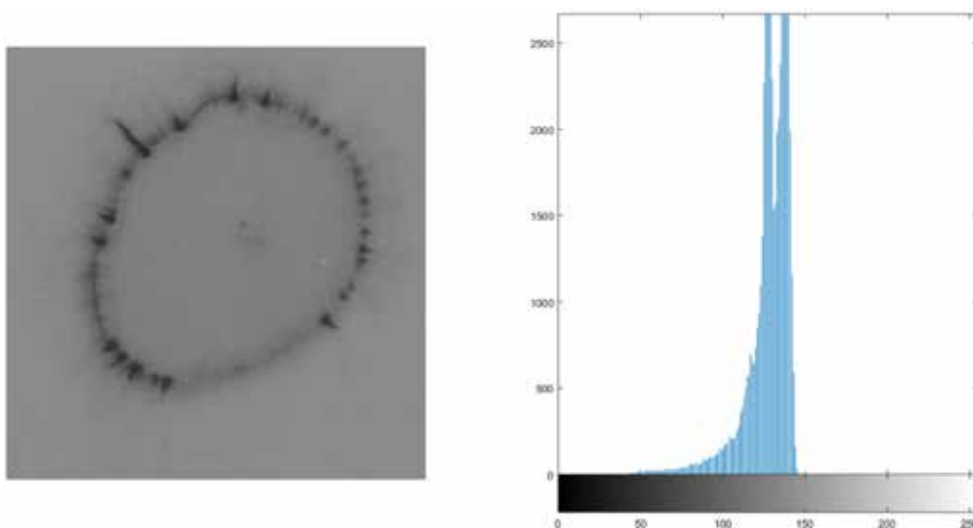


Рис. 2. Знімок (негатив) для дистильованої води та гістограма

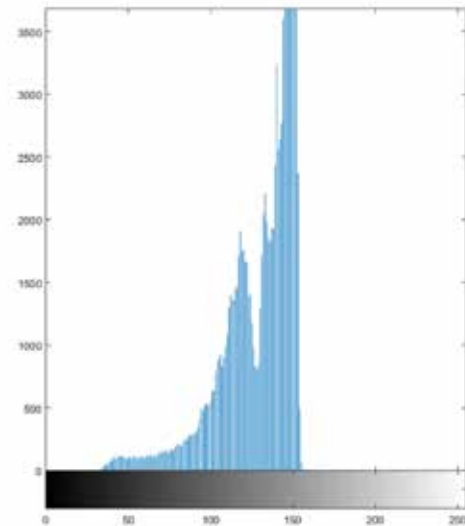
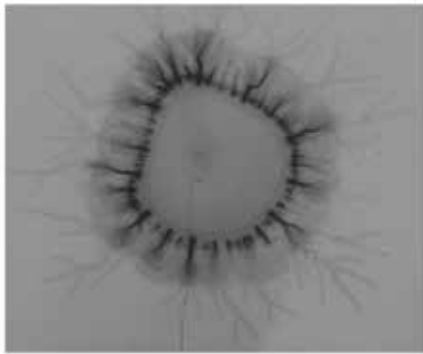


Рис. 3. Знімок (негатив) для природної води та гістограма

Внаслідок слабого та нерівномірного формування газорозрядних треків навколо зразка дистильованої води на гістограмі міститься дуже мало пікселів з яскравістю менше 100.

Для зразків питної, у тому числі природної води, максимум огинаючої гістограми яскравості також розташований у діапазоні 120–150. Порівняно зі зразком дистильованої випромінювання природної води характеризується рівномірною широкою газорозрядною «коронаю», що формується в результаті поширення окремих газових розрядів навколо зразка. Завдяки цьому на гістограмі виявляється екстремум огинаючої в діапазоні 100–120, що відповідає відтінку забарвлення «корони» випромінювання.

На рис. 1–3 (праворуч) представлено гістограми яскравості, побудовані стандартним способом, який використовується у разі отримання гістограм яскравості зображень у прикладних програмних пакетах, тобто гістограма містить 256 стовпчиків.

Однак, як було зазначено вище, під час розв'язання певних прикладних завдань аналізу зображень кількість інтервалів доцільно скоротити. Розглянемо рекомендації щодо побудови гістограм, які прийняті в прикладній статистиці та застосовуються в метрологічній практиці. Виявляється, що чітких рекомендацій та розрахункових формул натепер не розроблено і кількість так званих інтервалів групування у разі побудови гістограм може коливатися у значних межах [12]. Запропоновані в теорії ймовірностей та математичній статистиці методи вибору кількості інтервалів гістограми мають емпіричний характер [13].

Серед рекомендацій наводяться такі: кількість інтервалів не слід вибирати великою, оскільки графік стає невиразним і в ньому проявляються нерівномірні коливання висот; у разі занадто малої кількості інтервалів може спостерігатися розмивання особливостей розподілу й огинаюча гістограма відповідає отриманим експериментальним даним дуже грубо.

Найбільш поширеною в метрологічній практиці емпіричною залежністю для визначення кількості інтервалів розбиття є формула Стерджесса:

$$k = 3,32 \cdot \lg N + 1,$$

де N – кількість даних у вибірці.

Також часто використовують таке просте співвідношення:

$$k = \sqrt{N}.$$

Для виконання розрахунків кількості інтервалів гістограми застосовують формулу Брукса та Каррузера:

$$k = 5 \cdot \lg N.$$

Однак під час розв'язання завдання інтерпретації картин газорозрядного випромінювання на рентгенівській плівці (надалі відсканованих) стає очевидним, що для сучасних цифрових зображень навіть із середньою роздільною здатністю всі наведені вище формули дають кількість інтервалів гістограми 300 або більше. Але, як зазначалося вище, така кількість інтервалів не задовольняє вимогам щодо можливості експертного аналізу

отриманих гістограм зображень та раціонального розв'язання на подальших етапах обробки зображень завдань їх класифікації.

Для обґрунтованого скорочення кількості інтервалів гістограм було враховано рекомендації для вибірок великих розмірів, що надані в роботі [14]. Для вибірок обсягом від 500 до 1000 пропонується вибирати кількість інтервалів розбиття 10–16; для вибірок з кількістю значень 1000–10000 рекомендована кількість стовпчиків гістограми становить 12–22. При цьому відомо, що у разі вибору 10–11 інтервалів розбиття групувана вибірка зберігає 98% інформації.

Поряд з цим у результаті психологічних досліджень було встановлено, що у короткочасній пам'яті людини одночасно може знаходитися (та аналізуватися) від 5 до 9 градацій деякої властивості [15].

На підставі узагальнення рекомендацій щодо побудови гістограм для великих за обсягом вибірок даних та одночасно вимог до можливості експертного аналізу гістограм яскравості була розроблена методика опрацювання знімків газорозрядного випромінювання зразків рідини, заснована на побудові гістограм яскравості у разі розбиття на 12 інтервалів яскравості однакової ширини. Підкреслимо, що необхідність можливості залучення та врахування експертної думки

під час розв'язання завдань інтерпретації характеристик газорозрядного випромінювання зумовлена постановкою прикладних завдань у галузі медицини та біології.

На основі запропонованої методики розрахунку висот для 12 стовпчиків гістограми була побудована система класифікації типів води за властивостями її біологічної активності, що включала розрахунок евклідової відстані між висотами стовпчиків гістограми [16]. Розроблена методика побудови гістограми яскравості та вилучення інформативних ознак впроваджена у галузі медичної діагностики на базі використання особливостей газорозрядного світіння зразків крові [10] та в галузі біохімії для аналізу біологічних рідин [17; 18].

Висновки. У статті запропонована методика побудови гістограм яскравості зображень для 12 інтервалів розбиття. Скорочення кількості числових інформативних ознак зображення забезпечує можливість виконання експертного аналізу гістограми яскравості, а також дає можливість використання інформативних ознак гістограми для подальших етапів аналізу зображень, зокрема їх класифікації. Позитивний досвід практичного застосування методики під час розв'язання завдань у галузі біології та медицини підтвердив доцільність вибору 12 інтервалів групування для гістограми.

Список літератури:

1. Трофимчук А.М. Компьютерное моделирование рентгеновских изображений, полученных с помощью инспекционно-досмотровых комплексов. *Инженерный вестник Дона*. № 1. 2017. С. 5–21.
2. Баловсяк С.В. Анализ рентгеновских муаровых изображений деформированных кристаллов по радиальным распределениям энергетического спектра Фурье / С.В. Баловсяк, С.Н. Новиков, И.М. Фодчук, И.В. Яремчук. *Металлофизика, новітні технології*. 2019. Том 41. № 3. С. 389–402. URL: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0389>.
3. Гук А.П. Разработка методик автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков. Дешифровочные признаки изображений объектов на многоспектральных космических снимках / Гук А.П., Евстратова Л.Г., Хлебникова Е.П., Алтынцев М.А., Арбузов С.А., Гордиенко А.С., Гук А.А., Симонов Д.П. *Геодезия и картография*. № 7. 2013. С. 31–40.
4. Obed Appiah. Fast Generation of Image's Histogram Using Approximation Technique for Image Processing Algorithms / Obed Appiah, J. Ben Hayfron-Acquah. *Image, Graphics and Signal Processing*. 2018. No. 3. Pp. 25–35. DOI: 10.5815/ijigsp.2018.03.04.
5. Глухова Н.В. Інформаційна технологія для аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання / Н.В. Глухова, Л.А. Пісоцька. *Перспективні технології та прилади*. № 12. 2018. С. 48–52.
6. Глухова Н.В. Розробка методу аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання / Н.В. Глухова, Л.А. Пісоцька. *Системи управління, навігації та зв'язку*. № 2(48). 2018. С. 59–62.
7. Хрящев Д.А. Об одном методе анализа цифрового изображения с применением гистограмм. *Вестник Астраханского гос. техн. ун-та*. 2010. № 1. С. 109–113.
8. Песоцкая Л.А. Анализ изображений кирлиановского свечения капель воды / Л.А. Песоцкая, Н.В. Глухова, В.Н. Лапицкий. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2013. № 1. С. 91–96.
9. Глухова Н.В. Розробка методу експрес-оцінки біологічних властивостей води. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2014. № 6/5(72). С. 18–25.
10. Glukhova N.V. Cluster Analysis for Measurements of Gas-Discharge Emission Parameters for Blood Samples. *Meas Tech*. No. 58. Pp. 1066–1070. 2015. URL: <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0843-7>.

11. Глухова Н.В. Метод оцінки біологічних та квантових властивостей води / Н.В. Глухова, Л.А. Пісоцька, Н.Г. Кучук. *Системи обробки інформації*. 2015. № 7(132). С. 195–200.
12. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Ленинград : Энергоатомиздат, 1991. 303 с.
13. Горошко А.В. Розрахунок допустимих значень параметрів об'єктів у випадку полімодальності їх ймовірнісних розподілів / А.В. Горошко, Ройзман В.П. *Вібрації в техніці та технологіях*. № 4(72). 2013. С. 19–27.
14. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. Москва : Изд-во стандартов, 1985. 120 с.
15. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. Москва : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. 312 с.
16. Глухова Н.В. Розробка системи експрес-класифікації води на основі бази даних зображень газорозрядного випромінювання / Н.В. Глухова, Л.А. Пісоцька, Н.Г. Кучук. *Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил ім. І. Кожедуба*. 2015. Вип. 3(44). С. 112–118.
17. Povstyanyi V.A. Peculiarities of gas-discharge luminescence of biological fluid from the achilles tendon in the late postmortem period / V.A. Povstyanyi, L.A. Pesotskaya, N.V. Glukhova, N.M. Yevdokimenko, L.R. Nikogosyan, Ye.L. Koshelnik. *Journal of Education, Health and Sport. Licensee Open Journal Systems of Kazimierz Wielki University in Bydgoszcz, Poland*. 2017. No. 7(2), Pp. 498–508. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.399324>.
18. Повстяный В.А. Особенности газоразрядного свечения жидкости из ахиллового сухожилия и изменений отдельных ее компонентов в позднем постмортальном периоде / В.А. Повстяный, Л.А. Песоцкая, Н.В. Глухова, Н.М. Евдокименко. *Український журнал медицини, біології та спорту*. 2017. № 2(4). С. 102–107.

Glukhova N.V. DETECTION OF INFORMATIVE SIGNS OF IMAGES ON THE BASIS OF ANALYSIS HISTOGRAMS OF BRIGHTNESS

The article considers the problems of detecting informative features of images. The relevance and advantages of measurement and control methods based on image registration, processing and analysis are analyzed. The directions of application of means of measurements and control on the basis of X-rays are described.

The standard technique of construction of the histogram of brightness of the halftone image for 256 columns which correspond to separate levels of brightness is considered. The results of construction of histograms for images of gas-discharge radiation of different types of water on X-ray film are given. Different ways of choosing the number of histogram intervals from the point of view of metrological practice are analyzed. All currently known methods of calculating the number of histogram intervals are empirical.

A method of reducing the number of columns of the histogram is proposed, which allows to identify informative features of gas-discharge glow, suitable for further expert evaluation and construction of software classification systems of objects according to the characteristics of images their gas-discharge radiation.

The method selection of informative features on the basis construction of histograms brightness of images for 12 intervals has found practical application in the field of biology and medicine. The histogram brightness of image with a reduced number of intervals was used in the expert analysis of biological properties of water. Informative features of the image in the form of 12 ordinates columns of the histogram brightness were used to create a software classification of water of different types based on the calculation of the Euclidean distance. Informative features extracted from the histogram with a reduced number of intervals were also used in the field of medical diagnostics in the construction of a software classification system based on fuzzy cluster analysis of radiation parameters of blood samples.

Key words: data analysis, digital image processing, histogram, gas discharge radiation.

Дубко В.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ З ВИПАДКОВОЮ СТРУКТУРОЮ
ЗА ДОПОМОГОЮ ІНДИКАТОРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ**

У цій статті наведені наші результати, пов'язані з використанням інваріантної властивості індикаторного випадкового процесу під час моделювання, що має фізичну інтерпретацію випадкових процесів. Розглянуто метод конструктивної побудови, алгоритму моделювання систем зі змінною структурою. Підкреслено, що рівняння з випадковими коефіцієнтами використовуються під час моделювання динамічних систем, які можуть адаптуватися до зовнішніх змін, у тому числі і випадкових, з метою збереження важливих для існування системи показників. Ці зміни в структурі системи можуть бути неперервними або дискретними. Якщо зміни зовнішніх впливів випадкові, то перехід з одного стану в інший можна намагатися моделювати, спираючись на теорію систем масового обслуговування. Але для опису динаміки реалізацій цих станів необхідні стохастичні рівняння. Як робоче поняття вводиться визначення «індикаторний випадковий процес». Індикаторним випадковим процесом названа стрибкоподібна випадкова величина, яка може приймати на розділених між собою інтервалах часу тільки два значення: 0 або 1. Показано, що індикаторний випадковий процес є незмінним (інваріантним) у разі зведення до довільного додатного ступеня. Як приклад застосування індикаторного випадкового процесу знайдена характеристична функція для процесу, що приймає обмежене число несумісних значень.

Скориставшись поданням індикаторного випадкового процесу як функції від процесу Пуассона, побудовані та досліджені рівняння для динамічних процесів у середовищі із властивостями, що стрибкоподібно змінюються. З урахуванням додаткових зовнішніх збурень приклади таких рівнянь побудовані з використанням рівнянь Іто.

Для демонстрації і більш повного дослідження можливостей алгоритму повністю досліджені динамічні моделі для процесу дифузії в середовищі з центрами тимчасової затримки, процесів дифузії у разі переходів стрибком з одного підпростору в інший і назад. Для цих моделей побудовані рівняння для характеристичних функцій. Знайдено точні розв'язки цих рівнянь та вказано на взаємозв'язок між цими розв'язками.

Як приклад застосування методу індикаторних функцій побудована характеристична функція для моделі Каца. Показано, що у разі залежності індикаторного випадкового процесу від процесу Пуассона рівняння для характеристичної функції відповідає телеграфному рівнянню. Цей результат збігається з результатом у роботі Каца.

Ключові слова: характеристична функція, випадковий процес, випадкова структура, рівняння Іто, процес Пуассона.

Постановка проблеми. Рівняння зі змінною структурою використовуються під час моделювання динамічних систем, що можуть адаптуватися до зовнішніх змін, у тому числі і випадкових, з метою збереження життєво визначальних для існування системи показників [1].

Ці зміни у структурі системи можуть бути неперервними, дискретними та змішаного типу. Якщо зміни зовнішніх впливів дискретно-випадкові, то одним зі шляхів моделювання переходів з одного стану системи в інший є використання методів теорії систем масового обслуговування. Але для опису динаміки реалізацій цих станів потрібно використовувати стохастичні рівняння.

У цій статті ми розглянемо метод конструктивної побудови (алгоритму) моделей таких систем та продемонструємо його можливості на моделях, що мають фізичну інтерпретацію.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Надалі під час побудови рівнянь нам знадобляться деякі робочі поняття та допоміжні твердження.

Індикаторним випадковим процесом (ІВП) назвемо стрибкоподібний випадковий процес $\chi(t)$, який може приймати лише два значення: 1 або 0.

Нехай $p(\chi(t) = 1) = p(t)$. З означення $\chi(t)$ випливає, що

$$\forall t, \chi^\alpha(t) = \chi(t), \forall \alpha > 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} p(\chi(t) = 1) &= M[\chi(t)], \\ p(\chi(t) = 0) &= 1 - M[\chi(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

Лема 1. $(1 - \chi(t))^m = (1 - \chi(t))$ для будь-якого додатного m .

Доведення. Врахувавши (1), переконаємось, що

$$(1 - \chi(t))^m = (1 - \sum_{l=1}^m (-1)^l C_n^l \chi(t)^l) = (1 - \chi(t) \sum_{l=1}^m (-1)^l C_n^l) = (1 - \chi(t))$$

Лема 2. Нехай $\chi_j(t)$, $j = \overline{1, n-1}$ набір незалежних процесів. Тоді набір процесів

$$z_k = \chi_k(t) \prod_{j=1}^{k-1} (1 - \chi_j(t)), \\ z_l = \chi_l(t) \prod_{j=1}^{l-1} (1 - \chi_j(t)), \\ z_1 = \chi_1(t), \quad z_n = \prod_{j=1}^{n-1} (1 - \chi_j(t)), \quad \forall k, l$$

утворює повну групу несумісних процесів.

Доведення. Спираючись на Лему 1, знаходимо

$$z_k z_l = \chi_k(t) (1 - \chi_k(t)) \chi_l(t) \prod_{j=1, j \neq k}^k (1 - \chi_j(t)) = [\chi_k(t) (1 - \chi_k(t))] \chi_l(t) \prod_{j=1, j \neq k}^k (1 - \chi_j(t)) \equiv 0,$$

так як $\chi_k(t) (1 - \chi_k(t)) = \chi_k(t) - \chi_k^2(t) = 0, \forall k < l$.

$$z_1 + \sum_{k=2}^{n-1} z_k + z_n = \chi_1(t) + \sum_{k=2}^{n-1} \chi_k(t) \prod_{j=1}^{k-1} (1 - \chi_j(t)) + \prod_{j=1}^{n-1} (1 - \chi_j(t)) \equiv 1$$

Приклади застосування ІВП.

Як перший приклад застосування $\chi_j(t)$ побудуємо характеристичну функцію (Х.Ф.) $J(t)$ для процесу $y(t) = \sum_{j=1}^n y_j(t)$, де

$$y_1(t) = \chi_1(t) g_1(t), \\ y_k(t) = \chi_k(t) \prod_{j=1}^{k-1} (1 - \chi_j(t)) g_k(t), \\ y_n(t) = \prod_{j=1}^{n-1} (1 - \chi_j(t)) g_n(t),$$

$k = \overline{2, n-1}$, $g_k(t)$ незалежні від $\chi_j(t)$ випадкові процеси.

З урахуванням уведених представлень

$$y(t) = \chi_1(t) g_1(t) + \sum_{k=2}^{n-1} \chi_k(t) \prod_{j=1}^{k-1} (1 - \chi_j(t)) g_k(t) + \prod_{j=1}^{n-1} (1 - \chi_j(t)) g_n(t).$$

Через несумісність процесів z_k (Лема 2) у довільний момент часу $y(t)$ буде набувати тільки одне з можливих значень $y(t)_j$.

Теорема 1. Х.Ф. процесу $y(t)$ така:

$$J(t) = p_1(t) M[e^{i\beta g_1(t)}] + \sum_{k=2}^{n-1} M[e^{i\beta g_k(t)}] p_k(t) \prod_{j=1}^{k-1} [1 - p_j(t)] + M[e^{i\beta g_n(t)}] \prod_{j=1}^{n-1} [1 - p_j(t)].$$

Доведення.

$$J(t) = M[\exp\{i\beta y(t)\}] = M[\exp\{i\beta(\chi_1(t) g_1(t) + \sum_{k=2}^{n-1} \chi_k(t) \prod_{j=1}^{k-1} (1 - \chi_j(t)) g_k(t) + \prod_{j=1}^{n-1} (1 - \chi_j(t)) g_n(t)\}] = M[\exp\{i\beta y(t)\} \times \prod_{k=2}^{n-1} \exp\{\beta \chi_k(t) \prod_{j=1}^{k-1} (1 - \chi_j(t)) g_k(t)\} \times \exp\{i\beta \prod_{j=1}^{n-1} (1 - \chi_j(t)) g_n(t)\}]$$

Розкладемо кожну з експонент у ряд. Врахуємо несумісність процесів z_k (Лема 2), властивість (1) та незалежність $g_k(t)$, $\chi_l(t)$, $\forall k, l$. Після взяття математичного сподівання з урахуванням (2) доходимо до твердження Теорема 1.

Скориставшись властивостями $\chi(t)$, можемо побудувати рівняння для динамічних процесів у середовищі зі стрибкоподібною зміною властивостей.

Прикладом можуть бути такі рівняння Іто:

$$dx(t) = \chi_1(t) a_1(x(t); t) dt + \chi_2(t) B_1(x(t); t) dw(t) + (1 - \chi_1(t)) a_2(x(t); t) dt + (1 - \chi_2(t)) B_2(x(t); t) dw(t)$$

де $\mathcal{O}w(t)$ – випереджаючий стосовно поточного часу t приріст вінерівського процесу $w(t) \in R^m$, $a_j(x; t)$, $x \in R^n$; $B_j(x(t); t)$ матриці розмірності $n \times m$, $j = 1, 2$.

За допомогою $\chi(t)$ можливо моделювати і рух із переходами з одного підпростору в інший:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \chi(t) [a_1(x(t); y(t); t) dt + B_1(x(t); y(t); t) dw(t)] \\ \frac{dy(t)}{dt} = [1 - \chi(t)] [a_2(x(t); y(t); t) dt + B_2(x(t); y(t); t) dw(t)] \end{cases}, \text{ і т. д.}.$$

Якщо

$$B_j(x(t); y(t); t) = 0, \\ a_1(x(t); y(t); t) = -a_2(x(t); y(t); t) = -c, \quad c = const > 0,$$

то процес $x(t) + y(t)$ відповідає моделі Каца: рух частинки з випадковою зміною напрямку швидкості c [3].

Нехай $\chi(t)$, $\chi(0) = 1$ – функція від цілочисельної випадкової величини $N(t)$:

$$\chi(t) = \chi(N(t))$$

Якщо

$$\chi(N(t)) = \chi(N(t) + 2k), \quad (3)$$

коли $k \in$ простору цілих чисел, то $\chi(t)$ назвемо умовно періодичним.

Умовам (1), (3) задовольняє функція:

$$\chi(t) = \chi(N(t)) = \frac{1}{2}(1 + \cos[N(t)\pi]).$$

Бачимо, що для парних $N(t)$: $\frac{1}{2}(1 + \cos[N(t)\pi]) = 1$.

Для непарних $N(t)$: $\frac{1}{2}(1 + \cos[N(t)\pi]) = 0$.

Надалі будемо працювати саме з такими $\chi(t)$.

Якщо $N(t)$ – стаціонарний пуассонівський процес з параметром інтенсивності λ , то $M[\chi(N(t))] = 0,5(1 + \exp\{-2\lambda t\})$.

Дифузія з центрами тимчасової випадкової затримки.

Розглянемо приклад системи зі змінною структурою, коли зміни стану системи підпорядковані рівнянню

$$dy(t) = a(t)dt + \frac{1}{2}(1 + \cos[N(t)\pi])[bdw(t)];$$

$$y(0) = 0. \quad (4)$$

Тобто певний час система змінюється за детермінованим законом, а потім на випадковому проміжку часу на неї діють випадкові збурення.

Виконаємо заміну змінних:

$$y(t) - \int_0^t a(\tau)d\tau = x(t),$$

Тепер рівняння (4) набуває вигляду:

$$dx(t) = \frac{1}{2}(1 + \cos[N(t)\pi])[bdw(t)]. \quad (5)$$

Це рівняння, яке описує дифузію з центрами тимчасової випадкової затримки [2]. Відповідно, характеристична функція для цього процесу

$$J_1(t) = M[f(t)] =$$

$$= M[\exp\{-i\beta 2^{-1} \int_0^t (1 + \cos[N(\tau)\pi])bdw(\tau)\}]. \quad (6)$$

Дифузія з випадковою зміною напрямку руху. Модель Каца.

Розглянемо одновимірний рух, коли відбувається зміна напрямку

переміщення у випадкові моменти часу [3]:

$$\begin{cases} dx^+(t) = \chi(t)vdt \\ dx^-(t) = -(1 - \chi(t))vdt \end{cases}$$

Оскільки нас цікавить сумарне переміщення $[x^+(t) + x^-(t)] = x(t)$, то приходимо до рівняння:

$$dx(t) = (2\chi(t) - 1)vdt. \quad (7)$$

У якості $\chi(t)$ виберемо $\chi(t) = \frac{1}{2}(1 + \cos[N(t)\pi])$.

Тоді характеристична функція для процесу $x(t)$ набуває вигляду:

$$I(t) = M[\exp\{i\beta \int_0^t \cos(N(\tau)\pi)cd\tau\}]$$

Теорема 2. Х.ф. для процесу $x(t)$, підпорядкованого (7), за умови, що $N(t)$ стаціонарний пуассонівський процес з параметром λ , є розв'язком рівняння:

$$\frac{d^2 I(t)}{dt^2} + 2\lambda \frac{dI(t)}{dt} + c^2 \beta^2 I(t) = 0,$$

$$I(0) = 1, \quad \frac{dI(0)}{dt} = ic\beta \quad (8)$$

Доведення.

$$\frac{dI(t)}{dt} =$$

$$= M[i\beta \cos(N(t)\pi)c \exp\{i\beta \int_0^t \cos(N(\tau)\pi)cd\tau\}] \quad (9)$$

Скориставшись правилом диференціювання функції $f(y)$, коли $y = N(t)$ – стаціонарний пуассонівський процес:

$$df(N(t)) = [f(N(t) + 1) - f(N(t))]dN(t), \quad (10)$$

де $dN(t)$ **випереджаючий приріст**, тобто, який не залежить від попередніх значень $N(t)$. Через властивості розподілу Пуассона з параметром λ ,

$$M[dN(t)] = \lambda dt, \quad \lambda > 0.$$

та (9) знаходимо:

$$\begin{aligned} & d \frac{dI(t)}{dt} = \\ & = -c^2 \beta^2 M[\cos^2(N(t)\pi) \exp\{i\beta \int_0^t \cos(N(\tau)\pi) c d\tau\}] dt + \\ & + i\beta c M[(\cos(\{N(t)+1\}\pi) - \cos(N(t)\pi)) \times \\ & \times \exp\{i\beta \int_0^t \cos(N(\tau)\pi) c d\tau\}] \mu dt = \\ & = -c^2 \beta^2 M[\exp\{i\beta \int_0^t \cos(N(\tau)\pi) c d\tau\}] dt + \\ & - i\beta c 2\lambda M[\cos(N(t)\pi) \exp\{i\beta \int_0^t \cos(N(\tau)\pi) c d\tau\}] dt = \\ & = -c^2 \beta^2 I(t) dt - 2\lambda \frac{dI(t)}{d} dt. \end{aligned}$$

Зауваження. Застосувавши обернене перетворення Фур'є до (8), приходимо до телеграфного рівняння для визначення щільності розподілу $\rho(x; t)$:

$$\frac{\partial^2 \rho(x; t)}{\partial t^2} + 2\lambda \frac{\partial \rho(x; t)}{\partial t} - c^2 \frac{\partial^2 \rho(x; t)}{\partial x^2} = 0,$$

що співпадає з результатами з роботи [3].

Модель дифузії з випадковими переходами з одного підпростору в інший. Двовимірний випадок. Розглянемо таку модель дифузії:

$$\begin{cases} dx(t) = \chi(t) b dw(t) \\ dy(t) = (1 - \chi(t)) b dw(t) \end{cases}$$

Тобто у випадкові моменти часу процес відбувається або у просторі $x(t)$ або $y(t)$.

Як випадковий індикаторний процес виберемо $\chi(t) = 2^{-1}(1 + \cos N(t))$. Тоді характеристична функція для цієї системи має вигляд:

$$\begin{aligned} J(t) = & M[\exp\{i\alpha \int_0^t 2^{-1}(1 + \cos N(\tau)) b dw(\tau)\} + \\ & + i\beta \int_0^t 2^{-1}(1 - \cos N(\tau)) b dw(\tau)\}] \end{aligned}$$

Теорема 3. Якщо $N(t)$ стаціонарний пуассонівський процес з параметром λ , то $J(t)$ є розв'язком рівняння:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 J(t)}{dt^2} + 2^{-1}(4\lambda + [\alpha^2 + \beta^2] b^2) \frac{dJ(t)}{dt} + \\ & + 2^{-1}(\lambda \alpha^2 + \alpha^2 \beta^2 b^2 2^{-1} + \lambda \beta^2) b^2 M[f(t)] = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Доведення. З урахуванням незалежності процесів $N(\tau)$ та $w(\tau)$, скориставшись формулою Іто, знаходимо:

$$\begin{aligned} J(t) = & M[\exp\{i\int_0^t 2^{-1}[(\alpha + \beta) + (\alpha - \beta) \cos(N(\tau))] b dw(\tau)\}] = \\ & = M[\exp\{-\int_0^t 2^{-3}[(\alpha + \beta) + (\alpha - \beta) \cos(N(\tau))]^2 b^2 d\tau\}] = \\ & = M[\exp\{-\int_0^t 2^{-3}[(\alpha + \beta)^2 + 2(\alpha^2 - \beta^2) \cos(N(\tau)) + (\alpha - \beta)^2] b^2 d\tau\}] = \\ & = M[\exp\{-\alpha^2 \int_0^t 2^{-2}(1 + \cos N(\tau)) b^2 d\tau\} - \\ & - \beta^2 \int_0^t 2^{-2}(1 - \cos N(\tau)) b^2 d\tau\}] = M[f(t)] \end{aligned}$$

Далі:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 J(t)}{dt^2} = & -2\lambda \frac{dJ(t)}{dt} - 2^{-1} \lambda (\alpha^2 + \beta^2) b^2 J(t) + \\ & + M[f(t)] \{\alpha^4 2^{-3}(1 + \cos(N(t))) b^4 + \beta^4 2^{-3}(1 - \cos(N(t))) b^4\} \end{aligned} \quad (12)$$

Скориставшись (10) та (12), отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 J(t)}{dt^2} = & M[f(t)] \{\alpha^2 2^{-2} 2b^2 \cos N(t) - \beta^2 2^{-2} 2b^2 \cos(N(t))\} \lambda + \\ & + M[f(t)] \{\alpha^4 2^{-4}(1 + \cos(N(t)))^2 b^4 + \beta^4 2^{-4}(1 - \cos(N(t)))^2 b^4\} = \\ & = \lambda M[f(t)] \{\alpha^2 2^{-1}(1 + \cos(N(t))) b^2 + \beta^2 2^{-1}(1 - \cos(N(t))) b^2\} - \\ & - 2^{-1} \lambda (\alpha^2 + \beta^2) b^2 J(t) + \\ & + M[f(t)] \{\alpha^4 2^{-3}(1 + \cos(N(t))) b^4 + \beta^4 2^{-3}(1 - \cos(N(t))) b^4\}. \end{aligned}$$

Далі:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 J(t)}{dt^2} = & -2\lambda \frac{dJ(t)}{dt} - 2^{-1} \lambda (\alpha^2 + \beta^2) b^2 J(t) + \\ & + M[f(t)] \{\alpha^4 2^{-3}(1 + \cos(N(t))) b^4 + \beta^4 2^{-3}(1 - \cos(N(t))) b^4\} \end{aligned} \quad (13)$$

Продовжимо перетворення (13).

$$\begin{aligned} \frac{d^2 J(t)}{dt^2} = & \\ & = -2\lambda \frac{dJ(t)}{dt} - 2^{-1} \lambda (\alpha^2 + \beta^2) b^2 M[f(t)] + \\ & + \alpha^2 b^2 2^{-1} M[f(t)] \{\alpha^2 2^{-2}(1 + \cos(N(t))) b^2 + \\ & + \beta^2 2^{-2}(1 - \cos(N(t))) b^2\} - \\ & - \alpha^2 \beta^2 b^2 2^{-1} M[f(t)] 2^{-2}(1 - \cos(N(t))) b^2 + \\ & + M[\beta^4 2^{-3}(1 - \cos(N(t))) b^4\}. \end{aligned}$$

Варіант а):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 J(t)}{dt^2} = & -(2\lambda + \alpha^2 b^2 2^{-1}) \frac{dJ(t)}{dt} - 2^{-1} \lambda (\alpha^2 + \beta^2) b^2 J(t) - \\ & - \alpha^2 \beta^2 b^2 2^{-1} M[f(t)] 2^{-2}(1 - \cos(N(t))) b^2 + \\ & + M[f(t)] \beta^4 2^{-3}(1 - \cos(N(t))) b^4\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Варіант в):

$$\frac{d^2 J(t)}{dt^2} = -(2\lambda + \beta^2 b^2 2^{-1}) \frac{dJ(t)}{dt} - 2^{-1} \lambda (\alpha^2 + \beta^2) b^2 J(t) - \alpha^2 \beta^2 b^2 2^{-1} M[f(t) 2^{-2} (1 + \cos(N(t)) b^2)] + M[f(t) \alpha^4 2^{-3} (1 + \cos(N(t)) b^4)] \quad (15)$$

Складемо рівняння (14) і (15):

$$2 \frac{d^2 J(t)}{dt^2} = -(4\lambda + [\alpha^2 + \beta^2] b^2 2^{-1}) \frac{dJ(t)}{dt} - (\lambda \alpha^2 + \alpha^2 \beta^2 b^2 2^{-2} + \lambda \beta^2) b^2 J(t) - M[f(t) \{ \alpha^4 2^{-3} (1 + \cos(N(t)) b^4 + \beta^4 2^{-3} (1 - \cos(N(t)) b^4) \}]. \quad (16)$$

Рівняння (13) віднімемо від рівняння (16). Отримаємо:

$$\frac{d^2 J(t)}{dt^2} + 2^{-1} (4\lambda + [\alpha^2 + \beta^2] b^2) \frac{dJ(t)}{dt} + 2^{-1} (\lambda \alpha^2 + \alpha^2 \beta^2 b^2 2^{-1} + \lambda \beta^2) b^2 M[f(t)] = 0. \quad (17)$$

Враховуючі введені позначення, приходимо до твердження (11) Теорема 2.

Є можливість знайти одразу розв'язок рівняння (11). Його побудова буде громіздкою. Ми відшукаємо розв'язок для більш простої моделі, а потім вкажемо, як перейти до явного вигляду розв'язку рівняння (11).

Характеристична функція для моделі дифузії з центрами затримки

Повернемось до рівняння (5). Характеристична функція $J_1(t)$ для процесу $x(t) \in R^1$ така (6):

$$J_1(t) = M[f(t)] = M[\exp\{-i\beta \int_0^t (1 + \cos[N(\tau)\pi]) b d\omega(\tau)\}]$$

Рівняння для визначення $J_1(t)$ повинно співпадати з (11), якщо покласти у ньому $\alpha = 0$. Формально це відповідає таким замінам коефіцієнтів у (11):

$$2^{-1} (4\lambda + [\alpha^2 + \beta^2] b^2) \Rightarrow 2^{-1} (4\lambda + \beta^2 b^2), \quad (18)$$

$$2^{-1} (\lambda \alpha^2 + \alpha^2 \beta^2 b^2 2^{-1} + \lambda \beta^2) b^2 \Rightarrow 2^{-1} \lambda \beta^2 b^2.$$

Будемо шукати розв'язок більш простого за виглядом рівняння (5), що відповідає моделі дифузії з центрами затримки:

$$\frac{d^2}{dt^2} J_1(t) + \frac{1}{2} (\beta^2 b^2 + 4\lambda) \frac{d}{dt} J_1(t) + \frac{1}{2} \lambda \beta^2 b^2 J_1(t) = 0 \quad (19)$$

Оскільки

$$\frac{1}{4} (\beta^2 b^2 + 4\lambda)^2 - 4 \frac{\lambda}{2} \beta^2 b^2 = \frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 2\beta^2 b^2 \lambda + 4\lambda^2 - 2\beta^2 b^2 \lambda = \frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 4\lambda^2 > 0, \forall \lambda > 0.$$

то розв'язок ([4, с. 375, ф-ла 235(a)]) буде таким:

$$J_1(t) = C_1 \exp\left\{-t \frac{1}{2} (\beta^2 b^2 + 4\lambda) + t \sqrt{\frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 4\lambda^2}\right\} + C_2 \exp\left\{-t \frac{1}{2} (\beta^2 b^2 + 4\lambda) - t \sqrt{\frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 4\lambda^2}\right\}.$$

Оскільки

$$\frac{1}{4} (\beta^2 b^2 + 4\lambda)^2 > \frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 4\lambda^2,$$

то перші і другі доданки зменшуються зі зростанням t , і тому

$$\lim_{t \rightarrow \infty} J_1(t) = 0.$$

Враховуючи початкові умови

$$\frac{d}{dt} J_1(t) |_{t=0} = -\frac{1}{2} \beta^2 b^2, \quad J_1(t) |_{t=0} = 1,$$

отримаємо рівняння для визначення сталих:

$$C_1 + C_2 = 1$$

$$\frac{1}{2} \beta^2 b^2 = C_1 \left[\frac{1}{2} (\beta^2 b^2 + 4\lambda) + \sqrt{\frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 4\lambda^2} \right] + C_2 \left[\frac{1}{2} (\beta^2 b^2 + 4\lambda) - \sqrt{\frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 4\lambda^2} \right];$$

$$\frac{1}{2} \beta^2 b^2 = (1 - C_2) \left[\frac{1}{2} (\beta^2 b^2 + 4\lambda) + \sqrt{\frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 4\lambda^2} \right] + C_2 \left[\frac{1}{2} (\beta^2 b^2 + 4\lambda) - \sqrt{\frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 4\lambda^2} \right];$$

$$2\lambda = C_2 \sqrt{\frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 4\lambda^2}.$$

Розв'язавши цю систему рівнянь, встановлюємо:

$$C_2 = 2\lambda / \sqrt{\frac{1}{4} \beta^4 b^4 + 4\lambda^2} = \left(\frac{1}{16} \lambda^{-2} \beta^4 b^4 + 1 \right)^{-0.5},$$

$$C_1 = 1 - \left(\frac{1}{16} \lambda^{-2} \beta^4 b^4 + 1 \right)^{-0.5}.$$

Таким чином, розв'язок набуває вигляду:

$$J_1(t) = \exp\left\{-t\frac{1}{2}(\beta^2 b^2 + 4\lambda) + t\sqrt{\frac{1}{4}\beta^4 b^4 + 4\lambda^2}\right\} + \left(\frac{1}{16}\lambda^{-2}\beta^4 b^4 + 1\right)^{-0.5} \left[\exp\left\{-t\frac{1}{2}(\beta^2 b^2 + 4\lambda) - t\sqrt{\frac{1}{4}\beta^4 b^4 + 4\lambda^2}\right\} - \exp\left\{-t\frac{1}{2}(\beta^2 b^2 + 4\lambda) + t\sqrt{\frac{1}{4}\beta^4 b^4 + 4\lambda^2}\right\}\right]$$

Оскільки

$$\left(\frac{1}{16}\lambda^{-2}\beta^4 b^4 + 1\right)^{-0.5} < 1,$$

то $J(t) > 0, \forall t \geq 0$

Скориставшись оберненими замінами коефіцієнтів на основі співвідношення (17), отримаємо і розв'язок (11).

Тепер, враховуючи властивість – зв'язок між характеристичним функціями та моментами, можемо знайти довільні моменти для розглянутих процесів.

Висновки. Як бачимо, метод індикаторних процесів із використанням методу характеристичних функцій дає змогу розглянути як відомі моделі раніше, так і нові, що мають фізичну трактовку.

Відзначимо, що якщо задана повна група несумісних процесів, то встановлюється, що є набір незалежних випадкових індикаторних функцій, на основі яких можна побудувати повну групу, з розподілом якої буде співпадати розподіл заданої групи несумісних подій.

Список літератури:

1. Дубко В.А. Интегральные инварианты уравнений Ито и их связь с некоторыми задачами теории случайных процессов. Док. НАН Украины, 2002, № 1. С. 24–29.
2. Дубко В.О. Моделювання розповсюдження домішок у середовищі з центрами затримки за допомогою індикаторних функцій. *Аграрна наука та освіта в ХХІ столітті: проблеми, перспективи та інновації*: зб. наукових праць. Ніжин, 2018. С. 313–317.
3. Кац М. Несколько вероятностных задач физики и математики. Москва : Наука, 1967. 176 с.
4. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва : Наука, 1976. 576 с.

Doobko V.A. SIMULATION OF SYSTEMS WITH A RANDOM STRUCTURE USING INDICATORS OF RANDOM PROCESSES

This article presents our results related to the use of the invariance property of an indicator stochastic process when modeling stochastic processes that have a physical interpretation. A method of constructive construction, an algorithm for modeling systems with a changing structure is considered. It is emphasized that equations with random coefficients are used in modeling dynamic systems that can adapt to external changes, including random ones, in order to preserve indicators important for the existence of a system. These changes in the structure of the system can be continuous or discrete. If changes in external influences are random, then the transition from one state to another, you can try to simulate, relying on the theory of queuing systems. But to describe the dynamics of realizations of these states, stochastic equations are needed. As a working concept, a definition is introduced: indicator random process. An indicator random process is a jump-like random variable that can take only two values at intervals of time separated from each other: 0 or 1.

It is shown that the indicator random process is unchanged (invariant) when raised to an arbitrary positive power. As an example of the application of an indicator random process, a characteristic function is found for a process that takes a finite set of incompatible values.

Using the representation of an indicator random process as a function of a Poisson process, equations for dynamic processes in a medium with abruptly changing properties are constructed and investigated. Taking into account additional external disturbances, examples of such equations are constructed using the Itô equations.

For a demonstration and a more complete study of the capabilities of the algorithm, dynamic models for the diffusion process in a medium with centers of time delay, diffusion processes during jump transitions from one subspace to another and back are fully investigated. For these models, equations for the characteristic functions are constructed. Exact solutions of these equations are found and the relationship between these solutions is established.

As an example of the application of the method of indicator functions, the characteristic function for the Katz model is constructed. It is shown that when the indicator random process depends on the Poisson process, the equation for the characteristic function corresponds to the telegraph equation. This result coincides with the result in Katz's work.

Key words: characteristic function, random process, random structure, Ito's equation, Poisson process.

Клябіна Т.М.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МІНІБАРАМИ

У статті розглядається автоматизована система управління мінібарами, встановленими в готельних номерах. Проаналізовано автоматизовані системи управління, які використовуються під час управління готелями. Запропоновано рішення для мінібарів, що дають змогу підвищити ефективність їх використання.

Однією з найпоширеніших послуг у готелях є мінібари. Як розповідають готельєри, кожен другий-третій гість користується послугою мінібару, тому окупатися він починає вже через 3–4 місяці. При цьому в нинішній час у вітчизняних готелях не приділяють досить уваги автоматизації процесу управління мережею мінібарів. Основною проблемою такого відношення є матеріальні збитки, які несе готель у разі несплати гостем коштів за користування цією послугою.

Автоматизована система управління мінібарами має такі переваги:

- програмне рішення може бути застосоване для мінібарів або будь-яких оплачуваних зручностей у номері;
- інтерфейс сумісний з PMS;
- список поповнення пропонує центральний сервер, де користувачі мінібару можуть отримати доступ до всіх необхідних функцій з однієї сторінки браузера;
- автоматичне формування звітів з інформацією, яка показує, коли кімнати були перевірені персоналом мінібару в режимі реального часу;
- спеціальна функція дає змогу службовцям мінібару відзначити номери, які можна відвідати, не заважаючи гостю;
- отримання звітів про споживання гостьового продукту по продуктах або по категоріях;
- відстеження витрат на продукт для визначення прибутку;
- аналіз доходів з розбивкою по днях тижня або галузі готелю.

Ключові слова: готель, мінібар, система управління, інформаційна технологія, Інтернет речей.

Постановка проблеми. У готельному бізнесі інновації зачіпають технологічні аспекти виробництва готельної послуги і маркетингові інструменти. В умовах посиленої конкурентної боротьби готельні підприємства змушені шукати нові шляхи до вдосконалення і привабливості.

Нині бал у світі індустрії гостинності правлять два головні тренди: цифрові інновації і радикальне переформатування звичних форматів готельних номерів під потреби сучасного мандрівника [1].

Однією з найпоширеніших послуг у готелях є мінібари. Як розповідають готельєри, кожен другий-третій гість користується послугою мінібару, тому окупатися він починає вже через 3–4 місяці. При цьому в нинішній час у вітчизняних готелях не приділяють досить уваги автоматизації процесу управління мережею мінібарів. Основною про-

блемою такого відношення є матеріальні збитки, які несе готель у разі несплати гостем коштів за користування цією послугою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням автоматизації підприємств готельно-ресторанного бізнесу приділяється досить уваги. У роботах [2; 3] розглянуті загальні питання впливу інформаційних технологій на керування бізнес-процесами готелів. Обґрунтовано використання інформаційних систем для підвищення ефективності роботи готелів.

У роботах [4; 5; 6; 7] проведений аналіз програмних продуктів, що призначені для керування готелями. Наведено їх характеристики, відмінності, сформульоване коло завдань, для яких призначений той чи інший програмний пакет. Крім того, в роботах [6 і 7] наведено модульний склад систем керування готелем.

Визначено, що системи керування можна поділити на три основні групи: CRM-, ERP- та RMS-системи. CRM-системи (англ. Customer Relationship Management) – це прикладне програмне забезпечення, яке призначене для автоматизованої реалізації стратегій взаємодії з клієнтами (споживачами), підвищення рівня продаж, оптимізації маркетингу та поліпшення обслуговування шляхом зберігання інформації щодо історії контактів зі споживачами, встановлення та поліпшення бізнес-процесів та наступного аналізу результатів. ERP-системи (англ. Enterprise Resource Planning System) – це корпоративні системи, які призначені для автоматизації обліку й управління, аналізу, контролю ресурсів підприємства. Розробляються за модульною схемою та охоплюють усі ключові процеси діяльності компанії. Класичні ERP-системи забезпечуються модулями управління фінансами, планування та управління виробництвом, формуванням та розподілом запасів, реалізацією та маркетингом, утриманням покупців, постачанням, реалізацією проєктів, сервісним обслуговуванням, процедурним забезпеченням якості. Для автоматизації бізнес-процесів у готелях пропонуються RMS-системи (англ. Revenue Management System) – системи управління доходом: спеціалізований готельний продукт, в основу якого закладено статистичні, математичні та інші алгоритми.

У роботах [8; 9 і 10] більше уваги приділяється будові спеціалізованих програмних продуктів для керування готелями. Обґрунтовано, що рішення проблеми персоналу та готельного комплексу загалом можливе лише за рахунок упровадження систем автоматизації роботи готелю, тобто впровадження Автоматизованих Систем Управління (АСУ) готелем (в англійському варіанті – Property Management System (PMS)).

Незважаючи на велику кількість досліджень та обґрунтувань, підсистема автоматизації мінібарів (Mini bar System) в українських готелях відсутня.

Формулювання мети дослідження. Метою дослідження є аналіз автоматизованої системи, призначеної для управління мінібаром, що встановлюються в номерах готелів для підвищення їх конкурентоспроможності. В процесі дослідження були вирішені такі завдання:

- проведено загальний огляд автоматизованих систем управління готелем;
- визначені особливості функціонування мінібарів;
- запропоновані рішення, що дають змогу підвищити ефективність користування мінібаром.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Мінібар являє собою компактний холодильник (найчастіше вбудовується), який закривається на ключ (звичайний або електронний). Ключ або код доступу до холодильника видається на ресепшені під час заселення. Різноманітність вмісту мінібару залежить від категорії готелю, але в ньому завжди можна знайти:

- спиртне (пиво, а в преміум готелях – віскі, ром, текілу);
- популярні безалкогольні напої (Coca-Cola, Pepsi);
- соки і мінеральну воду;
- шоколад.

При цьому на самому холодильнику або на видному місці в номері знаходиться прейскурант цін мінібару. Вони на порядок вищі цін на аналогічні напої і продукти в ресторані при готелі, не кажучи вже про ціни місцевих супермаркетів. Зате щоб отримати задоволення зі склянкою доброго напою, не потрібно нікуди спускатися або дзвонити. Цим і зумовлена націнка.

Як же контролюють чесність гостей у готелі з мінібаром? Адже теоретично ніщо не заважає клієнтові освіжитися кока-колою з холодильника, а наступного дня купити її в супермаркеті втричі дешевше і поставити на місце? Контроль користування мінібаром у готелі здійснюється двома способами:

- по-старому, за допомогою наклеєних на пляшки. Таким чином можна виявити підміну вмісту мінібару, а ось розсекретити відлив долив в уже промарковані пляшки практично нереально;

- за допомогою високих технологій. Наприклад, є система віддаленого обліку продуктів у мінібарах Bartech, яка не тільки подає на ресепшн сигнал про кожне відкриття холодильника, але і визначає, наскільки зменшився обсяг тієї чи іншої пляшечки. Таким чином, система дає змогу визначити, чи відкрив клієнт мінібар просто, щоб подивитися на асортимент, або скористався ним за призначенням.

Рахунок за спожитий вміст холодильника готелі з мінібаром пред'являють під час виселення. Тому під час поселення в номер краще відразу визначитися з питанням користування ним, бажано після ознайомлення з прейскурантом. Адже під кінець відпочинку гроші мають властивість закінчуватися, а про витрати на мінібар, як правило, згадують тільки перед від'їздом.

Розглянемо, як працює мінібар, що оснащений системою управління.

Перше, що потрібне для роботи системи, – це визначення, чи є продукт у своєму слоті мінібара.

1. Виявлення продукту

Інформаційна система використовує три типи технології виявлення продукту: мікроперемикач, магнітний і інфрачервоний.

1. Мікроперемикачі знаходяться на слотах полиць мінібара. Коли продукт поміщається в слот, мікрореле реагує на тиск від присутності предмета, що «відчуває» мінібар. Якщо продукт видаляється, тиск скидається, і бар реєструє об'єкт як спожитий в указаний користувачем періоду часу. Ці інтелектуальні і високоміцні перемикачі забезпечують надійну точність протягом багатьох років регулярного використання, особливо в холодних і вологих умовах.

2. Технологія магнітного виявлення використовується для продуктів, що розміщуються горизонтально, таких як високі або великі пляшки, які розміщуються під нижньою полицею мінібара. Магнітний детектор розташований на невеликому гнучкому шарнірі, встановленому над продуктом. Як тільки продукт зміщується в стрижень, шарнірний магніт штовхається вгору до зазначеної вище полиці, де розташований приймач. Коли магніт стикається з полицею і приймачем, продукт «сприймається» мінібаром. Після зняття магнітна петля падає від рецептора, і після закінчення встановленого користувачем часу продукт вказується як спожитий.

3. Інфрачервоні датчики використовуються в сухих, неохолоджених мінібарах, таких як eTrau. Інфрачервоний промінь безперервно проєктується в слот продукту. Коли предмет поміщається

в слот, промінь переривається, і продукт «сприймається» мінібаром. Якщо продукт вилучений, промінь знову проходить через слот продукту, і після закінчення встановленого користувачем часу мінібар реєструє продукт як використаний.

2. Передача даних

Наступною задачею автоматизованої системи є передача інформації на сервер. Взагалі можуть бути використані два методи зв'язку – провідний та безпроводний.

Ethernet – це рішення «кімната і сервер», що дає змогу підключатися до мережі. За цієї технології доступу використовується *кручена пара*. Вона заснована на наявній інфраструктурі телефонних ліній у готелі. Мінібари зв'язуються по телефонних лініях з головним модемом Bartech. Схема будови локальної мережі по технології Ethernet наведена на рисунку 1. Кожен мінібар підключений кабелем до сервера Bartech. А він підключається до сервера PMS.

Wi-Fi – це сучасне бездротове рішення, яке не потребує кабелів та дротів для більш зручної роботи, при цьому мінібари спілкуються безпосередньо з точками доступу Wi-Fi.

Мережі BARTECH MESH:

Bartech Mesh Network – це бездротове рішення, що має перевагами Wi-Fi і можливістю інтеграції зі сторонніми платформами для роботи в одній мережі. Завдяки технології Bartech Mesh Network кожен мінібар виступає як точка доступу для швидкої маршрутизації даних на сервер Bartech.

Схема будови мережі Bartech Mesh за технологією Wi-Fi наведена на рисунку 2.

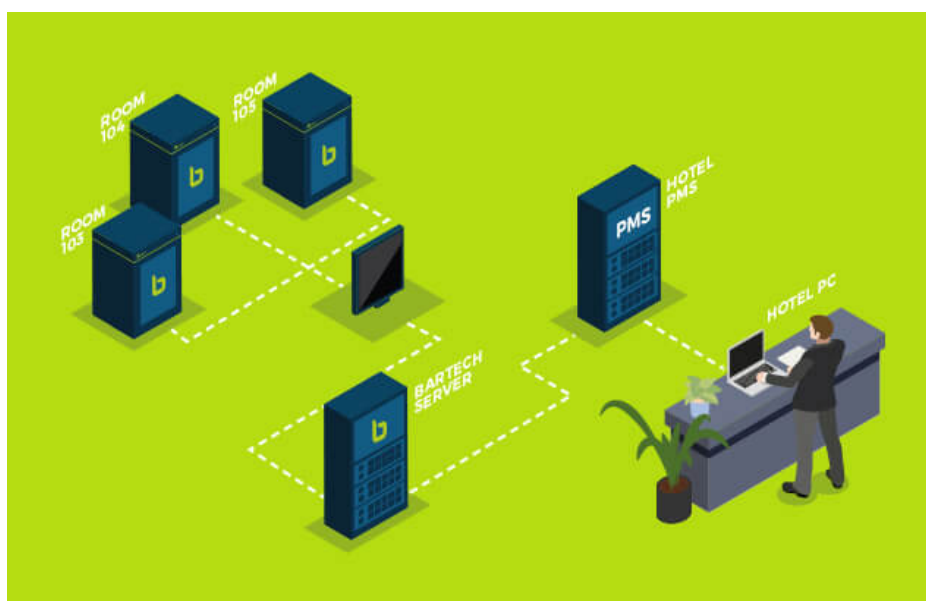


Рис. 1. Схема поєднання мінібарів за допомогою Ethernet



Рис. 2. Схема поєднання мінібарів за допомогою Wi-Fi

Після об'єднання мінібарів у мережу найбільш перспективною технологією доступу до ресурсів або послуг є використання технології IoT (Internet of Things, або Інтернету речей). Для цього використовується *web-програмне забезпечення*.

Однією з головних переваг наявності вебпрограмного забезпечення є легкий доступ. Без необхідності встановлювати клієнтське програмне забезпечення на окремих комп'ютерах вебсистема Bartech дає змогу користувачам входити в програмне забезпечення на будь-якому пристрої, підключеному до мережі. Це включає в себе ноутбук, планшети і смартфони. Потрібно тільки сумісний веббраузер.

Використання керуючого програмного забезпечення Bartech на інтелектуальному пристрої дає змогу операторам мінібару створювати списки поповнення в режимі реального часу, щоб вони точно знали, які продукти необхідно поповнити в такий момент. Обслуговуючий персонал також може вносити зміни в фолію гостей прямо на інтелектуальному пристрої в процесі поповнення.

PMS Зв'язок

Будь-яке з рішень Bartech для мінібарів може підключатися до системи управління майном готелю (PMS), щоб у режимі реального часу публікувати збори за користування гостями в гостьовому фолію. Взаємодіє практично з будь-якою системою PMS, щоб забезпечити автоматичну реєстрацію і відстеження реєстрації/виписки даних від гостей готелю.

Цей інтерфейс також дає змогу співробітникам стійки реєстрації отримати доступ до інформації про діяльність мінібару в фолію гостя, щоб міні-

мізувати розбіжності під час оформлення замовлення гостем. Дані заповнюються як витрати на споживання окремих позицій, а не як одиниця інформації.

3. Можливості автоматизованих систем мінібарів у готелях

Зниження витрат на оплату

За допомогою автоматичної системи мінібару співробітникам готелю показуються тільки ті номери, в яких в мінібарах справді були гості, що в середньому становить 25% від типового готелю.

Оскільки співробітник мінібару може перевіряти близько 100 номерів у день, для перевірки всіх мінібарів з активністю гостей буде потрібен тільки один співробітник.

Зменшення потреб в обслуговуванні

Автоматичні мінібари дають змогу співробітникам пропускати кімнати без активності мінібару і зберігати враження гостей, забезпечуючи більш високе задоволення і кращі відгуки про цей готель.

Відсутня необхідність у громіздких візках, наповнених мінібаром.

Принесіть тільки те, що потрібно

Автоматичні мінібари інформують співробітників про кількість і типи продуктів, які були спожиті гостями. Це означає, що їм потрібно тільки внести мінімальний запас у кімнати.

Збільшення швидкості обробки інформації

Програмне забезпечення, що постачається з автоматичними мінібарами, показує тільки приміщення для співробітників з мінібарами і показує, які саме товари необхідно поповнити. Крім того, прострочені продукти в кожному мінібарі відслідковуються і вказуються для швидкої заміни.

Миттєвий та легкий розрахунок гостя

Автоматичний мінібар заряджає гостей фоліо в режимі реального часу, тому за кожне споживання несе пряму відповідальність гість, якому був відправлений елемент. Це означає, що гості ніколи не платитимуть за покупку іншого мандрівника.

Автономне управління запасами

Автоматичні мінібари відстежують товарні запаси в режимі реального часу, позаяк гості споживають товари, а співробітники займаються їх поповненням. За допомогою простого клацання співробітники можуть побачити миттєву розбивку запасів і резюме.

Миттєве та безшовне

Автоматичне блокування і розблокування мінібарів залежно від статусу гостя. Гості, які оплачують готівкою, заблоковані в мінібарі, а ті, хто користується кредитними картами, мають повний доступ під час реєстрації заїзду.

Розумне енергозбереження

Автоматичні мінібари регулюють температуру холодильника в кожній кімнаті, забезпечуючи різну температуру. Діапазони встановлюються готелем залежно від статусу номера. Споживання енергії може бути знижене на 30% порівняно з ручними мінібарями.

Швидка перевірка з поінформованим персоналом за стійкою реєстрації

В автоматичних мінібарах усі споживані продукти в реальному часі оплачуються гостьовим фоліо. Назви продуктів вказані безпосередньо на фоліо, що

дає змогу легко обговорити вартість мінібару з гостями. Завдяки точній і в реальному часі оплаті товарів виручка мінібару збільшується на 30%.

Автоматизована система Bartech також надає аналіз мінібару, заснований на даних, який допоможе підвищити прибуток і ефективність роботи за одночасного зниження накладних витрат. Таким чином, персонал отримує знання, необхідні для створення ефективної системи управління готелем, що приносить дохід.

Висновки. Автоматизована система управління мінібарями має такі переваги:

- програмне рішення може бути застосоване для мінібарів або будь-яких оплачуваних зручностей у номері;
- інтерфейс сумісний з PMS;
- список поповнення пропонує центральний сервер, де користувачі мінібару можуть отримати доступ до всіх необхідних функцій з однієї сторінки браузера;
- звіти автоматично формують інформацію, яка показує, коли кімнати були перевірені персоналом мінібару в режимі реального часу;
- спеціальна функція дає змогу службовцям мінібару відзначати номери, які можна відвідати, не заважаючи гостю;
- повні звіти про споживання гостьового продукту по продукту або по категорії;
- відстеження витрат на продукт для визначення прибутку;
- аналіз доходів з розбивкою по днях тижня або галузі готелю.

Список літератури:

1. Fake Accents and Free Desserts: The Lighter Side of Business Travel. (Ненастоящий акцент и бесплатные десерты: приятная сторона деловых поездок). *Features & Advice Ryan Rudnansky*. July 01, 2015. URL: <https://www.travelpulse.com/news/features/fake-accents-and-free-desserts-the-lighter-side-of-business-travel.html>.
2. Завідна Л.Д. Інформаційні ресурси та їх вплив на систему управління підприємством готельного господарства. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. Том 29 (68). № 2, 2018. С. 11–16.
3. Козік К.І. Інформаційні технології в управлінні готелем. *Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні*: зб. матеріалів I Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. 6–7 квітня 2017 р. Київ : КНЕУ, 2017. С. 98–100.
4. Леміш К.М. Удосконалення управління готельним підприємством на основі інформаційних технологій. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2014. Випуск 2. С. 592–595. URL: <http://www.global-national.in.ua/archive/2-2014/119.pdf>.
5. Казакова Н.А. Інноваційний розвиток інформатизації готельного бізнесу в умовах глобалізації світового господарства / Н.А. Казакова, А.С. Перепелиця, М.В. Сідоров. *Проблеми економіки*. 2017. № 1. С. 21–25. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pecon_2017_1_4.
6. Батьковець Г.А. Ефективність інформаційної підтримки управлінської взаємодії підприємств готельного бізнесу / Батьковець Г.А., Батьковець Н.О. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Економічні науки*. 2016. Вип. 51. С. 182–187.
7. Безуглий І.В. Фактор використання систем автоматизованого управління готелем. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2019. № 22. С. 274–279. URL: <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/2509>.

8. Гудзовата О.О. Автоматизовані системи управління готелями. *Торгівля, комерція, підприємництво*. 2013. Вип. 15. С. 94–98. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Torg_2013_15_22.

9. Верес О.М. Інформаційна система готельно-туристичної діяльності / О.М. Верес, І.Н. Ватраль. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 689 : *Інформаційні системи та мережі*. С. 54–66. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/20147>.

10. Верес О.М. Інтелектуальна інформаційна система готельно-туристичної діяльності / О.М. Верес, І.М. Ватраль. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 673 : *Інформаційні системи та мережі*. С. 78–86. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/6708>.

Kliabina T.M., Beglov K.V. RESEARCH OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE MINI-BARS

The article considers the automated control system of mini-bars installed in hotel rooms. Automated control systems used in hotel management are analyzed. Solutions for mini-bars are proposed to increase the efficiency of their use.

One of the most common services in hotels is mini-bars. According to hoteliers, every second or third guest uses the service of a mini-bar; so it begins to pay off in 3–4 months. At the same time, currently in domestic hotels do not pay enough attention to automate the process of managing a network of mini-bars. The main problem of this relationship is the material damage incurred by the hotel in case of non-payment by the guest when using this service.

The article analyzes the automated control system of mini-bars installed in hotel rooms. In the course of the research the following tasks were solved:

- a general review of automated hotel management systems;
- identified features of the operation of mini-bars;
- the offered decisions allowing to increase efficiency of use of mini-bars.

The automated control system of mini-bars has the following advantages:

- the software solution can be applied to mini-bars or any paid amenities in the room;
- PMS compatible interface;
- the replenishment list offers a central server, where users of the mini-bar can access all the necessary functions from one page of the browser;
- reports automatically generate information that shows when the rooms were checked by the staff of the mini-bar in real time;
- a special feature allows the mini-bar staff to mark rooms that can be visited without disturbing the guest;
- complete reports on guest product consumption by product or category;
- track product costs to determine profits;
- analyse revenue broken down by day of the week or hotel area.

Key words: hotel, mini-bar, control system, information technology, Internet of things.

Левкін Д.А.

Харківський національний технічний університет сільського господарства
імені Петра Василенка

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

У статті розглянуті можливі підходи до розрахунку й оптимізації технологічних систем, що містять дискретні джерела термонавантажень. Мета дослідження – розробка розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей процесу теплового впливу на матеріал для підвищення якості технологічних процесів за допомогою зменшення пошкоджень досліджуваного об'єкта і забезпечення контролю використання ресурсів.

Автором побудовані розрахункові математичні моделі (крайові задачі) і наведені деякі прикладні оптимізаційні математичні моделі процесу термічної дії на однорідний і багатошаровий об'єкти. Варто відзначити, що врахування в процесі моделювання та оптимізації багатошарової структури досліджуваного об'єкта і технічних параметрів випромінювачів значно ускладнює процес формалізації прикладних оптимізаційних математичних моделей. Це призводить до значних витрат часу для забезпечення ітераційного процесу пошуку і перебору екстремумів температурного поля та забезпечення оптимізації технологічних систем. Водночас при цьому збільшується точність розрахунку й оптимізації параметрів систем, що сприяє зменшенню пошкодження досліджуваного об'єкта. Для підвищення швидкості дослідження прикладних оптимізаційних математичних моделей автор пропонує використати сіткові процесори на аналогових і гібридних моделях.

У статті наведена чисельна реалізація розрахункових математичних моделей процесу теплового впливу на прикладі ембріона, обчислені температури нагріву шарів ембріона і закладені передумови для подальшого дослідження прикладних оптимізаційних математичних моделей. Однак досліджуваним об'єктом для побудови і чисельної реалізації крайових задач можна вибрати довільний об'єкт. Зміна об'єкта дослідження спричинить зміну параметрів у разі постановки крайових задач і набір методів в обчислювальних структурах, необхідних для здійснення процесу оптимізації.

Ключові слова: математичні моделі, крайові задачі, оптимізація, сіткові процесори, обчислювальні структури.

Постановка проблеми. Для розробки програмних засобів і проектування гідродинамічних, електротехнічних, технологічних, біотехнологічних та інших систем необхідний розрахунок керуючих параметрів. Досить часто досліджуваним об'єктом виступає багатошаровий матеріал під впливом джерел фізичних полів. В основі крайової задачі для такого матеріалу може бути система багатовимірних, нелінійних, нестационарних диференціальних рівнянь з граничними умовами. Для обґрунтування її коректності можна скористатися теорією псевдодиференціальних операторів над простором узагальнених функцій.

Об'єкти дослідження автора – однорідний і багатошаровий матеріали, що піддаються тепловому впливу джерел випромінювання. У статті побудовані крайові задачі процесу термовпливу і проведена чисельна реалізація для випадку, коли досліджуваним об'єктом виступає ембріон. Також автором розраховані температури лазерного нагріву шарів ембріона і наведені деякі прикладні оптимізаційні математичні моделі процесу впливу на однорідний і багатошаровий об'єкти дослідження.

Практичне застосування досліджень автора можливе для розрахунку і оптимізації керуючих параметрів процесів зварювання металу, лазерного зварювання біоматеріалу, розтину шкіри. Це дає змогу стверджувати про їх універсальність для розв'язання багатьох технологічних і біотехнологічних завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведемо аналіз наукових публікацій [1–6], що стосуються тематики досліджень автора. У монографіях [1; 2] наведено детальний аналіз наукових публікацій, що стосуються питань розрахунку й оптимізації гідродинамічних, теплофізичних, екологічних, механічних та інших систем, які містять локальні, дискретні джерела фізичних полів. У них наведені ефективні методи розрахунку керуючих параметрів розглянутих систем. Питання прикладного характеру досліджені в роботах [3–6]. У роботі [3] наведена оптимізація технічних параметрів процесу лазерного розтину металу. Результатом роботи [4] є висновок про доцільність використання саме лазерного хетчингу для

розсічення зовнішньої оболонки ембріона і забезпечення трансплантації клітин. Розрахунку температури лазерної дії на ембріон для декількох теплових режимів присвячені результати роботи [5]. Однак у роботах [4; 5] не розглядалися питання оптимізації параметрів мікробіологічних систем, які перебувають під впливом зосереджених рухомих джерел температурних полів, які своєю чергою, відрізняються постановкою і реалізацією крайових задач і прикладних оптимізаційних математичних моделей. Питання вибору та завдання оптимальної траєкторії для підрахунку числа життєздатних зародків у разі ділення ембріона лазерним відрізком розглянуті в роботі [6].

Мета статті – розробити розрахункові математичні моделі для неоднорідної ділянки матеріалу та намітити шляхи для оптимізації багат шарових технологічних систем, які містять локальні, дискретні джерела теплової дії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо крайову задачу рівняння теплопровідності для однорідної необмеженої прямолинійної ділянки матеріалу, яка перебуває під впливом джерел теплового навантаження:

$$\rho c \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T(z,t)) + Q_0(z,t), \quad (1)$$

де ρ – коефіцієнт густини матеріалу;
 c – коефіцієнт теплоємності матеріалу;
 $T(z,t)$ – температурне поле в матеріалі;
 z – глибина проникнення випромінювання в матеріал;

t – час теплового впливу;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

$\nabla T = \text{grad } T$;

$Q_0(z,t)$ – функція, яка характеризує розподіл джерела енергії теплового навантаження.

Для розрахунку об'ємної густини $Q(z,t)$ джерела тепла в середовищі використаємо формулу:

$$Q(z,t) = \mu_a \varphi(z) \frac{E_0}{t^*}, \quad (2)$$

де μ_a – коефіцієнт поглинання;

$\varphi(z)$ – повна освітленість у точці z ;

E_0 – густина енергії випромінювання;

t^* – час дії імпульсного джерела.

Розподіл об'ємної густини потужності $Q(z,t)$ теплових навантажень:

$$Q(z,t) = \mu_a \int_0^{4\pi} Q_0(z,t) d\Omega, \quad (3)$$

де $d\Omega$ – тілесний кут.

Функція $Q(z,t)$ має такий вигляд:

$$Q(z,t) = \begin{cases} q_0(z,t), & \text{якщо } z \in [0; z_0], t \in [0; t^*]; \\ 0, & \text{якщо } z \notin [0; z_0], t \notin [0; t^*], \end{cases} \quad (4)$$

де $[0; z_0]$ – ділянка дії лазерного джерела;

$q_0(z,t)$ – питомий розподіл густини потужності теплових навантажень.

У випадку, коли коефіцієнти теплопровідності λ сталі, диференціальне рівняння теплопровідності (1) матиме такий вигляд:

$$\rho c \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \lambda \Delta T + q_0(z,t), \quad (5)$$

де $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа.

Побудуємо крайову задачу процесу дії лазерного променя на ембріон. У якості першого наближення розглянемо ембріон під дією джерел лазерного випромінювання як сферичний, однорідний мікробіологічний об'єкт без урахування особливостей лазерних випромінювачів [7]. В основі крайової задачі процесу термічної дії лежить неоднорідне диференціальне рівняння теплопровідності у сферичній системі координат:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_0(\vec{r}, t) = 0, \quad (6)$$

де $T = T(\vec{r}, t)$ – температурне поле;

\vec{r} – глибина проникнення лазерного променя в ембріон;

$q_0(\vec{r}, t)$ – функція, яка характеризує розподіл енергії теплового випромінювання.

Граничні умови Діріхле на початку та наприкінці теплової дії:

$$\begin{cases} T(0,0) = T_0; \\ T(r_n, t_n) = T_n, \end{cases} \quad (7)$$

де T_0 – температура на початку лазерної дії;

T_n – температура наприкінці лазерної дії.

Граничні умови теплового обміну на границі розділу ембріона та навколишнього середовища:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(0,t)}{\partial r} = A(T_1 - T_{ext}), \quad (8)$$

де A – параметр тепловіддачі ембріона;

T_1 – температура ембріона;

T_{ext} – температура навколишнього середовища.

Розглянемо ембріон з урахуванням його внутрішньої тришарової неоднорідної структури та технічних параметрів лазерних випромінюва-

чів. Система диференціальних рівнянь теплопровідності з крайової задачі процесу лазерної дії на ембріон:

$$\begin{cases} 5.46 \frac{\partial T_1}{\partial t} = 0.71 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + 55.02, \text{ якщо } r \in [20; 30], t \in [625; 1250]; \\ 5.44 \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0.96 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r_2} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + 94.1, \text{ якщо } r \in [30; 40], t \in [1250; 1875]; \\ 5.3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = 0.94 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{2}{r_3} \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + 390.25, \text{ якщо } r \in [40; 50], t \in [1875; 2500]. \end{cases} \quad (9)$$

Граничні умови на початку і наприкінці лазерної дії на ембріон:

$$\begin{cases} T(0; 0) = 100 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ T(53; 2550) = 37 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (10)$$

Граничні умови питомого теплового потоку:

$$-0,67 \frac{\partial T_1}{\partial r}(0, t) = 4,4. \quad (11)$$

Рівності розділу середовищ:

$$\begin{cases} T_1(20; 625) = T_2(30; 1250), -0,76 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -0,91 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \text{ якщо } r \in [20; 30]; \\ T_2(30; 1250) = T_3(40; 1875), -0,91 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -0,97 \frac{\partial T_3}{\partial r}, \text{ якщо } r \in [30; 40]; \\ T_3(40; 1875) = T_4(50; 2500), -0,97 \frac{\partial T_3}{\partial r} = -0,99 \frac{\partial T_4}{\partial r}, \text{ якщо } r \in [40; 50]. \end{cases} \quad (12)$$

Рівності неперервності температурних полів:

$$\begin{cases} T(20; 625 - 0) = T(20; 625 + 0); \\ T(30; 1250 - 0) = T(30; 1250 + 0); \\ T(40; 1875 - 0) = T(40; 1875 + 0); \\ T(50; 2500 - 0) = T(50; 2500 + 0). \end{cases} \quad (13)$$

Як показано в роботах [8; 9], розмірність простору параметрів температурного поля залежить від числа змінюваних параметрів теплової дії на ембріон, а саме від таких параметрів, як: число точок контролю температурного поля ембріона, потужність лазерного джерела, геометричні характеристики джерела впливу, швидкість руху лазерного джерела поверхнею ембріона, траєкторія руху та інші.

Оскільки крайова задача вважається коректною лише за простої просторової форми та однорідної структури досліджуваного об'єкта, тоді потрібно визначити умови коректності крайової задачі процесу лазерної дії на ембріон. При цьому скористаємося результатами роботи [10]. Запишемо рівняння теплопровідності (6) в такому вигляді:

$$A_0(r, D_r, D_r)T(r, t) + \frac{\lambda}{\rho c} A(r, D_r, D_r)T(r, t) = f(r, t). \quad (14)$$

Перевіримо, чи буде символ оператора $A_0(r, D_r, D_r)$ експоненціально-коректним поліномом сталої сили, а $A_1(r, D_r, D_r)$ – підлеглим символом диференціального оператора.

Поліном $P(\tau, \eta)$ називається експоненціально-коректним, якщо для будь-якого $\nu > 0$ знайдеться $p(\nu)$: $P(\tau, \eta + i\omega) \neq 0$ за умови, що

$$\text{Im } \tau < p(\nu), \quad |\omega_j| < \nu, \text{ де } j = 1, \dots, n-1.$$

Символ $P(x, \tau, \eta) = \sum_j a_j(x) \tau^{j_0} \eta_1^{j_1} \dots \eta_{n-1}^{j_{n-1}}$ вдовольняє умові сталості сили, якщо відшукуються такі $A > 0, \gamma_0$, що: $|P(x', \tau, \eta) / P(x'', \tau, \eta)| < A$ для будь-яких $x', x'' \in R^n$, якщо $\text{Im } \tau < \gamma_0$.

Для подальших досліджень скористаємося визначенням псевдодиференціального оператора.

Псевдодиференціальним оператором називається оператор:

$$A(x, D)\varphi(x) = F_\xi^{-1}(A(x, \xi)\tilde{\varphi}(\xi)), \quad (15)$$

де символ $A(x, \xi)$ належить простору нескінченно-диференційованих функцій степеневого росту; $\tilde{\varphi}(\xi)$ – перетворення Фур'є узагальненої функції.

Частковим випадком псевдодиференціального оператора є диференціальний оператор.

Як бачимо, за $r > \delta$ умови виконані, а тому така крайова задача коректна.

Для розв'язання крайової задачі можна скористатися методом розділених змінних. Провівши низку розрахунків, отримали рівняння з відокремленими змінними і рівняння класу Фукса [11]. Розв'язавши рівняння класу Фукса, отримали два розв'язки:

$$T_1(r) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k r^{2k-1}}{a^k ((2k)!!)^2}$$

$$\text{і } T_2(r) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k r^{2k}}{a^k ((2k+1)!!)^2}. \quad (16)$$

З урахуванням граничних умов крайової задачі:

$$T(r, t) = T(0, 0) e^{ct} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c^k r^{2k}}{a^k ((2k+1)!!)^2} - \frac{\rho c q_e}{6\lambda} r^2 g(t), \quad (17)$$

де функція $g(t)$ має вигляд:

$$g(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t \leq t_0; \\ 0, & \text{якщо } t > t_0. \end{cases} \quad (18)$$

Провівши розрахунки, отримали, що температура нагріву периветильованого простору – 85,30 °С, клітин blastomiriv – 60,15 °С.

Наведемо приклади декількох прикладних оптимізаційних математичних моделей для однорідного і багат шарового мікробіологічного матеріалу. Слід відзначити, що результати справедливі для одношарового матеріалу можна перенести на випадок багат шарового середовища.

Математична модель 1. Необхідно мінімізувати за параметрами теплового впливу максимальне значення модуля градієнта температурного поля в області точок однорідного мікробіологічного матеріалу Ω , тобто знайти:

$$\min_{z^* \in Z} \left[\max_{\substack{(x,y,z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0, t^*]}} |grad T(x, y, z, t, z^*)| \right]. \quad (19)$$

При цьому $T(x, y, z, t, z^*)$ є температурним полем області точок $(x, y, z) \in \Omega^*$ матеріалу Ω ,

$$z^* = (x, y, z, t, u, E, s(t), v(t), Q(x, y, z, t), L), \quad (20)$$

де u – інтенсивність джерела;

E – енергія дії джерела;

$s(t)$ – траєкторія руху лазерного джерела;

$v(t)$ – швидкість руху джерела;

$Q(x, y, z, t)$ – густина теплової дії;

L – геометричні розміри лазерного джерела.

Математична модель 2. Частковим випадком наведеної вище математичної моделі є математична модель контролю міжшарового розподілу температурного поля. Тоді потрібно досягти:

$$\min_{z^* \in Z} \left| \max_{\substack{(x,y,z) \in N_1 \\ t \in [t_0, t^*]}} T(x, y, z, t, z^*) - \max_{\substack{(x,y,z) \in N_2 \\ t \in [t_0, t^*]}} T(x, y, z, t, z^*) \right|, \quad (21)$$

де N_1, N_2 – області, які займають контрольовані шари.

Відзначимо, що наведені вище прикладні оптимізаційні математичні моделі мають свої особливості: велику розмірність простору шуканих параметрів, нелінійність системи обмежень на параметри теплового впливу та на температурне поле, багатозв'язність області допустимих розв'язків, багатоекстремальність прикладних задач оптимізації, складнощі з пошуком та перебором локальних екстремумів. Для подолання зазначених складнощів та забезпечення процесу оптимізації можна скористатися спеціалізованими сітковими процесорами на аналогових чи гібридних моделях.

Висновки. У статті побудовані розрахункові математичні моделі процесу термічної дії на прямолінійну необмежену однорідну область матеріалу та ембріон, які перебувають під дією джерел лазерного випромінювання, наведена чисельна реалізація останньої математичної моделі з урахуванням тришарової неоднорідної структури ембріона та параметрів лазерної дії. Розглядаючи піддослідний матеріал спочатку як однорідне тіло, а згодом, беручи до уваги його багат шарову структуру та особливості випромінювачів, автор наводить деякі прикладні оптимізаційні математичні моделі процесу термічної дії на багат шаровий матеріал. Відзначимо, що, беручи піддослідний матеріал як однорідне тіло, зменшуються витрати часу на забезпечення ітераційного процесу пошуку локальних екстремумів та здійснення оптимізації. Врахування неоднорідної, багат шарової структури досліджуваного об'єкта під час математичного моделювання та оптимізації параметрів теплової дії дасть змогу підвищити точність розв'язання прикладних задач оптимізації, здійснити контроль за використанням ресурсів випромінювачів, що дасть змогу підвищити якість технологічних процесів. Однак це підвищить складність формалізації прикладних задач оптимізації. Пов'язані з цим часові витрати можна скоротити за рахунок використання спеціалізованих сіткових процесорів на аналогових і гібридних моделях.

Список літератури:

1. Стоян Ю.Г., Путьтин В.П. Оптимизация технических систем с источниками физических полей. Киев : Наук. думка, 1988. С. 44–48.
2. Стоян Ю.Г., Путьтин В.П. Размещение источников физических полей. Киев : Наук. думка, 1981. С. 59–87.
3. Чубаров Е.П. Управление системами с подвижными источниками воздействия. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 288 с.
4. Antinori S. Experience with the UV non contact laser in a assisted hatching in human. *Journal of Assist Reprod. and Genet.* 1997. Vol.14, Issue 5. 200 p.
5. Douglas-Hamilton D.H., Conia J. Thermal effects in laser-assisted pre-embryo zona drilling. *Journal of Biomedical Optics.* 2001. Vol. 6, Issue 2. P. 205. DOI: 10.1117/1.1353796.
6. Levkin A., Levkina R., Petrenko A., Chaliy I. Economic Security as a Result of Modern Biotechnology Implementation: 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T'2019) (8–11 October 2019 Kyiv). Kyiv, 2019. P. 139–142.
7. Мегель Ю.Е., Левкин Д.А. Математическая модель теплового нагрева многослойного микробиологического объекта. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* Харьков, 2012. № 3/4 (57). С. 4–8.
8. Левкін Д.А. Математичні моделі оптимізації параметрів дії лазерного променя на багат шарові біосистеми. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* Збірник наукових праць. Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси». Харків : НТУ «ХПІ», 2014. № 60 (1102). С. 77–84.
9. Мегель Ю.Е., Путьтин В.П., Левкин Д.А., Левкин А.В. Математическое моделирование и оптимизация параметров действия лазерного луча на многослойные биоматериалы. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* Збірник наукових праць. Серія: «Механіко-технологічні системи та комплекси». Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 20 (1242). С. 60–64.
10. Левкін Д.А. Прикладні моделі та методи оптимізації систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.* Серія: «Технічні науки». Київ, 2020. Т. 31 (70), № 1. Частина 1. С. 99–103. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.1-1/18>.
11. Левкин Д.А. Математическое моделирование и оптимизация многослойных систем. *Енергетика і автоматика.* Київ : НУБіП України, 2019. № 1(41). С. 45–56. DOI: 10.31548/energiya2019.01.045.

Levkin D.A. METHODOLOGY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES RESEARCH

The article considers possible approaches to the calculation and optimization of technological systems containing discrete heat sources. The purpose of the research is to develop computational and applied optimization mathematical models of the thermal influence process on the material, to improve the quality of technological processes by reducing damage to the studied object and ensuring control over the use of resources.

The author constructs computational mathematical models (boundary value problems) and presents some applied optimization mathematical models of the process of thermal action on homogeneous and multilayer objects. It should be stated that multilayer structure of the object under study and the technical parameters of the emitters significantly complicates the process of formalization of applied optimization mathematical models. This leads to a significant amount of time to ensure the iterative process of finding and searching for the extremes of the temperature field and to ensure the optimization of technological systems. At the same time, this increases the accuracy of calculation and optimization of system parameters which helps to reduce the damage to the object under the research. To increase the speed of the research of mathematical models applied optimization, the author proposes to use network processors on analog and hybrid models.

The article represents the numerical implementation of the calculated mathematical models of the process of thermal influence on the example of the embryo, calculated the heating temperatures of the embryo layers and laid the prerequisites for further study of applied optimization mathematical models. However, as an object of the research for the construction and numerical implementation of boundary value problems, it is possible to choose an arbitrary object. Changing the object of study will cause a change in the parameters for setting boundary value problems and a set of methods in the computational structures required for the optimization process.

Key words: *mathematical models, boundary value problems, optimization, network processors, computational structure.*

Мещеряков Д.В.

АО PETROSOFT (г. Одесса)

НЕЧИСЛОВАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ В ИНФРАКРАСНОЙ СИСТЕМЕ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Розглянуто обробку вихідної ознакової інформації в інфрачервоній системі пелюїдотерапії з біологічним зворотним зв'язком, яка може бути використана для лікування опорно-рухового апарату членів екіпажу судів. Обґрунтовано необхідність узгодження кібернетичного і фізіологічного підходів описів, що використовуються для технічних і біологічних об'єктів. Показано, що основними проблемами, які виникають під час обробки вихідних ознакових сигналів є їх нечіткість і неоднозначність. Ці особливості реакції фізіологічного об'єкта на інфрачервоний вплив зумовлені як складністю фізіологічного об'єкта, так і накладанням супутніх сигналів на інформаційні сигнали відносно управління процесом опромінювання. Обґрунтовано складність одержання аналітичних зв'язків між вхідним впливом і відгуком організму, який може бути зафіксовано неінвазивними технічними засобами. Запропоновано для опису вихідних ознак використовувати методи статистики нечислових даних. Виявлено особливості обробки якісних даних відповідно до прийняття рішень для управління замкнутою системою регулювання інтенсивності випромінювання. Показано, що показником вибраних даних може служити середнє по Кемені. Співставлення послідовності середніх значень ковзаючої вибірки дало змогу визначити механізм рішення стосовно направлення зміни інтенсивності інфрачервоного випромінювання, що генерується. Обґрунтовано доцільність використання в системі з біологічним зворотним зв'язком критерію знаків для прийняття рішень у темі з біологічним зворотним зв'язком. Досягнення локальних цілей управління інтенсивністю опромінювання біологічного об'єкта зводиться до принципу стежачого урівноваження, для якого характерний високий ступінь стійкості до аномальних викидів. Для компенсації недоліку, пов'язаного з великим часом виходу на режим регулювання, запропоновано два шляхи підвищення динамічних характеристик управління. Перший засновано на нечислових методах по аналогії з роботою біологічних сенсорів, другий – на нечітких регуляторах.

Ключові слова: біологічний зворотний зв'язок, нецифрова статистика, прийняття рішень, управління.

Постановка проблеми. Системы автоматического управления базируются на кибернетических принципах, которые включают в себя: модельное представление объектов, их формальное описание, модульный принцип построения сложных систем, рассмотрение элементов в терминах «вход–выход–состояние». Замена реального объекта его моделью, для последующего экспериментирования с ней, предполагает, что при неизменном входном воздействии выходная реакция элемента будет повторяемой.

Введение биологической обратной связи в систему кардинально меняет ситуацию, поскольку к человеку, как к элементу системы управления, невозможно применить понятие линейности, а неизменное входное воздействие не дает повторяющейся реакции. Биологический объект настолько сложен, что стандартные математические методы описания, применяемые для технических объектов, малоэффективны. Данные методы используются для формализации систем

с биологической обратной связью при условии, что объект может быть представлен некой обобщенной, т.е. кибернетической моделью. Примером может служить тепловая модель усредненного птенца в системе управления инфракрасным обогревом при промышленном выращивании цыплят.

Для биологических объектов более адекватной представляется физиологическая модель Анохина, для которой характерна взаимосвязь и взаимообусловленность составляющих подсистем и существенная зависимость выходных реакций от предыстории процесса и реализуемых подцелей. Сенсорные системы организма сложнее сенсоров технических систем, в них входят вспомогательные структуры, оптимизирующие работу рецепторов, которые не просто передают возбуждение, а адаптируются под характеристики раздражителя. Сенсорная система имеет обратные связи с последующими и предшествующими структурами, передача сигналов идет по разным

каналам, обработка сенсорного возбуждения осуществляется не только в центральной нервной системе, но в нижележащих структурах. Следствием этого является различное время реакции организма на входное воздействие, что может влиять на устойчивость управляющей биотехнической системы.

Важную роль играет также распространение информации в физиологической системе. Каналы передачи имеют очень низкую пропускную способность по сравнению с техническими системами, однако обеспечивают устойчивое функционирование организма в реальном масштабе времени. Сигналы рецепторов имеют сложную структуру, содержат данные начала и окончания воздействия, амплитуда и частота в которых меняется по мере воздействия, подстраивают свою активность в ходе действия длительного раздражения. Очевидно, что ни частота биологических импульсов, ни амплитуда не способны нести в себе всю информацию относительно входного воздействия в силу их ограниченного диапазона. Вместе с тем известно сколь малые перепады воздействий идентифицируются физиологической системой и как велик динамический диапазон воспринимаемых воздействий. Организм выполняет множество функций для поддержания гомеостаза и баланса с окружающей средой. Все это приводит к тому, что невозможно выделить четкую и однозначную связь между входным воздействием и выходным признаком проявления этой реакции. Выходные признаки организма несут информацию смешанного типа, а если учесть, что инвазивные средства считывания неприемлемы для проведения физиологических процедур и следует ограничиться неинвазивными средствами, это приводит к еще большему снижению информативности.

Актуальность исследования процессов обработки данных в медицинских биотехнических системах не вызывает сомнения. Системы с биологической обратной связью получают все большее распространение, поскольку исключают фармакологические средства и актуализируют внутренние резервы организма в процессе проведения лечебных процедур. Совмещение кибернетического и физиологического подходов существенно повышает интеллектуальную составляющую биотехнических систем за счет использования преимуществ каждого компонента. Противоречие между кибернетическим и физиологическим подходами, различие в методах преобразования сигналов составляют глав-

ную проблему создания биотехнических систем с биологической обратной связью.

В данной работе рассматривается подход к проблеме преобразования информации применительно к системе регулирования интенсивности инфракрасного излучения по физиологической реакции организма человека, находящегося в цепи биологической обратной связи [1]. Поскольку реакция человека на тепловое воздействие зависит от его массы, возраста, характера заболевания, то достижение условий индивидуального облучения позволяет оптимизировать лечебный процесс пелоидотерапии.

Анализ последних достижений и публикаций. Методы обработки биометрических сигналов в значительной мере определяются используемыми измерительными преобразователями, поскольку инвазивные или неинвазивные средства мониторинга оказывают существенное влияние на качество и информативность считываемых сигналов [2]. В работе [3] показано, что наиболее значимыми признаками, характеризующими тепловое воздействие на организм, являются частота сердечных сокращений и дыхания, температура кожного покрова и потовыделение. Предварительная обработка полезного сигнала из считываемого выходного сигнала variability сердечного ритма осуществляется линейными спектральными методами [4] или методами нелинейной фильтрации [5], что позволяет выделять биологические сигналы на фоне сопутствующих сигналов. Эффективная информационная технология обработки сигналов включает представление модели полезного сигнала в виде решетчатой функции, разложение сигнала по базисным функциям, а также кусочной в виде последовательности фрагментов [6]. Основным ограничением таких подходов является тот факт, что сигналы биологического объекта воспринимаются однозначными, несущими информацию только относительно исследуемого процесса [7]. Вместе с тем проблема обработки биологических сигналов применительно к управлению техническими объектами далека от разрешения. Такие особенности сигналов, как нечеткость и неоднозначность относительно первичного возбуждения, усугубляют проблему [8]. Использование нечетких методов [9] позволяет в определенной мере снизить это влияние. Применительно к задачам управления в системах с биологической обратной связью проблема неоднозначности реакции на известное входное воздействие даже не рассматривалась [10]. При решении сложных задач

принятия решений в экономике, социологии, математическом моделировании применяются методы нечисловой статистики [11]. Однако информация относительно возможности использования этих методов преобразования выходных признаков данных биологического объекта в технико-биологических управляющих системах отсутствует.

Формулирование целей статьи. Целью работы является анализ возможности использования методов нечисловой статистики для преобразования выходных признаков сигналов человека, находящегося в цепи биологической обратной связи системы управления интенсивностью инфракрасного облучения.

Для достижения этой цели необходимо решить задачи:

- 1) определить значимый признак выборки выходных признаков биологического объекта, обеспечивающий устойчивость обработки данных;
- 2) разработать алгоритм принятия решений для управления инфракрасными излучателями.

Изложение основного материала. Выходное информационное признаковое пространство биологического объекта носит вероятностный характер, что связано с низким уровнем выходных сигналов, взаимным наложением разнородных сигналов, шумом и влиянием внешних воздействий. Это предопределяет использование статистических методов обработки данных и учет того обстоятельства, что считываемая последовательность носит нестационарный характер. Нестационарность приводит к необходимости выделения квазистационарных участков, на которых возможно выделение моментов стационарной последовательности.

Кроме того, признаки сигналы, например проводимости кожного покрова, полученные на различных участках тела, имеют существенный разброс. Это связано с неравномерным расположением по поверхности тела потовых желез, различной толщиной эпидермиса и т.п. Более того, прямой связи сопротивления кожного покрова и активизации потовых желез нет, а изменение сопротивления кожного покрова в два раза вовсе не означает, что их активность изменилась пропорционально. Отсюда следует, что выходные данные несут информацию относительно физиологических процессов в организме, однако эти данные являются скорее качественными, чем количественными.

Таковыми качественными уровнями в системе инфракрасной пелоидотерапии могут служить проницаемость кожного покрова для лечебного

пелоида, которая условно описываются пятью уровнями: непроницаемого, плохо проницаемого, средне проницаемого, проницаемого, хорошо проницаемого [12]. Данные состояния представляются сопротивлением кожного покрова, значения которого лежат в диапазоне от единиц МОм до сотен Ом. Очевидно, что сопротивление кожного покрова не эквивалентно активности потовых желез, поэтому привязка физических показаний прибора к физиологической проводимости пелоида является качественной, а не количественной.

Качественная природа выборок, в отличие от количественного представления, имеет свои особенности. Так, значения выборок нельзя складывать, поскольку полученные значения при этом теряют содержательный смысл. Если предположить, что последовательность выборок x_1, x_2, \dots, x_n являются элементами нелинейного множества X , то при приведенных ограничениях становится понятным, что определение среднего значения выборки требует иных подходов по сравнению с принятыми. Даже при анализе выборок цифрового ряда среднеарифметическое значение применимо только для случая достаточно равномерного значения членов ряда. Если в совокупности выборки присутствует аномальное значение, то величина среднеарифметического значения выборки не всегда адекватно характеризует среднее, поскольку влияние данной составляющей гораздо значимее остальных.

В нецифровой статистике мерой различия служит показатель $d: X^2 \rightarrow [0, +\infty]$, заключающийся в фиксации того факта, что чем больше $d(x, y)$, тем более разнятся x и y [11]. Применительно к эмпирическому среднему это означает минимизацию выражения:

$$E_n(d) = \text{Arg min} \left\{ \sum_{1 \leq i \leq n} d(x_i, x), x \in X \right\},$$

где среднее $E_n(d)$ представляет совокупность $x \in X$, для которых функция

$$f_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{1 \leq i \leq n} d(x_i, x)$$

достигает минимального значения на множестве X и является медианой или средним для выборки ранжировок по Кемени. В [11] показано, что для качественных значений для порядковой шкалы в качестве среднего можно использовать только медиану, а не среднеарифметическое или среднегеометрическое. Доказательство сходимости теоретического и эмпирического

средних основывается на законе больших чисел. При ограниченной выборке вводится понятие ε -пятки f , которая представляет собой окрестность $\text{Arg min}(f)$ в терминах минимизируемой функции. Этим, в частности, снимается вопрос о выборе метрики в пространстве X . Размеры ε -области определяются как точностью определения значений, так и с помощью используемых порогов чувствительности, если модуль разности между выборками меньше или равен порогу чувствительности.

Из особенностей качественного представления следует также и то, что увеличение объемов выборок может не привести к росту состоятельности оценки, поскольку невозможно говорить о стационарности и центрированности анализируемого процесса. Наряду с негативными следствиями такого утверждения имеет место и позитивная сторона – малый объем выборки и, соответственно, время выборки. Это обстоятельство критично для систем управления, поскольку вносит запаздывание, которое составляет не менее половины времени выборки. Малый объем выборки приводит к значительному разбросу показаний относительно среднего, поскольку для систем управления важен показатель устойчивости. Если рассматривать устойчивость как отсутствие выхода управляющих воздействий относительно допустимых отклонений, то реакция биологического объекта вида «холодно – тепло» или «комфортно – не комфортно» более устойчиво, чем восприятие цифрового значения температуры среды. Ощущение тепла каждым человеком воспринимается индивидуально, физиологическая реакция организма первична, а количественное описание условий вторично.

Шкалами качественных признаков являются порядковая шкала и шкала наименований [11], первая из которых соответствует решаемой задаче управления. Сравнение двух выборок Y и Z можно осуществить по их средним значениям:

$$f(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) < f(Z_1, Z_2, \dots, Z_n).$$

Если допускаются преобразования в порядковой шкале ρ , например нормирование, то Y_i и Z_i меняются на $\rho(Y_i)$ и $\rho(Z_i)$.

Для формирования среднего из совокупности данных можно использовать признак расстояния от данной точки до точек окружения, причем мерой близости являются меньшие расстояния. Поскольку для качественных значений невозможно использование операции суммирования, используем показатель различия. Для задач

управления с ограниченной выборкой необходимо определение эмпирического среднего, которое при определенных условиях обеспечивает сходимость с теоретическим средним.

Для пространства произвольной формы X с элементами x_1, x_2, \dots, x_n действительной функции $f(x, y)$ со значениями в X , значения функции различия $f(x, y)$ отличаются тем больше, чем более различаются x и y . Средней величиной \bar{x} относительно меры различия $f(x, y)$ является решение оптимизационной задачи [11]:

$$\sum_{i=1}^n f(x, y) \rightarrow \min, \quad y \in X.$$

Теоретическое среднее не отличается от классического среднего для закона больших чисел при $n \rightarrow \infty$, в соответствии с теоремой Хинчина, стремится к математическому ожиданию:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i, y) \rightarrow Mf(x, y).$$

При $f(x, y) = |x - y|$ и нечетном количестве выборок $n = 2k + 1$ значение среднего равно $\bar{x} = x_{k+1}$, т. е. получаем выборочную медиану. При четном количестве членов выборки получаем полусумму выборочных значений x_k и x_{k+1} . Для исключения арифметических действий можно ограничиться нечетным количеством выборок.

Для определения среднего по Кемени необходимо провести ранжировку данных. Для управляющей системы запаздывание определяется половиной длины выборки, поэтому она не может быть большой. При ограниченной выборке операция ранжирования состоит в расположении данных выборки в порядке неубывания, т. е. возрастания с возможностью существования элементов с одинаковыми значениями. Алгоритмы реализации такой функции известны и состоят в последовательном сравнении текущего элемента из выборки с выстроенными в порядке возрастания элементами. Далее определяется медиана, которая и является средним по Кемени.

Качественный характер выборок приводит к непараметрическим моделям описания процессов. Параметрическая вероятностно-статистическая модель представляется вектором фиксированной размерности, которая не зависит от объема выборки. В непараметрических моделях неприемлемо понятие плотности распределения, поэтому его можно заменить на вероятность попадания в ε -область. Формирование ε -области в простейшем случае

может быть установкой по уровню шума в обрабатываемом сигнале, требуемой чувствительности или иным критериям. В начальной стадии можно предусмотреть вариант асимптотического приближения к цели регулирования, затем уточнять в зависимости от существующих ограничений. Такое решение позволяет говорить о состоятельности предложенного подхода.

Для решаемой задачи управления интенсивностью инфракрасного излучения человека по его физиологическим признакам важно то, что устойчивость определения физиологической реакции выше, чем числовых величин приборов, поскольку она первична. Очевидно, что использование, кроме сопротивления кожного покрова, иных признаков реакции человека на инфракрасное облучение сохраняет качественный характер этих сигналов. Так, частота сердечных сокращений и дыхания лишь косвенно отражает факт усиления отбора тепла периферийной сосудистой и дыхательной системой.

Согласование функциональной и кибернетических структур в биотехнической системе управления с биологической обратной связью может быть достигнуто путем определения общих свойств данных систем. В биологическом объекте ответ на каждую реакцию сопровождается формированием элементарной цели, осуществлением деятельного акта, проверкой ее достижения, корректировкой элементарной цели и так далее. Эти действия происходят в рамках цели более высокого уровня, например поддержание температурных условий функционирования организма. Естественно, что это крайне упрощенная модель. Однако она может служить основой для согласования кибернетического и функционального подходов.

Выборка признаков x_1, x_2, \dots, x_n считываемой случайной величины X биологического объекта в силу отмеченных выше причин не может иметь известную функцию распределения $F(x)$. При увеличении объема выборки, в соответствии с центральной предельной теоремой, функция распределения стремится к нормальному закону распределения. Для непараметрической модели наиболее соответствующими решаемой задаче управления являются два критерия: критерий знаков и критерий знаковых рангов [13]. Для критерия знаков $F(m) = 0,5$, т.е. каждая из случайных величин равновероятно больше другой выборки:

$$R_j = \begin{cases} -1, & \text{если } x_j < m_0 \\ +1, & \text{если } x_j > m_0 \end{cases}$$

Если величина m_0 соответствует отклику сенсора при активном потоотделении, то представленная связь отображает принятие решения в окрестности активной терапевтической зоны. Сигнал «-1» свидетельствует о том, что интенсивность излучения необходимо повысить, «+1» – интенсивность излучения необходимо понизить, « $x_j = m_0$ » – оставить неизменным. Данный подход управления известен как принцип следящего уравнивания. Основным достоинством следящего уравнивания является высокая устойчивость преобразования при низком отношении сигнал/шум, недостатком – низкая скорость выхода на режим. Если последний недостаток не является принципиальным, например, за счет предварительного прогрева камеры пелоидотерапии перед проведением процедуры, то принятие решения относительно управления инфракрасными излучателями может ограничиться критерием знаков в представленном варианте.

Если важна скорость выхода системы на режим регулирования, можно воспользоваться методами нечеткой логики. Принятия решений относительно изменения интенсивности инфракрасного излучения по выходным признакам пациента, находящимся в цепи биологической обратной связи, относятся к нечетко определенным. Это обусловлено тем, что ощущение тепла для различных людей отличается, следовательно, и неоднородной является выходная признаковая реакция на это воздействие. Полагаем, что цель имеет множество альтернатив, причем априори считаем, что альтернативы равноправные, что соответствует подходу Беллмана-Заде.

Обозначим счетное количество альтернатив $a \in A$, где A некоторое нечеткое множество, а нечеткое множество целей через $G \subset A$. Функцию принадлежности каждой конкретной альтернативы этому подмножеству представим в виде $\mu_G : A \rightarrow [0, 1]$. Нечеткие ограничения представим множеством допустимых альтернатив C из того же множества A с функцией принадлежности α_C .

Задача сводится к достижению нечетко определенной цели α_G при нечетко заданных ограничениях α_C . Решением является пересечение нечетких множеств $D = G \cap C$, функция принадлежности которого достигает $\mu_D = \min\{\mu_G(a), \mu_C(a)\}$.

При наличии нескольких целей G_1, G_2, \dots, G_m и ограничений C_1, C_2, \dots, C_n необходимо учитывать весовые коэффициенты значимости каждого достижимости целей α и ограничений β . Так, для задачи повышения проводимости кожного покрова значимость данных о сопротивлении

кожного покрову суттєво вище, ніж частота серцевих скорочень і частота дихання, котрі важливі тільки при значительних інтенсивностях облучення поверхні людини. Функція приналежності отримує вигляд

$$\mu_D(a) = \min\{\alpha_1\mu_{G1}(a), \dots, \alpha_m\mu_{Gm}(a), \beta_1\mu_{C1}(a), \dots, \beta_n\mu_{Cn}(a)\}$$

Це означає, що чим більше ступінь приналежності α_G однієї з альтернатив множині мети $G(a)$, тим вищою буде ступінь досягнення цієї мети при виборі даної альтернативи a при розв'язанні даної задачі.

Возможний і біологічний підхід до підвищення динамічних характеристик слідяючої системи урівноваження. Для цього використаємо спрощену модель формування відклику від сенсора біологічної системою (рис. 1) [12].

Кодування інформації в біологічних аналізаторах здійснюється як в амплітудній, так і в імпульсній формі. При цьому вміст інформації визначається не тільки амплітудою імпульсів, але і кількістю імпульсів в одиницю часу, з'єднанням імпульсів в пакети, числом імпульсів в пакеті, інтервалами між пакетами. Така складна комбінація способів представлення інформації дозволяє як підвищити надійність передачі первинних повідомлень в центральну нервову систему, так і забезпечити настільки великий динамічний діапазон сприймаємих впливів біологічної системою. Очевидно, що ні один з окремо взятих способів кодування не в змозі забезпечити передачу достовірної інформації від сенсора при настільки обмеженій пропускну здатності біологічного каналу зв'язу.

Таким чином, якісне представлення вихідних ознак біологічного об'єкта,

знаходячись в ланці біологічної зворотної зв'язу системи регулювання, дозволяє формувати запити на управління інтенсивністю інфрачервоного випромінювання по фізіологічній реакції організму. По вихідній фізіологічній інформації як реакції на зовнішнє теплове впливання, так і на внутрішню адаптацію організму до власних цілей і виконуваним процесам здійснюється зміна зовнішнього впливання з урахуванням неоднозначності перетворення.

Застосовуючи до управління інтенсивністю інфрачервоного випромінювання по одній з вихідних ознак біологічного об'єкта, наприклад, опору шкіри, варіант розв'язання задачі зводиться до наступного:

- 1) перетворення вихідної ознаки в бінарний сигнал;
- 2) виявлення обмежень зони ознак управління;
- 3) виділення терапевтичної зони управління;
- 4) якісне представлення лепестків управління;
- 5) розподілення інтенсивності управління в зоні лепестків;
- 6) формування управляючого впливання.

Реалізація запропонованого варіанту управління інтенсивністю інфрачервоного нагріву пацієнта в камері інфрачервоної пелюидотерапії виконана на базі технології ARDUINO. Обмеження інтенсивності випромінювання інфрачервоних випромінювачів вибиралися з умови невідповідності перебування в приміщенні. Цьому умові відповідають значення опору шкіри вище 1 МОм. З точки зору проведення процедури діапазон

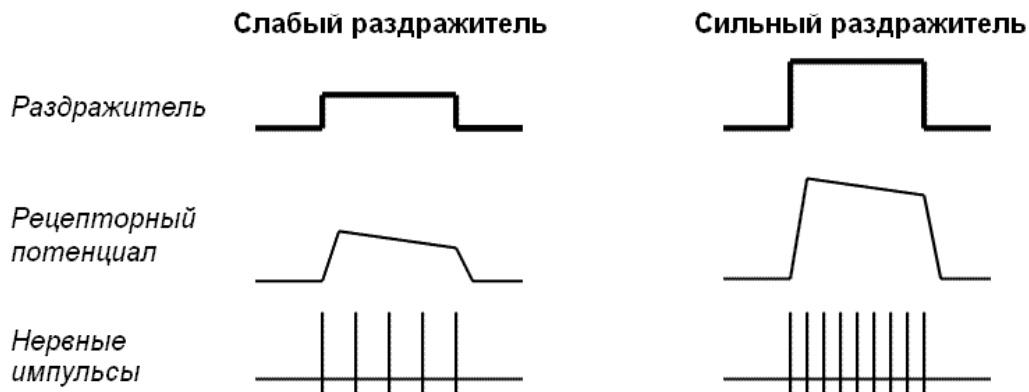


Рис. 1. Преобразование энергии внешнего раздражителя в рецепторный потенциал и серию нервных импульсов при действии слабого и сильного раздражителя

не представляет интереса, поскольку характеризует сухой эпителий, сигнализирующий о присутствии излишков тепла в организме. Значение сопротивления кожи меньше 75 Ом с обильным выделением пота и интенсивностью нагрева, близкой к болевым ощущениям, может служить верхним предельным диапазоном интенсивности нагрева.

Экспериментально полученная активная область сопротивлений кожного покрова лежит в диапазоне 500–200 Ом. Центр этой зоны отличается как для различных людей, так и для мест считывания данных на теле. Для обеспечения устойчивости управления в активной области использовался алгоритм знаков с изменением содержимого регистра управления на единицу после каждого такта и формирования среднего выборки. Кроме резистивных, существуют датчики оптоэлектронного или емкостного типов, которые определяют момент активизации потовых желез, например [14], что может служить опорной точкой t_0 .

Левый лепесток управления в диапазоне (0,5–19) КОм меняет содержимое на 2, в диапазоне (10–100) КОм на 3, в диапазоне (100–1000) КОм на 4, выше 1 МОм на 5. Соответственно, в правом лепестке значения меняются в диапазоне (200–150) Ом на 2, в диапазоне (150–100) Ом – на 3, в диапазоне (100–75) – на 4, меньше 75 Ом – на 5. Следовательно, динамика формирования управ-

ляющих воздействий в центральной зоне и границах управления существенно отличается.

В качестве принципа управления инфракрасными излучателями выбрано широтно-импульсное симисторное управление, предусмотренное в ARDUINO. Параллельно включенные инфракрасные керамические, трубчатые и ламповые инфракрасные излучатели имели постоянные времени 8 минут, 4 минуты, 2 секунды соответственно. Мощности излучателей различных спектральных диапазонов примерно одинаковые, диапазон рабочих интенсивностей терапевтического диапазона составлял 60–90% от максимального значения, камера предварительно прогревалась на уровне 50% мощности в течение 10 минут. Период измерения кожного сопротивления – 2 сек, количество уровней управления – 256, время терапевтической процедуры 20–25 минут.

Выводы. Показано, что для инфракрасной системы регулирования с биологической обратной связью предпочтительна обработка первичной признаковой информации методами статистики нечисловых данных, снижающих влияние неопределенности и неоднозначности на результаты принятия решения.

Предложен алгоритм повышения динамических характеристик системы управления инфракрасными излучателями, основанный на биологических аналогиях и нечеткой логике.

Список литературы:

1. Деклараційний патент № 58051А (Україна). Спосіб пелюдотерапії та камера для його здійснення / Косовров Є.О., Тишук М.М., Мещеряков В.І., Веселкова Т.О.
2. Федотов А.А., Акулов С.А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. Москва : Радио и связь. 2013. 250 с.
3. Гнаговская А.А., Мещеряков Д.В., Черепанова Е.В. Концепция преобразования данных инфракрасной системой с биологической обратной связью. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2018. Т. 29(68). № 2. С. 116–120.
4. Кухтичев А.А., Клёнов Е.А. Носимые устройства микроэлектроники как основа биологической обратной связи системы «ЦифроМед» в авиации и космонавтике. *Врач и медицинские технологии*. 2015. № 3. С. 39–48.
5. Filatova A.E. Nonlinear filtration of biomedical signals with the locally concentrated signs in task of structural identification. *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. Kharkov : NTU "KhPI"*. 2011. No. 17. Pp. 168–174.
6. Файнзильберг Л.С. ФАЗАГРАФ – эффективная информационная технология обработки ЭКГ в задаче скрининга ишемической болезни сердца. *Клиническая информатика и телемедицина*. 2010. Т. 6. Вып. 7. С. 22–30.
7. Калиниченко А.Н. Компьютерные методы автоматического анализа ЭКГ в системах кардиологического наблюдения : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург. 2008. 205 с.
8. Акулов С.А., Федотов А.А. Основы теории биотехнических систем. Москва : ФИЗМАТЛИТ. 2014. 259 с.
9. Пономарев А.С. Нечеткие множества в задачах автоматизированного управления и принятия решений. Харьков : НПУ «ХПИ». 2005. 232 с.
10. Каплан А.Я. ЭЭГ как управляющий сигнал: на пути к биотехнической нейрокоммуникации. *Биоуправление: теория и практика*. Новосибирск. 2010. С. 7–18.

11. Орлов А.И. Нечисловая статистика. Москва : МЗ-Пресс. 2004. 513 с.
12. Батуев А.С. Физиология высшей нервной деятельности и сенсорных систем. Санкт-Петербург : Питер. 2010. 317 с.
13. Большаков А.А., Каримов Р.Н. Методы обработки многомерных данных и временных рядов. Москва : Горячая линия–Телеком. 2007. 522 с.
14. Платонов А.К. Высокочувствительный сенсор электрического сопротивления кожи человека. Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2012. № 18. 20 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-18>.

Mescheryakov D.V. NON-NUMERICAL STATISTICAL DATA PROCESSING IN A SYSTEM WITH BIOLOGICAL FEEDBACK

The processing of output sign information in an infrared peloids therapy system with biological feedback, which can be used to treat the musculoskeletal system of ship crew members, is considered. The necessity of harmonizing the cybernetic and physiological description approaches used for technical and biological objects is substantiated. It is shown that the main problems encountered in processing the output feature signals of a biological object are their fuzziness and ambiguity. These features of the response of a physiological object to infrared exposure are due to both the complexity of signal conversion by the body and the imposition of accompanying signals on informative signals regarding the control of the irradiation process. The difficulty of obtaining an analytical relationship between the input effect and the response of the body, which can be fixed by non-invasive technical means, is substantiated. It is proposed to use non-numerical data statistics methods to describe output features. The features of processing high-quality data in relation to decision-making for managing a closed system for controlling the intensity of radiation are revealed. It is shown that the Kemeny average can serve as an indicator of sample values of primary data. A comparison of the sequence of average values of the moving sample allowed us to determine the decision-making mechanism regarding the direction of change in the intensity of the generated infrared radiation. The expediency of using the criterion of signs for making decisions in a system with biological feedback is substantiated. Achieving local goals of controlling the intensity of exposure to a biological object is reduced to the principle of tracking balancing, which is characterized by a high degree of resistance to abnormal emissions. To compensate for the disadvantage associated with the long time for entering the control mode, two ways to increase the dynamic characteristics of control are proposed. The first is based on non-numerical methods, by analogy with the operation of biological sensors in the physiological system, the other on fuzzy regulators.

Key words: biofeedback, non-digital statistics, decision making, management.

Oleshchenko L.M.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Lysenko O.O.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

SOFTWARE METHOD FOR CLUSTERING SOFTWARE TESTING REPORTS USING KNN ALGORITHM

The article is devoted to the development and software implementation of a method for analyzing the results of software testing using the KNN algorithm. Software developers are trying to avoid manual product testing in order to reduce the risk of human factors and reduce the cost of testing. The average error analysis time after testing for 500 “failed” tests can be up to 24 hours. IT companies need automation of error analysis after software testing to provide the customer with a complete understanding of what’s going on in the project with a detailed description of what is already working and needs refinement. This is very difficult to do manually, especially when the project is very large and runs more than a thousand tests. There is a need to develop a software system for automated analysis of software test results, which will reduce the time of error analysis and will allow view the status of tests in real time. Existing machine learning methods that can be used to analyze software test results are analyzed. The choice of the most appropriate method of machine learning for this task, namely k-nearest neighbors (KNN), is grounded. On the basis of KNN a web application is created for automatic analysis of software testing results. The architecture of the software system is implemented in the form of microservices. The basic idea of the proposed method is that the stack path is used as the data to be clustered, this part contains information about the cause of the “drop” of the test. The proposed method makes it possible to automate the error analysis process, reducing the time and amount of human resources required to analyze software test results. The article compares the results of clustering methods of KNN, Support Vector, and Naive Bayes to automatically analyze software test results for 100, 200, 500, and 1000 failed tests. The automatic analysis of results is compared with the manual one. When studying the results of comparing automatic error analysis of software with 1000 failed tests, KNN method shows an accuracy of 0.982, which is the most accurate result among the clustering methods considered. When analyzing 150 failed tests, the algorithm showed a result 12 times faster than manual analysis. Thus, it is shown, that the proposed software method is effective.

Key words: software testing, machine learning methods, test case, stack trace, clustering, KNN algorithm, Elasticsearch, TF, IDF.

Problem statement. Testing is one of the key stages of software development. Analyzing developed software requires first-class testers, their constant training and motivation, which is a big problem for small and medium-sized companies. Software developers are trying to avoid manual product testing in order to reduce the risk of human factors and reduce the cost of testing. The average error analysis time after auto-testing for 500 “failed” tests can be up to 24 hours. IT companies need automation of error analysis after software testing to provide the customer with a complete picture of what’s going on in the project with a detailed description of what is already working and needs refinement. This is very difficult to do manually, especially when the project is very large and runs more than a thousand tests. There is a need to develop a software system for

automated analysis of software test results, which will reduce the time of error analysis and will allow view the status of tests in real time.

Related research. In previous works clustering methods: Naive Bayes method, Support Vector Machines method and k-nearest neighbors (KNN) algorithm are analyzed [1]. This study shows that Naive Bayes and Support Vector Machines methods are complex to implement, have less accuracy for large datasets than kNN, but have a higher clustering rate [2; 3].

The main goal of the article is to automate the process of analyzing the results of software testing, which means reducing human intervention in this process, the main requirement for the selection of the algorithm selected accuracy. The running time of the algorithm was not considered to be the main metric for selecting the algorithm, since using any

of these algorithms in general will greatly reduce the time for testing analysis. For this reason, the KNN algorithm was chosen as the basis for its simplest implementation and highest accuracy on large volumes of data. The first step of the algorithm is to specify the number k of nearest neighbors.

Presentation of the main research material. In the second step, there are k entries with a minimum distance to the feature vector of the new object (neighbor search). The distance calculation function must comply with the following rules: $d(x, y) \geq 0$, $d(x, y) = 0$ if and only if $x = y$; $d(x, y) = d(y, x)$; $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$, provided that the points x, y, z do not lie on a straight line, where x, y, z are the vectors of the signs of the objects being compared.

For ordered attribute values, the Euclidean distance is used [4]:

$$D_E = \sqrt{\sum_i^n (x_i - y_i)^2}, \quad (1)$$

where n is the number of attributes.

For row variables that cannot be ordered, the difference function can be applied [4]:

$$dd(x, y) = \begin{cases} 0, & x = y; \\ 1, & x \neq y. \end{cases} \quad (2)$$

When finding the distance, they take into account the importance of attributes, which is determined subjectively by the expert or analyst, relying on their own experience. In this case, when finding the distance, each i -th square of the difference in the sum is multiplied by a factor Z_i .

Using KNN algorithm for clustering reports of software testing

As the results of automated tests will be analyzed, the result of performing these tests will be a stack trace, which will contain messages about what is wrong in the test [5]. In this research the results of the Junit library for Java are used.

The first line of the stack track reports is the reason for the “drop” of the test. Lines of stack trace show the files in which the error occurred, followed by errors that pop up at all levels of the abstraction library used, and are usually identical in all automated tests. Since the bulk of this test is identical for each test, it is pointless to submit the entire stack path to the algorithm input, so this will not bring the desired result, so the first step would be to delete this duplicate text. Thereafter, basic information will remain that is unique to each test result. However, this will also not be enough, since there are still “noises” that need to be removed. The next step is to delete the date, which will also prevent clustering, then lowering the entire text to lowercase and removing punctuation marks. Then we get a text that can be worked with.

After a lot of repetitive code is gathered, we need to collect frequency pointers, that is, how often specific words are repeated in a certain category (Fig. 1). The more tests, the more text that can be worked with will be collected and thus the accuracy of the algorithm will increase.

Once we have all these metrics, we move on to the frequency response, this is the part where machine learning happens and is called the TF-IDF metric. This metric shows how often this word appears in

	4	5	2	7	5
				expected	found
				expected	found
			Service	expected	
AssertionError		Invalid			
		Invalid		expected	
				expected	found
AssertionError		Invalid			found
		Invalid			
AssertionError				expected	
AssertionError		Invalid	Service	expected	found

Fig. 1. Frequency error indicators

a document and how important it is to all documents in the library.

TF (term frequency) is the ratio of the number of occurrences of the selected word to the total number of words in the document. Thus, the importance of the word within the selected document is evaluated.

$$TF = \frac{n_i}{\sum_k n_k}, \quad (3)$$

where n_i is the number of occurrences of the word in the document and the denominator is the total number of words in the document.

IDF (inverse document frequency) is the inversion of the frequency with which a word occurs in

a collection document. Using IDF reduces the weight of commonly used words.

$$IDF = \log \frac{|D|}{|d_i \supset t_i|}, \quad (4)$$

where $|D|$ is number of collection documents; $|d_i \supset t_i|$ is the number of documents in which the word occurs t_i (when $n_i \uparrow 0$).

The choice of the basis of the logarithm in the formula (4) is irrelevant, since changing the basis will change the weight of each word by a constant factor, the weight ratio will remain unchanged. TF-IDF is the product of two factors: TF and IDF. This frequency response will help determine how important a word is for a particular

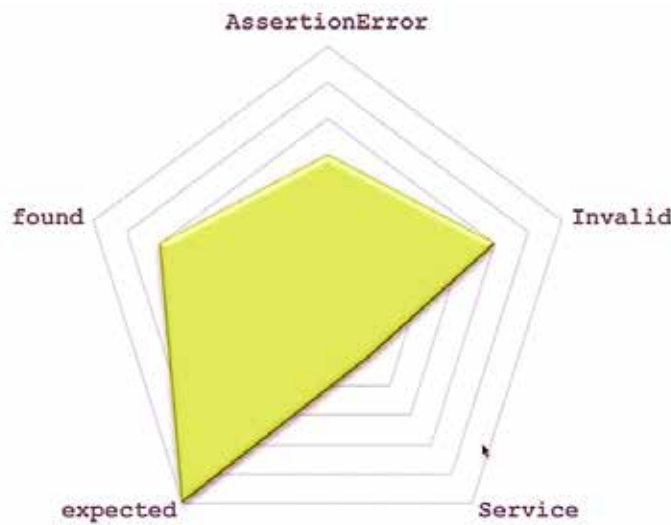


Fig. 2. Graphical representation of the TF-IDF metric

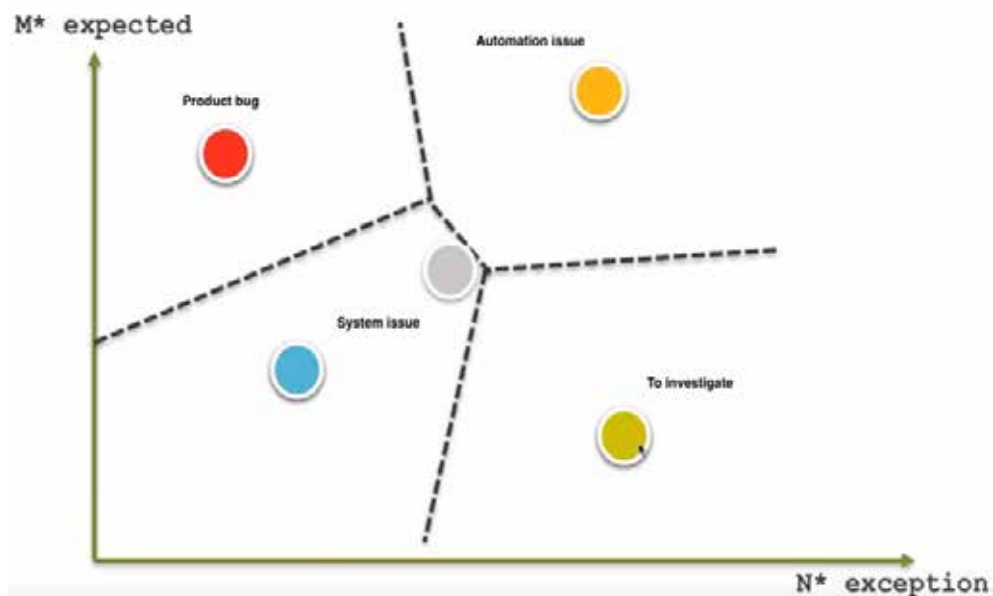


Fig. 3. Two-dimensional clustering of test results

document and how important it is in categorizing a particular type of document.

We have all of these words that belong to different categories of errors, such as Product Bug, System Issue, or Automation Issue, and this categorization will be done by a person at the beginning so that machine learning understands this document, that is, this stature, refers to specific reason for the “failure” of the test.

This information will be presented in vector form. Analyzing text with machine learning algorithms means converting all this large text into a mathematical vector and this vector will be located in a multidimensional space where each space will refer to a specific word.

Software implementation of the proposed method

The developed software system enables:

- GitHub sign-up and sign-in;
- view real-time test execution;
- automatic clustering of test results;
- specify categories and subcategories for failed tests;
- save up to 10 test runs;
- merge multiple launches into one;
- attach images, pieces of code to a specific test result;
- edit failed test categories and subcategories;
- filter test results by categories and subcategories;
- add, modify, delete a description of the test results;
- adjust parameters for auto-analysis;
- display the results graphically.

The architecture of the software system is implemented in the form of microservices. The whole

system is divided into client and server parts. The client part includes services such as Logger, Agent, Client. Client are API integrations. HTTP clients that process HTTP request sending. Agent is a framework integration. Special reporters / listeners who monitor test events and cause events to be transmitted through the client. Logger is an integration of logs that helps to collect logs, associate it with a test code through an agent, and send it to a server through a client.

Gateway is the main point of entry for application services. This service is responsible for routing requests for proper maintenance and load balancing. The gateway contacts the service registry to get a list of the actual services that are allowed to route traffic.

Registry is a tool that stores the actual list of running services with added meta information. It checks the status of each running service to ensure availability.

The API is responsible for handling agent inbound requests and the user interface.

Authorization is a module that authorizes users and creates / revokes user tokens. It supports various types of authentication mechanisms:

- Basic Auth;
- GitHub Auth (OAuth2);
- LDAP Auth.

LDAP Auth is an OAuth2 server that authorizes the user using the mechanisms mentioned below and creates an OAuth2 internal token that is used by the user interface and the agent agent. There are two types of tokens:

- UI (ending token);
- API is an endless token designed for use on the agent side.

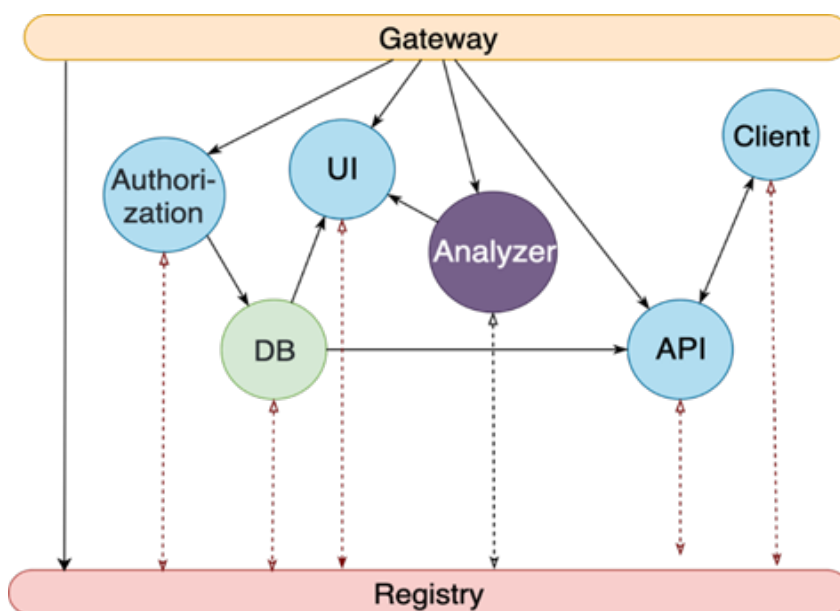


Fig. 4. Architecture of software

Table 1

Accuracy comparison of clustering methods

The number of “failed” tests	KNN	Support Vector Machines method	Naive Bayes method
100	0.7483	0.7948	0.8126
200	0.8347	0.8589	0.7650
500	0.9078	0.8451	0.7607
1000	0.9820	0.9241	0.7520

The Analyzer stores an index of the project’s user logs and provides the ability to search for that index and used by the automatic analysis function.

UI is the service responsible for the client-side system. DB is the service responsible for the system database. The developed software system works with Java programming language and framework for automation of JUnit testing. Developed system allows using integration with bug-tracking systems such as Jira, Trello, Bugzilla, Airbrake, ZenHub. The system has the following structure of test organization levels: Launch – Test Suite – Test Case – Test step. Launch contains all test kits that were run on startup. Test Suite is a set of test cases that are combined in that they relate to one test module, functionality, priority, or one type of test. Each test suite consists of more than one test case and is often performed with a whole “bundle” in the process of testing. Test Case formally describes algorithm for testing a program, specially designed to determine the occurrence of a specific situation in a program, certain source data. Test Step describe the steps to play the bug. The steps are recommended to minimize, find the shortest way to reproduce the error and describe in the steps, it is important that they remain as clear as possible to developers. The system allows to combine multiple launches into one. If a project has a large number of test kits, they are split into parts because they cannot be in one particular startup. Once completed, they can be combined into a single startup to represent

this data in dashboards and generate reports. Two types of mergers are implemented: Linear and Deep. If the user selects Line Merger, a new start is created. The new startup contains elements of the startup merge. The element levels remain the same as in the beginner startup. Statistics is calculated as the sum of the statistics of all merged launches. Initial launches are removed from the system.

Conclusions. The main feature of researched method comparison was accuracy and to reduce time and human resources for analyzing the results of software testing. The results of the comparison of these methods can be seen in Table 1. As can be seen from the table, the KNN method slightly “loses” in the accuracy of the method of Support Vector Machines on small on-fringes by an average of 3–6%, but on the sets the 500-1000 KNN algorithm shows 6–10% better results than the reference vector method and 23–26% better results than Naive Bayes method. A comparison is made with manual analysis of “failed” tests and using machine learning methods on a real project. The analysis of 150 tests was started, the algorithm coped with this task in about 20 minutes, and failed to automatically recognize only 9 tests, while it took the person about 4 hours to read all the errors and attribute them to categories. Thus, KNN algorithm coped with this task 12 times faster than humans.

The article compares the results of clustering methods of KNN, Support Vector, and Naive Bayes to automatically analyze software test results for 100, 200, 500, and 1000 failed tests. The automatic analysis of results is compared with the manual one. When studying the results of comparing automatic error analysis of software with 1000 failed tests, KNN method shows an accuracy of 0.982, which is the most accurate result among the clustering methods considered. When analyzing 150 failed tests, the algorithm showed a result 12 times faster than manual analysis. Thus, it is shown that the proposed software method is effective.

References:

1. Jain, A., Dubes, R. Algorithms for Clustering Data. Prentice Hall, IGI Global, 2012. Pp. 43–62.
2. Kaufman, L., Rousseeuw, P. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. MA: MIT Press, 2007. Pp. 215–266.
3. Bradley, P., Mangasarian, O., Street, W. Clustering via Concave Minimization. Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 9. MA: MIT Press, 1997. Pp. 368–374.
4. Jain, A., Dubes, R. Algorithms for Clustering Data. Prentice Hall, IGI Global, 2012, pp. 43–62.
5. Java stack trace, understanding and using for debug. URL: <https://www.scalyr.com/blog/java-stack-trace-understanding/>

**Олещенко Л.М., Лисенко О.О. ПРОГРАМНИЙ МЕТОД КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ЗВІТІВ
ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМУ KNN**

Стаття присвячена розробці та впровадженню програмного методу для аналізу результатів тестування програмного забезпечення з використанням алгоритму KNN. Розробники програмного забезпечення намагаються уникати ручного тестування програмного забезпечення, щоб зменшити ризик людських факторів та витрати на тестування. Середній час аналізу помилок після тестування для 500 «невдалих» тестів може становити до 24 годин. IT-компанії потребують автоматизації аналізу помилок після тестування програмного забезпечення, щоб забезпечити замовнику повну картину того, що відбувається в проєкті, з детальним описом того, що вже працює і потребує доопрацювання. Це зробити дуже важко вручну, особливо коли проєкт дуже великий і проходить більше тисячі тестів. Є необхідність розробити програмну систему для автоматизованого аналізу результатів тестування програмного забезпечення, що скоротить час аналізу помилок і дасть змогу переглянути статус тестів у режимі реального часу. Проаналізовано наявні методи машинного навчання, які можна використовувати для аналізу результатів тестування програмного забезпечення. Обґрунтовано вибір найбільш відповідного методу машинного навчання для цього завдання, а саме *k-nearest neighbors* (KNN). На базі KNN створено вебдодаток для автоматичного аналізу результатів тестування програмного забезпечення. Архітектура програмної системи реалізована у вигляді мікросервісів. Основна ідея запропонованого методу полягає в тому, що *stack trace* використовується як дані для кластеризації, ця частина містить інформацію про причину «падіння» тесту. Запропонований метод дає змогу автоматизувати процес аналізу помилок, скорочуючи час і кількість людських ресурсів, необхідних для аналізу результатів тестування програмного забезпечення. У статті зіставлені результати методів кластеризації KNN, *Support Vector* та *Naive Bayes* для автоматичного аналізу результатів тестування програмного забезпечення для 100, 200, 500 та 1000 невдалих тестів. Автоматичний аналіз результатів порівнюється з ручним. У процесі вивчення результатів порівняння автоматичного аналізу помилок програмного забезпечення з 1000 невдалих тестів метод KNN показує точність 0,982, що є найбільш точним результатом серед розглянутих методів кластеризації. У процесі аналізу 150 невдалих тестів із використанням методу KNN отримано результат у 12 разів швидше, ніж із використанням ручного аналізу.

Ключові слова: тестування програмного забезпечення, методи машинного навчання, *test case*, *stack trace*, кластеризація, алгоритм KNN, *Elasticsearch*, *TF*, *IDF*.

Поперешняк С.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ЗАСІБ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ БІТОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ НА ВИПАДКОВІСТЬ

У статті наведено короткий огляд відомих методів тестування послідовностей на випадковості, а також статичних тестів, розроблених протягом останніх десятиліть, які широко використовуються у криптографічних системах захисту інформації для виготовлення ключової та додаткової інформації. Розглянуто перспективний напрям дослідження – статичне тестування послідовностей із використанням багатовимірної статистики. У роботі наведені формули для тестування випадкових бітових послідовностей на випадковості з використанням двовимірної або тривимірної статистики, яка може бути застосована для тестування коротких і середніх послідовностей.

Підхід до тестування з використанням багатовимірної статистики дає змогу покладатися на глибше обґрунтування випадковості згенерованих послідовностей. Перевагою тестування за допомогою багатовимірних статистичних даних є також можливість високого ступеня паралелізму в обчисленні сімейства статистики. Ця область є перспективною для досліджень, особливо для послідовностей короткої та середньої довжини, де одновимірні статистичні дані часто безсилі.

У роботі наведено методику тестування псевдовипадкової послідовності та отримано явний вид спільного розподілу чисел 2-ланцюжків і чисел 3-ланцюжків різних варіантів у випадковій бітовій послідовності заданої невеликої довжини.

Для реалізації запропонованої методики було розроблено програмний засіб для тестування бітової послідовності на випадковість. Цей засіб включає тести NIST, а також тести з використанням багатовимірної статистики, які добре себе зарекомендували під час тестування псевдовипадкової послідовності невеликої довжини. У результаті подальшого розвитку буде розширена та створена єдина інформаційна система, яка дасть змогу проаналізувати бітову послідовність, використовуючи відомі тести або/та тести з використанням багатовимірної статистики, та вибирати якісну псевдовипадкову послідовність для використання в тій чи іншій предметній області.

Ключові слова: програмний засіб, бітова послідовність, тестування, багатовимірні статистики; випадкові послідовності; псевдовипадкова послідовність; статистичне тестування.

Постановка проблеми. Використання випадкових чисел завжди мало своє місце в діяльності людини, але набуло поширення завдяки розвитку інформаційних технологій. Випадкові числа лежать в основі таких напрямів, як криптографія, програмування, симуляція, ігрові системи тощо. Завданням що покладають на випадкові числа, найчастіше є забезпечення незалежності однієї процедури в системі від іншої. Таким чином можна забезпечити непередбачуваність криптографічних ключів, механізми випадковості в комп'ютерних іграх та оптимізацію математичних та програмних методів, наприклад, метод Монте-Карло.

Випадковість є частиною реального світу, яку ми можемо спостерігати в будь-який момент часу, але для роботи реальної системи необхідно отримати випадкові числа штучним чином і в необхідних обсягах.

Якість випадкової послідовності, або «дійсна випадковість», є її ключовою характеристикою, адже в більшості областей застосування саме від

цього фактора залежить корисний ефект. Щоб виміряти випадковість, використовують набори відповідних статистичних тестів. Їх результати вказують на характеристики, за допомогою яких можна зробити висновки про випадковість: лінійна залежність між частинами послідовності, періодичні властивості, здатність до компресії, тощо.

У таблиці 1 наведено найвідоміші набори тестів для перевірки бітових послідовностей. Варто зауважити, що деякі з методів випробувань у наборах збігаються, адже вони всі мають одне математичне підґрунтя.

Розглянуті пакети статистичних тестів мають солідне математичне підґрунтя і готову програмну реалізацію. Будь-який із них можна використати для оцінки послідовності або генератора і мати високий рівень впевненості в якості результатів. Однак в екосистемі статистичних тестів на випадковість можна виділити такі тренди:

Таблиця 1

Огляд найвідоміших тестів для перевірки ГПЧ

NIST Statistical Test Suite	Тести Diehard	TestU01
NIST STS – специфікація та відповідна бібліотека мовою С, що були випущені Інститутом Стандартів та Технологій США. Пакет складається з 15 тестів для аналізу бітових послідовностей, що були згенеровані ГПЧ або АГВЧ. Повний опис тестів доступний в роботі “A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications” [1].	Батарея статистичних тестів, призначена для виміру якості ГПЧ та АГВЧ, що була створена Дж. Марсали у 1995 році. В основі більшості тестів лежить використання генератора для побудови послідовності відповідно до наданої специфікації і порівняння її характеристик з очікуваними від випадкової. Деякі з наведених випробувань можна виділити в групи за подібністю, а інші являють собою один тест. Більше інформації про тести можна знайти в джерелах [2; 3].	Об’ємна бібліотека тестів мовою С, що включає реалізацію ГПЧ, тести та батареї тестів. Всі випробування, що надаються, поділені на групи відповідно до модулів програми [4]:
<ul style="list-style-type: none"> – Частотний тест – Частотний тест у блоці – Тест на подібні послідовності – Тест на найбільшу послідовність одиниць у блоці – Тест рангів бінарних матриць – Спектральний тест – Тести на шаблони, що перетинаються/не перетинаються – Універсальний тест Маурера – Тест на лінійну складність – Тест на послідовності та тест на близьку ентропію – Тест кумулятивних сум – Тест на довільні виключення – Тест на довільні виключення з варіантом 	<ul style="list-style-type: none"> – Тест днів народжень – Тест перестановок довжини 5, що перетинаються – Тести мавп – Тести на підрахунок одиниць – «Тест паркінгу» – Тест на мінімальну відстань – Тест випадкових сфер – Тест на стиснення – Тест сум, що перетинаються – Тест на подібні послідовності – Тест «Крепс» 	<ul style="list-style-type: none"> – smultin – sentrop – snpair – sknuth – smarsa – svaria – swalk – scomp – spectral – sstring – sspacings

– наявна велика кількість різних тестів та пакетів, що часто підходять до вирішення задачі з різних сторін;

– відсутні чіткі лідери, тобто тести, які можна рекомендувати для вирішення більшості проблем;

– неможливо отримати точний висновок про випадковість послідовності навіть після виконання всіх можливих тестів;

– майже всі окремі пакети та тести мають деякі обмеження або недоліки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підбірка 14 тестів «Diehard» Дж. Марсали була першою в комплексному тестуванні генераторів псевдовипадкових послідовностей (ПВП). Підбірка розглядається як одна з найбільш суворих сукупностей тестів, вона реалізована програмно і доступна в інтернеті [5]. Однак підбірка тестів «Diehard» має низку недоліків.

1) відсутні докладний опис тестів і методика трактування результатів [6];

2) параметри тестування жорстко задані. При цьому незалежно від довжини ПВП, що тестується, аналізується тільки певне число байтів [6]. Більш короткі ПВП протестувати неможливо;

3) більшість тестів є наближеними і засновані на результатах випробувань, а не на теоретичних моделях [6];

4) рішення про проходження тесту може приймати тільки одне з двох значень (так/ні).

Підбірка тестів ПВП Д. Кнута використовує сім оригінальних статистик і алгоритмів їх підрахунку. Однак ця добірка має низку недоліків.

1) всі алгоритми зводяться до обчислення статистичних критеріїв, апроксимується тільки розподілом χ^2 ;

2) відсутні рекомендації про параметри тестування. Некоректний вибір деяких значень може привести до істотної залежності від довжини послідовності, що тестується, а також негативно позначитися на потужності статистичного критерію [6];

3) спірної видається [6] методика оцінки результатів, коли випадковими визнаються послідовності, для яких P-value належить інтервалу (0,1; 0,9). Тобто коли P-value більше, ніж 0,9, результати тестування вважаються занадто ідеальними, щоб вважати числову послідовність випадковою;

4) відсутня оригінальна програмна реалізація запропонованих тестів.

У роботі [7] пропонується набір тестів для попередньої перевірки якості випадкових чисел і послідовностей на основі семи різних статистичних тестів.

М. Кендел і Б. Сміт [8] запропонували використовувати 4 тести із застосуванням критерію χ^2 :

1) перевірка частоти різних цифр x_1, x_2, \dots, x_N в таблиці (тест частот);

2) перевірка частоти різних двозначних чисел серед пар цифр $x_1 x_2, x_2 x_3, x_3 x_4, \dots, x_{N-1} x_N$ (тест пар);

3) перевірка частоти різних інтервалів між двома послідовними нулями (тест інтервалів);

4) перевірка частоти різних типів четвірок (aaaa, aaab, aabc, aabb, abcd), а також перевірка частоти різних типів п'ятірок (покетест).

Стандарт NIST STS 800-22 Національного інституту стандартизації і технологій NIST [1; 6] включає 15 тестів і орієнтований на тестування бітових послідовностей, що застосовуються в задачах криптографічного захисту інформації.

Типове застосування тестів (зокрема, Diehard) наводиться, наприклад, у доповіді "The RAND Corporation. A Million Random Digits with 100 000 Normal Deviates" [9].

У разі збільшення довжини ПВП, що тестується (понад 100 тис.), багато статистичних тестів виявляють статистично значущі закономірності, які не виявлялися на вибірках меншого обсягу. Так, наприклад, знаковий ранговий критерій (signed rank test, Вілкоксона), який є досить потужним [8], бракує такі відомі і якісні генератори, як Блюма-Блюма-Шуба (BBS), Шаміра (RSA), «Marsaglia Multicarry» і «Xorshift» Дж. Марсали, вихор Мерсенна (MT19937), а також «істинно випадкову послідовність» [10] вже на 1500–2000 елементів числової послідовності.

Як показав огляд популярних методів тестування бітових послідовностей на випадковість, незважаючи на велику кількість статистичних тестів, вони дають більш коректний результат при досить великому розмірі вибірки. Однак ми не зможемо отримати коректну відповідь із приводу випадковості послідовності, якщо довжина послідовності буде менше 100 елементів.

Розробка пакетів для дослідження випадкових чисел без програмного забезпечення є доволі сумнівною роботою, адже область застосування повністю складається з інформаційних технологій.

Постановка завдання. Метою роботи є покращення наявних та впровадження нових методів

тестування бітової послідовності на випадковість. Це включає розробку формального опису статистичних тестів та реалізацію відповідних програмних продуктів.

Досягнення мети включало виконання таких задач:

– огляд математичного підґрунтя та принципів тестування послідовностей на випадковість;

– аналіз наявних пакетів тестів;

– формальний опис методів, заснованих на багатовимірних статистиках, і обґрунтування їх ефективності для перевірки коротких послідовностей;

– створення пакету рекомендованих методів для тестування послідовностей на випадковість;

– реалізація комплексу програм для проведення тестувань бітових послідовностей.

Мета роботи – формальна та програмна реалізація тестів NIST та методів тестування, заснованих на використанні багатовимірних статистик.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Специфіка тестів описаних пакетів є такою, що на основі вхідної послідовності бітів визначається статистика, яка або є результатом, або використовується для його пошуку. Цей підхід враховує тільки одну характеристику послідовності при одному випробуванні.

У роботі запропоновано новий підхід до тестування бітової послідовності – тестування на основі багатовимірних статистик. Багатовимірні статистики орієнтовані на кілька властивостей, що дає змогу точніше оцінити коротку послідовність, але є недоліки в тестуванні довгої через надмірну кількість варіантів комбінацій статистик.

Тестування бітових послідовностей на основі багатовимірних статистик

Генератори випадкових чисел мають тенденцію до створення великої кількості повторюваних шаблонів [1]. Тести багатовимірних статистик також показують більш ефективні результати в перевірці шаблонів завдяки оцінці кількох статистик одночасно.

Методи, що представлені в роботі, засновані на дослідженні кількості входжень дво- та трибітових шаблонів у послідовність бітів. Тести на основі багатовимірних статистик у результаті виконання надають спільну вірогідність відповідної кількості шаблонів у послідовності заданої довжини. Той самий результат можна отримати за допомогою емпіричного підрахунку. Припустимо, що виконується розрахунок спільної вірогідності для всіх можливих значень $k_1 = \eta(00)$, $k_2 = \eta(111)$ та послідовності довжиною 3. Кількості входжень k_1 та k_2 до послідовності наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Поява шаблонів у послідовності довжиною 3

Послідовність	k_1	k_2
000	2	0
001	1	0
010	0	0
011	0	0
100	1	0
101	0	0
110	0	0
111	0	1

Підрахувавши кількість появи для всіх можливих комбінацій k_1 та k_2 , можна знайти відповідні вірогідності (табл. 3).

Таблиця 3

Входження шаблонів у послідовність довжиною 3

k_1	k_2	Кількість	Вірогідність
2	0	1	0,125
1	0	2	0,25
0	0	4	0,5
0	1	1	0,125

Емпіричним методом знайдено спільну вірогідність для заданої довжини і всіх можливих значень k_i , $i = 1, 2$. Цей підхід є доволі простим і наглядно показує, для чого використовуються методи багатовимірних статистик, але не є ефективним (кількість послідовностей які необхідно перевірити при довжині 32 – 2³²). Випробування, побудовані на формулах спільної вірогідності, є більш доцільними як у математичному сенсі, так і в програмному.

Тести багатовимірних статистик відрізняються тільки шаблонами, на яких перевіряється послідовність. Кожен метод отримує на вхід випадкову величину:

$$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n, \quad (1)$$

де $\gamma_i \in \{0, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $n > 0$.

Для цієї величини визначається кількість специфічних шаблонів k_1 , k_2 та k_3 (якщо це визначено методом) і виконується обчислення за допомогою формули, специфічної для методу.

Розглянемо, наприклад, кілька тестів з набору «багатовимірних статистик».

Перший тест виконується, щоб знайти спільну вірогідність появи подій $k_1 = \eta(tt^*)$ та $k_2 = \eta(t1t^*) + \eta(t0t^*)$, при $t \in \{0, 1\}$, $t^* = 1 - t$:

$$P\{\eta(tt^*) = k_1, \eta(t1t^*) + \eta(t0t^*) = k_2\} = \sum_{m_1=k_1}^{n-k_1} p^{m_1} q^{m_0} \sum_{i=0}^1 \prod_{k_1}^{\delta_i} C_{m_1-k_1}^{k_1-\delta_i}, \quad (2)$$

де n – довжина бітової послідовності, p – вірогідність появи t , q – вірогідність появи t^* ($q = 1 - p$), $m_0 = n - m_1$, \sum – сума за всіма комбінаціями δ_0 та δ_1 , так, що: $\delta_0 + \delta_1 = 2k_1 + k_2$.

Другий метод тестування знаходить спільну вірогідність появи подій $k_1 = \eta(tt^*)$ та $k_2 = \eta(ttt^*)$:

$$P\{\eta(tt^*) = k_1, \eta(ttt^*) = k_2\} = \sum_{m_1=k_1}^{n-k_1} p^{m_1} q^{m_0} C_{k_1}^{k_2} C_{m_1-k_1}^{k_2} C_{m_0}^{k_1}. \quad (3)$$

Третій метод оцінює вірогідність появи шаблонів $k_1 = \eta(tt^*)$, $k_2 = \eta(t1t^*)$ та $k_3 = \eta(t0t^*)$:

$$P\{\eta(tt^*) = k_1, \eta(t1t^*) = k_2, \eta(t0t^*) = k_3\} = \sum_{m_1=k_1}^{n-k_1} p^{m_1} q^{m_0} C_{k_1}^{k_2} C_{k_1}^{k_3} C_{m_1-k_1}^{k_2} C_{m_0-k_1}^{k_3}, \quad (4)$$

За допомогою четвертого методу можна визначити вірогідність подій $k_1 = \eta(tt^*)$ та $k_2 = \eta(ttt)$:

$$i \{ \eta(tt^*) = k_1, \bar{\eta}(ttt) = k_2 \} = \sum_{m_1=k_1}^{n-k_1} p^{m_1} q^{m_0} C_{m_0}^{k_1} \times \sum_{i \in \{k_1, k_1+1\}} C_i^{m_1-k_2-i} - (m_1 - i, \bar{m}_1 - i - k_2) \quad (5)$$

$$\text{де } -(a, b) = \begin{cases} C_{a-1}^{b-1}, \text{ якщо } a \geq b \geq 0; \\ 1, \text{ якщо } a = b = 0; \\ 0, \text{ в іншому випадку} \end{cases}$$

Проектування і розробка

Бібліотека статистичних методів

Згідно зі специфікацією NIST [1] та описаних методів багатовимірних статистик [11–13] створено бібліотеку, що надає користувачам два інтерфейси для виконання відповідних статистичних тестів мовою програмування Java. Бібліотека складається з трьох пакетів, зміст яких подано в табл. 4.

Інтерфейси для виклику методів є реалізаціями шаблону проектування «фасад» – вони групують окремі методи в один клас для уніфікації виклику методів та легкості використання. Спрощену діаграму класів для пакету NIST зображено на рис. 1. Головним інтерфейсом і «фасадом» є клас «NistTest», що одночасно виконує перенаправлення викликів до відповідних класів і перевірку вхідних параметрів за допомогою класу «Validator».

Пакети бібліотеки

Пакет	Зміст та опис пакета
nisttest	15 класів із тестами NIST, головний клас для виклику тестів
mdtest	8 класів із тестами, заснованими на багатовимірних статистиках, головний клас для виклику тестів
util	Допоміжні класи, що включають: методи перевірки вхідних параметрів тестів; допоміжні методи для роботи з шаблонами і матрицями; функції erf, Gamma та нормального розподілу; алгоритми дискретної трансформації Фур'є і Берлекампа-Мессі та інші допоміжні функції, що використовуються в обох пакетах тестів

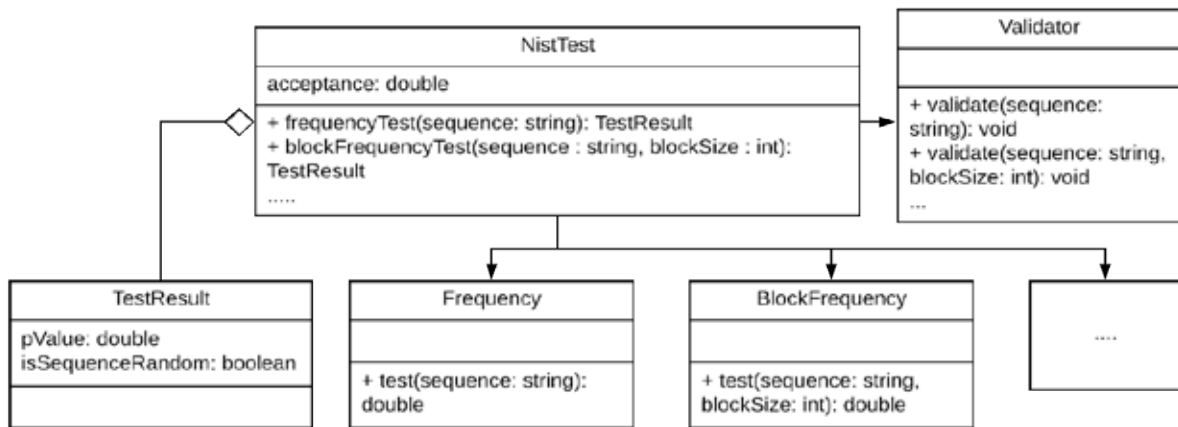


Рис. 1. Спрощена діаграма класів для тестів NIST

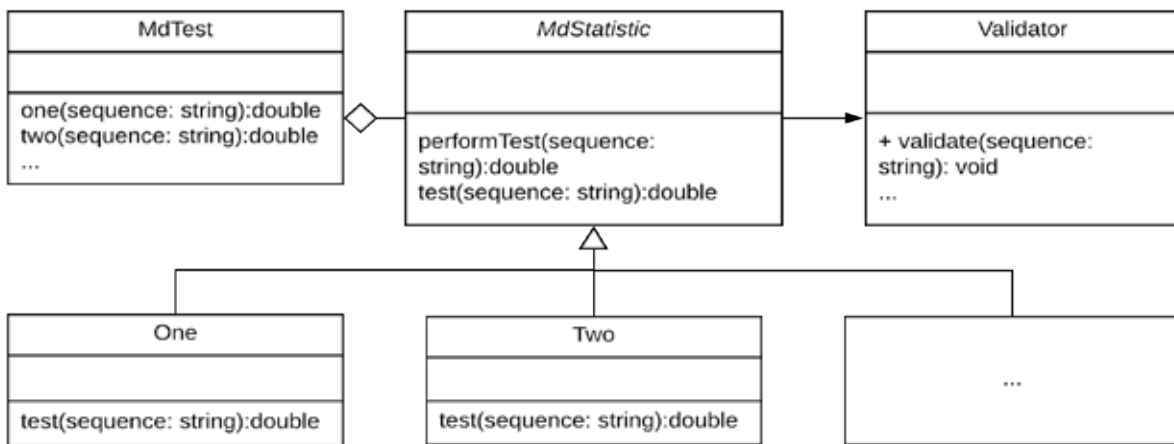


Рис. 2. Спрощена діаграма класів для тестів багатовимірних статистик

Результатом і значенням, що повертає тест, є об'єкт класу «TestResult» або список таких об'єктів, коли проводиться кілька тестів в одному методі. Кожен з окремих класів статистичних методів (наприклад, «Frequency»), використовує хоча б один клас із пакета «util» у своїй реалізації.

Окрім «фасаду», класи тестів багатовимірних статистик використовують шаблон «Шаблонний метод» для перевірки вхідних параметрів (рис. 2).

Клас «MdStatistic» містить один абстрактний метод та один звичайний, а підкласи виконують

визначення абстракції. При виклику однієї функції виконання передається іншій реалізованій нащадком. Кожен із тестів використовує засоби роботи з шаблонами класу «TemplateUtils» та біноміальний розподіл або функцію Z (формула 5) з класу «FunctionUtils». Повна діаграма класів не наведена через її громіздкість.

Сервер і прикладний програмний інтерфейс

Сервер програми виконує обробку вхідних HTTP запитів (диспетчеризацію, зчитування даних із формату JSON і передачу відповідним

статистичним тестам) і створення відповідей (створення повідомлень про помилку, перетворення об'єктів на JSON, відправка відповіді). Пакетна структура сервера подана в табл. 5.

Для всіх тестів із бібліотеки було створено чотири адреси виконання статистичних тестів (табл. 6).

Під час надходження запиту виконується перевірка наявності обробника на сервері і, якщо його знайдено, запит передається відповідному контролеру, який своєю чергою викликає сервіс,

що визначено в методі. Імена тестів, які необхідно виконати, визначені параметрами URL або тілом запиту. Щоб вибрати відповідний метод, у програмі створено два класи – «NistFactory» та «MdFactory». Вони реалізують шаблони проектування «Фабрика» і «Шаблонний метод» за допомогою перелічуваного типу. Архітектуру основних компонентів модуля показано на рис. 3.

Щоб забезпечити відповідний рівень параметрів надійності та живучості серверу, створено клас «ErrorHandler», який виконує перехоплення

Таблиця 5

Пакети сервера

Пакет	Зміст та опис пакета
controller	Класи «NistController» та «MdController», що визначають URL та HTTP методи, доступні на сервері і викликають відповідні методи їх обробки
service	Інтерфейси і класи, що забезпечують виконання бізнес-логіки сервера
util	Допоміжні класи, що включають конвертери перелічуваних типів даних, обробник помилкових запитів, класи для виконання методів із бібліотеки статистичних тестів

Таблиця 6

HTTP методи і адреси, доступні на сервері

Метод	Відносна адреса	Опис функціональності
POST	/nist_test/{testName}	Параметр {testName} визначає статистичний тест, який буде виконано, наприклад «/nist_test/binaryMatrix». За цими адресами виконується тільки один тест, який потребує правильних параметрів у тілі запиту
	/md_test/{testName}	
POST	/nist_test	Виконуються всі тести NIST, JSON-об'єкти з параметрами яких наявні в тілі запиту
	/md_test?tests=[testName1, testName2...]	Виконуються всі тести багатовимірних статистик, імена яких наявні в параметрах запиту для послідовності з тіла запиту

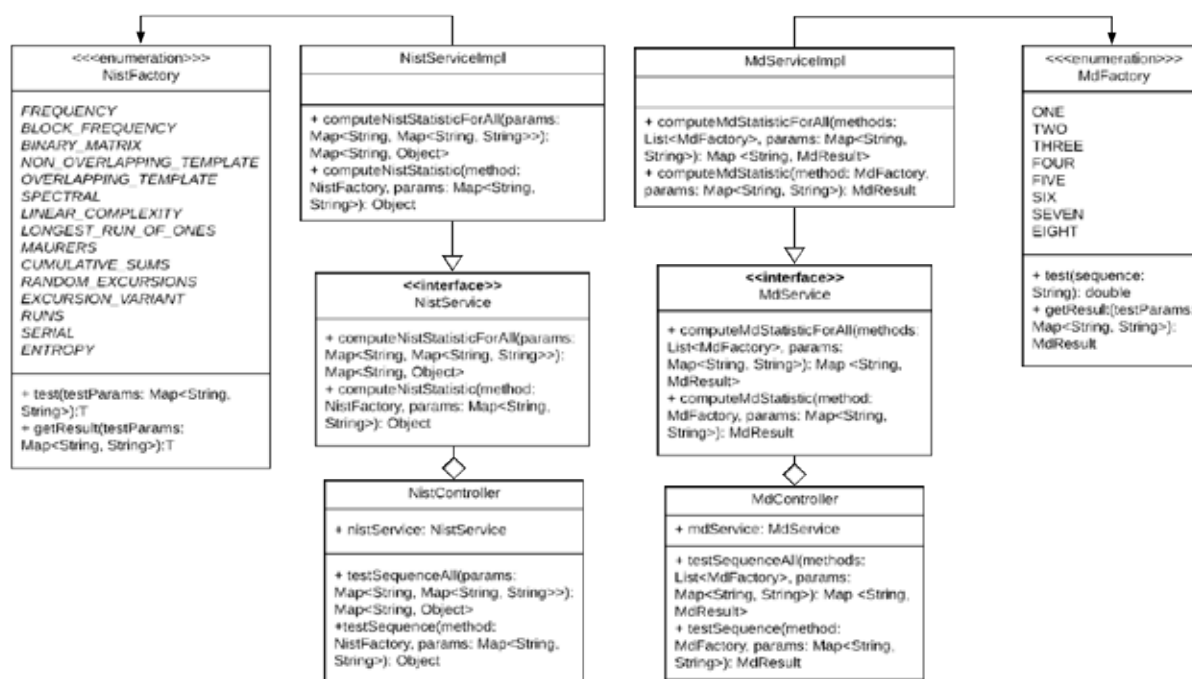


Рис. 3. Діаграма класів для основних модулів сервера

визначених виключень під час виконання запиту. Клас «ErrorEntity», що є контейнером для параметрів помилки, стандартизує вигляд і зміст повідомлень. У разі виникнення виключних ситуацій повертається HTTP код, що відповідає їх змісту, його розшифровка, текстове повідомлення, поточний час та URL. У випадку успішного виконання запиту повертається тіло з результатами тесту та код 200 (OK).

Створений сервер забезпечує прийом запитів, відправку відповідей, передачу вхідних параметрів відповідним статистичним тестам і обробку всіх можливих помилкових ситуацій.

Опис засобу

Метою вебдодатку є забезпечити користувачів можливістю тестування бітових послідовностей на випадковість за допомогою графічного інтерфейсу. Він має забезпечити високий рівень зручності використання: надавати свободу дій, врахувати можливість помилок, повідомляти інформацію про стан системи та містити довідкові матеріали.

Основний функціонал, який має забезпечувати додаток, подано на діаграмі варіантів використання (рис. 4). Відповідно до діаграми, між задачами, що виконує вебдодаток, та задачами сервера є чіткий розподіл. Перший працює незалежно більшу частину часу і викликає другого, тільки коли не може виконати поставлену задачу самостійно.

Компоненти розроблюваного засобу можна умовно поділити на кілька груп:

- компоненти тестів NIST визначають елементи форми введення даних, адресу для прикладного інтерфейсу, довідковий матеріал до тестів і засоби перевірки вхідних параметрів;
- компоненти багатовимірних статистик визначають адресу для отримання даних із сервера та довідковий матеріал;
- компоненти форм групують спільні характеристики методів для того, щоб прибрати повторюваність коду. Забезпечують перевірку і форматування параметрів за визначеними методами, реалізують створення, відправку та обробку відповіді HTTP запиту;
- компоненти меню визначають адреси, за якими знаходяться всі сторінки, забезпечують відображення посилань на сторінках і правильний перехід за ними;
- компоненти графіків забезпечують побудову графіків відповідно до результатів тестування послідовності;
- допоміжні компоненти підтримують уніфіковану структуру результатів тестування та логіку переходу за посиланнями;
- валідатор об'єднує логіку перевірки вхідних параметрів, щоб знизити повторюваність коду;
- стилі CSS визначають зовнішній вигляд сторінок.

Вебдодаток

У процесі переходу на сайт із пошукової системи користувача буде направлено на головну сторінку (рис. 5).

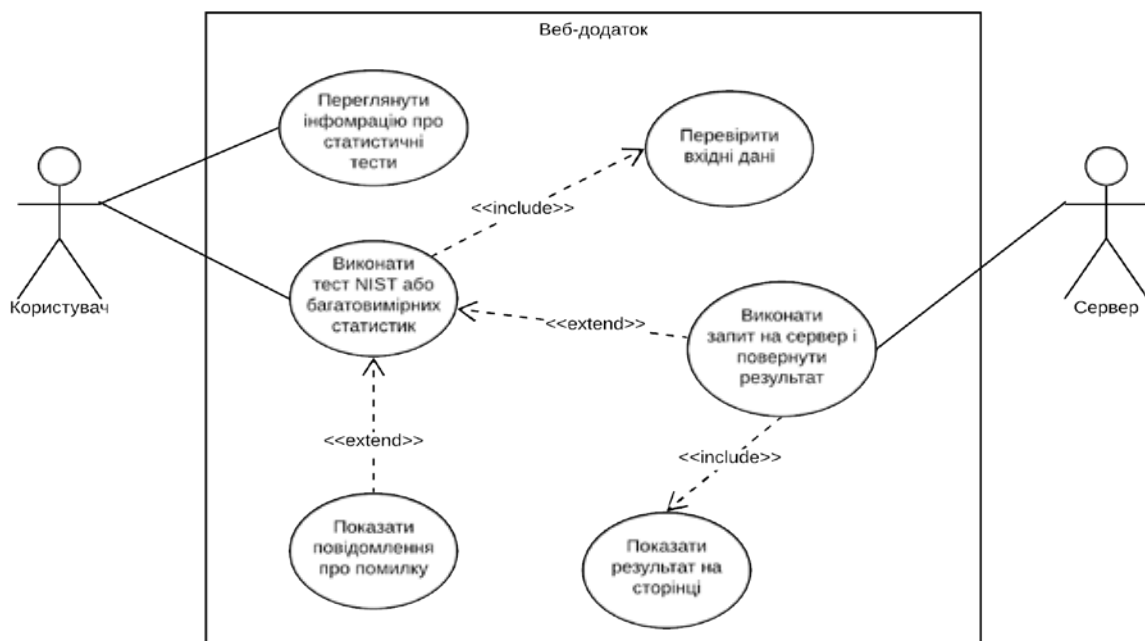


Рис. 4. Діаграма варіантів використання



Рис. 5. Головна сторінка

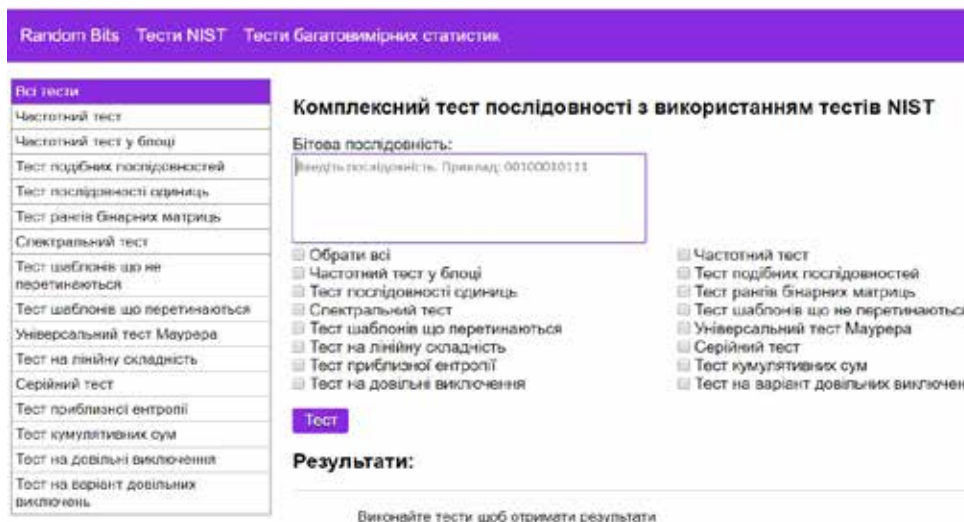


Рис. 6. Сторінка NIST

Головна сторінка надає довідкову інформацію про зміст вебдодатку та корисні посилання. Використавши верхню навігаційну панель, можна перейти на сторінки, що відповідають тестам NIST (рис. 6) та багатовимірним статистикам.

За замовчуванням відкриваються комплексні тести, тобто для одночасного виконання кількох методів.

Кожна форма містить елементи управління «Checkbox» для вибору окремих тестів та вибору/зняття всіх одночасно. У текстові поля вводиться послідовність бітів.

Бокові панелі на обох сторінках містять меню, в якому можна вибрати один із тестів.

Висновки. Тестування бітової послідовності не є новою проблемою. Нині є велика кількість пакетів тестів, що вирішують цю задачу. Однак специфіка екосистеми тестування та проблеми

наявних методів вказують на необхідність покращення підходів.

Тести багатовимірних статистик дають змогу краще дослідити послідовність шляхом використання одночасно кількох характеристик послідовності. Вони засновані на дослідженні шаблонів довжин 2 та 3 і допомагають виявляти приховані залежності між даними та неякісні генератори. Головною перевагою тестів є їх ефективність на послідовностях короткої довжини.

Пакет програм надає кілька можливих рівнів використання залежно від вимог користувача і складається з:

- бібліотеки мовою Java, що включає 15 тестів NIST та 8 тестів багатовимірних статистик;
- прикладний програмний інтерфейс, що дає змогу використовувати тести за допомогою HTTP запитів;

– вебдодаток, який може бути використано для тестування послідовностей через браузер.

Пакет тестів рекомендовано до використання в процесі дослідження послідовностей на випадковість. Вони можуть бути застосовані в одній з областей:

– наукові дослідження – встановлення залежності між будь-якими експериментальними даними, розробка ГПЧ та АГВЧ, ство-

рення нових методів перевірки послідовності на випадковість;

– криптографія – перевірка послідовностей згенерованих ГПЧ та АГВЧ, дослідження алгоритмів шифрування;

– розроблення та супровід програмних продуктів – тестування ефективності алгоритмів та систем, заснованих на випадковості, перевірка криптографічних засобів системи.

Список літератури:

1. Rukhin A. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. *National Institute of Standards and Technology*. 2010. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-22r1a.pdf>.
2. DIEHARD Statistical Tests. URL: <https://stat.fsu.edu/pub/diehard/>.
3. Diehard tests. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Diehard_tests.
4. TestU01: A software library in ANSI C for empirical testing of random number generators. *Department d'Informatique et de Recherche Operationnelle, University of Montreal*. 2013. URL: <http://simul.iro.umontreal.ca/testu01/guideshor ttestu01.pdf>.
5. Иванов М.А., Чугунков И.В. Теория, применение и оценка качества генераторов псевдослучайных последовательностей. Москва : Кудиц-образ, 2003. 240 с.
6. Акимова Г.П., Пашкина Е.В., Соловьев А.В. Методологический подход к оценке качества случайных чисел и последовательностей. *Труды ИСА РАН*. 2008. Т. 38. С. 156–167.
7. Кнут Д. Искусство программирования. Т. 2. Получисленные алгоритмы. Москва, 2000. 832 с.
8. Лагутин М.Б. Наглядная математическая статистика : учеб. пособие. 5-е изд. (эл.). Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 475 с. URL: <https://rucont.ru/efd/321098>
9. The RAND Corporation. A Million Random Digits with 100 000 Normal Deviates. Free Press, N.Y. 1966.
10. Гайдышев И.П. Программное обеспечение анализа данных AtteStat. Руководство пользователя. Версия 13. 2012. 505 с.
11. Svitlana Popereshnyak, Georgi P. Dimitrov The Testing of Pseudorandom Sequences using Multidimensional Statistics Proceedings of the 1st International Workshop on Digital Content & Smart Multimedia (DCSMart 2019) Lviv, Ukraine, December 23–25, 2019. P. 151–161
12. Masol V.I., Popereshnyak S.V. Statistical analysis of local sections of bits sequences. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2019. Vol. 51. P. 31–45. DOI: 10.1615/JAutomatInf Scien.v51.i10.30
13. Masol V.I., Popereshnyak S.V. Checking the Randomness of Bits Disposition in Local Segments of the (0, 1)-Sequence. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. 56(3). P. 1–8. DOI: 10.1007/s10559-020-00267-0

Poppereshnyak S.V. SOFTWARE FOR TESTING BIT SEQUENCES FOR RANDOMNESS

The article systematizes scientific positions on static testing of sequences, which are widely used in cryptographic information security systems for the production of key and additional information. A brief overview of known methods of random sequence testing, as well as static tests developed in recent decades. The perspective direction of research is considered – static testing of sequences with use of multidimensional statistics is considered. The paper presents formulas for testing random bit sequences on randomness, using two-dimensional or three-dimensional statistics that can be used to test short and medium sequences.

The approach to testing using multidimensional statistics allows you to rely on a deeper justification of the randomness of the generated sequences. The advantage of testing with multidimensional statistics is also the possibility of a high degree of parallelism in the calculation of the family of statistics. This area is promising for research, especially for short and medium-length sequences, where one-dimensional statistics are often powerless.

The method of pseudo-random sequence testing is given in the paper and an explicit form of joint distribution of numbers of 2-chains and numbers of 3-chains of different variants in a random bit sequence of a given small length is obtained.

To implement the proposed technique, a software tool was developed to test the bit sequence for randomness. This tool includes NIST tests, as well as tests using multidimensional statistics, which have proven themselves well when testing a pseudo-random sequence of short length. As a result of further development, a single information system will be expanded and created, which will allow to analyze the bit sequence using known tests and / or tests using multidimensional statistics and choose a high-quality pseudo-random sequence for use in a particular subject area.

Key words: software, bit sequence, testing, multidimensional statistics; random sequences; pseudo-random sequence; statistical testing.

Савчук Т.О.

Вінницький національний технічний університет

Ваховський В.М.

Вінницький національний технічний університет

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ ФОНДОВОГО РИНКУ АКЦІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

У статті розглянуто найбільш поширені методи аналізу фондового ринку акцій та визначено їх основні переваги та недоліки. Основним недоліком цих методів можна вважати низький рівень їх аналітичної точності, що робить їх малоефективними для використання. Визначено, що нечітка логіка має потенціал для покращення продукційного методу аналізу фондового ринку акцій.

У статті було запропоновано удосконалений метод аналізу фондового ринку акцій, який створений на основі продукційного методу аналізу фондового ринку акцій із використанням елементів нечіткої логіки. Цей метод дає змогу підвищити ефективність аналізу фондового ринку акцій завдяки використанню показників, що складно формалізуються, за допомогою введення нечітких множин, функцій належності, лінгвістичних змінних, терм-множин, нечіткої імплікації та ступеня істинності що своєю чергою сприяє підвищенню рівня точності аналізу, а також зростанню ступеня автоматизації вирішення конфліктних ситуацій під час аналізу, що відкидає постійну потребу втручання користувача та сприяє формуванню обґрунтованих висновків щодо тенденції зміни цін на фондовому ринку акцій.

У статті було проведено дослідження ефективності вдосконаленого методу аналізу фондового ринку акцій, яке показало, що цей метод дав змогу врахувати нові показники, що складно формалізуються, серед яких: рівень доходів населення, рівень інфляції, продуктивність праці, рівень податкових ставок, ліквідність активів, кредитний ризик, демографія інвесторів, стан макроекономіки та інші. У результаті порівняння удосконаленого та продукційного методів аналізу фондового ринку акцій (на основі семи різних галузей аналізу) виявлено, що використання запропонованого вдосконаленого методу аналізу фондового ринку акцій у середньому збільшує точність такого аналізу на 8,9%.

Ключові слова: фондовий ринок акцій, нечітка логіка, метод аналізу фондового ринку акцій, інтелектуальний аналіз даних, нечітка імплікація.

Постановка проблеми. В останні роки зростання кількості учасників на фондовому ринку акцій призвело до збільшення ролі фондового ринку акцій як інструменту фінансування та розвитку економіки. Через це на фондовому ринку акцій збільшився також кругообіг капіталу, в одних галузях створюються значні запаси, а інші потребують значних фінансових вкладень для нормального функціонування.

Фондовий ринок акцій – це частина ринку капіталів, де здійснюються емісія, купівля і продаж акцій, що включає в себе окремі взаємопов'язані елементи [1].

Аналіз фондового ринку акцій – комплекс дій, спрямованих на вивчення усіх факторів, умов, ситуацій, які впливають на фондовий ринок акцій, що має за мету визначення тенденції розвитку цін на фондовому ринку акцій [1].

Нині найбільшого поширення набули нейромережевий та продукційний метод.

Нейромережевий метод аналізу фондового ринку акцій заснований на математичному моделюванні функціонування нейронів. Його методологія – побудова систем, подібних до нейронів головного мозку [2]. До переваг цього методу можна зарахувати змогу обробляти неповні дані та відсутність необхідності формалізації знань. На практиці ж нейронні мережі, принаймні, реалізовані в стандартних програмних пакетах для аналізу фондового ринку акцій, мають досить низьку аналітичну ефективність через труднощі інтерпретації результатів роботи нейронної мережі і пояснень, чому вона прийняла те чи інше рішення [3].

Продукційний метод аналізу фондового ринку акцій передбачає математичне моделювання свідомої діяльності людини, тобто виявлення і застосування в інтелектуальній системі для аналізу фондового ринку акцій різних евристик, які використовуються для вирішення задачі аналізу фондового ринку акцій [4]. Цей метод здатен

забезпечувати вищий рівень точності порівняно з нейромережовим методом завдяки своїй простоті, наочності, високій модульності та легкості до внесення змін. Проте він має проблеми із врахуванням економічних показників, які складно формалізуються, а також потребує постійного втручання користувача через високий рівень конфліктних ситуацій, що своєю чергою негативно впливає на точність аналізу [4].

Сучасні методи аналізу фондового ринку акції характеризуються недостатнім рівнем точності. Нейромережовий метод має низку потенційних переваг, але й досить серйозні недоліки. Наприклад, відсутність безперервного перенавчання нейромережі в процесі виконання завдання досить швидко робить її неефективною в аналізі ситуації на ринку. Продукційний метод дає змогу прослідкувати за всім процесом аналізу фондового ринку акцій, є ефективним та легко інтерпретується, але він не забезпечує необхідного рівня точності [5]. Тому актуальною задачею є вдосконалення продукційного методу шляхом використання нечіткої логіки, що дасть змогу врахувати економічні показники, які складно формалізуються. Це своєю чергою сприяє підвищенню рівня точності аналізу фондового ринку акцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наявні методи аналізу фондового ринку виконують поставлене завдання з недостатнім рівнем точності, не враховують певних показників, що складно формалізуються, що своєю чергою знижує рівень їх точності. Питання аналізу фондового ринку досліджувалося в роботах таких науковців, як Т.Б. Бердникова, В.Г. Руденко та О.Д. Штанько [2–4]. Водночас невирішеним залишається питання, пов'язане з усуненням конфліктних ситуацій, що дало б змогу значно підвищити точність аналізу, а також автоматизувати процес аналізу фондового ринку акцій.

Постановка завдання. Метою дослідження є удосконалення продукційного методу аналізу фондового ринку акцій за допомогою використання нечіткої логіки, що значно підвищить точність аналізу фондового ринку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Загалом аналіз фондового ринку акцій включає низку показників, що складно формалізуються, до них можна зарахувати рівень доходів населення, рівень інфляції, рівень податкових ставок, рівень капіталовкладень та інші, точність яких може бути підвищена шляхом застосування теорії нечітких множин [6].

Удосконалений метод аналізу фондового ринку акцій має відповідати таким функціональним вимогам [7]:

- змога визначити ступінь істинності входів та виходів кожної з нечітких множин для аналізу фондового ринку акцій;
- здатність автоматично вирішити конфліктні ситуації, що виникають при аналізі фондового ринку акцій;
- змога обчислювати правила аналізу фондового ринку акцій на основі використання нечітких операторів та застосовувати імплікацію для отримання вихідних значень відповідних правил;
- здатність формувати висновки щодо фондового ринку акцій із високим рівнем точності.

Класичний продукційний метод аналізу фонду ринку акцій передбачає такі основні кроки: підготовка інформації для аналізу, подання інформації щодо показників, вирішення конфліктів у правилах, що мають суперечливості, формування висновку щодо тенденції зміни цін акцій. Розглянемо доцільність використання нечіткої логіки в частині введення нечіткості показників в означеному методі аналізу.

Удосконалений метод аналізу фондового ринку з використанням нечіткої логіки складається з таких етапів: підготовка інформації для аналізу, подання інформації щодо показників, введення нечіткості показників, знаходження ступеня істинності умов та висновків, вирішення конфліктів у правилах, що мають суперечливості, формування висновку щодо тенденції зміни цін акцій (рисунок 1).



Рис. 1. Основні етапи вдосконаленого методу аналізу фондового ринку акцій

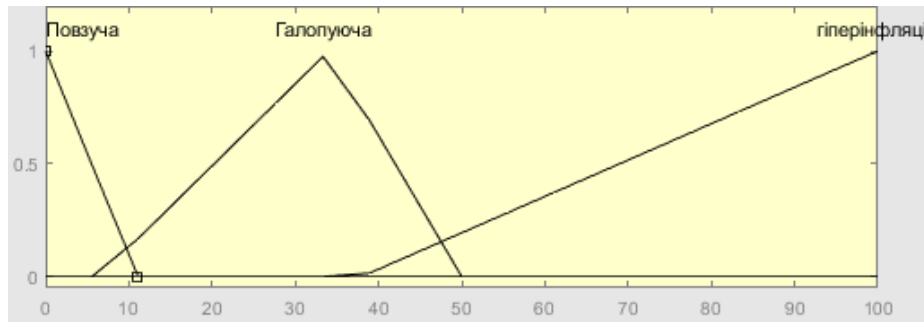


Рис. 2. Функція належності показника рівень інфляції

На етапі підготовки інформації за визначеними параметрами відбувається формування бази правил аналізу фондового ринку акцій у форматі “if – then”. База правил для аналізу фондового ринку акцій має відповідати низці вимог:

- для будь-якого терму вхідної змінної аналізу фондового ринку акцій має існувати хоча б одне правило, в якому цей терм використовується в лівій частині правила;

- має існувати хоча б одне правило аналізу фондовому ринку акцій для кожного лінгвістичного терму вихідної змінної;

- дотримання достовірності конкретних та узагальнених відомостей, наявних у базі даних;

На етапі подання інформації щодо показників фондового ринку акцій відбувається формалізація показників фондового ринку акцій. Наприклад, для формалізації рівня інфляції використаємо три терми [2]:

- повзуча інфляція (до 11% на рік);
- галопуюча інфляція (6–50% на рік);
- гіперінфляція (38–10 000% на рік).

Функція належності рівня інфляції зображена на рисунку 2.

На етапі введення нечіткості за допомогою функції належності відбувається перехід від чіткого значення деякого параметра до нечіткого значення, що використовується для аналізу фондового ринку акцій [4]. Наведемо приклад процесу введення нечіткості для показника рівень інфляції:

$$x_1 = 8, \tag{1}$$

де x_1 – вхідна лінгвістична змінна рівень інфляції.

Тоді фактичне значення для визначення функції належності матиме вигляд:

$$\mu_{A_1}(8), \tag{2}$$

де A_1 – терм вхідної лінгвістичної змінної рівень інфляції.

На етапі визначення знаходження ступеня істинності умов та висновків відбувається:

1) задання ступенів істинності умов на основі відповідей 4 експертів [6]. Наприклад, задання ступеня істинності для показника рівень інфляції наведено в таблиці 1;

Таблиця 1

Задання ступеня істинності для показника рівень інфляції

Показник	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3	Експерт 4	Середнє значення показника
Рівень інфляції	0,7	0,6	0,7	0,7	0,67

2) знаходження ступенів істинності висновків кожного з правил нечітких продукцій аналізу фондового ринку акцій із використанням парних нечітких логічних операцій [4]. Наведемо приклад знаходження ступеня істинності висновку в правилі з використанням показників рівень інфляції та рівень податкових ставок:

$$C_1 = \min(\mu_{A_1}, \mu_{B_1}), \tag{3}$$

де α_{A_1} , α_{B_1} – фактичні значення для визначення функцій належності показників рівень інфляції та рівень податкових ставок;

C_1 – терм функції належності вихідної лінгвістичної змінної.

На етапі вирішення конфліктів із правил, що потрапили до конфліктної множини, обирається лише одне, яке має вищий ступінь істинності. Наприклад, якщо при аналізі фондового ринку акцій з’явилася змога застосувати одразу кілька правил, які мають суперечливості, то вони вносяться до конфліктної множини та після завершення формування конфліктної множини з них обирається лише одне.

На наступному етапі формується висновок та, у разі потреби, надаються покрокові пояснення щодо ситуації на фондовому ринку акцій. Для визначення рівня точності було обрано набори

економічних показників у кожній із 7 різних галузей на фондовому ринку акцій:

- агропромислова;
- логістична;
- енергетична;
- нафтопереробна;
- металургійна;

- автомобільна;
- харчова.

Набори показників та галузей для дослідження методів аналізу були взяті з відкритих даних Української фондової біржі [8].

Кожен експеримент зводився до дослідження показників дохідності, ставки дисконтування

Таблиця 2

Результати дослідження показників фондового ринку акцій

Галузь	Показник	Дійсне значення показника	Значення показника, отримане з використанням продукційного методу	Значення показника, отримане з використанням удосконаленого методу
1	2	3	4	5
Агропромислова	Дохідність, тис. грн	9160	8235	8865
	Ставка дисконтування, %	14	13	13
	Галузевий ризик, %	24	22	25
Логістична	Дохідність, тис. грн	8540	8924	8538
	Ставка дисконтування, %	16	15	16,9
	Галузевий ризик, %	68	65,1	70,2
Енергетична	Дохідність, тис. грн	42 632	41 447	41 710
	Ставка дисконтування, %	9,4	8,3	8,6
	Галузевий ризик, %	16,5	16,3	16,7
Нафтопереробна	Дохідність, тис. грн	67 220	69 250	66 902
	Ставка дисконтування, %	11,8	14	12,4
	Галузевий ризик, %	14	13,5	14,4
Металургійна	Дохідність, тис. грн	52 364	55 232	54 128
	Ставка дисконтування, %	15	15,8	15,7
	Галузевий ризик, %	10	9	9,6
Автомобільна	Дохідність, тис. грн	6265	7097	6824
	Ставка дисконтування, %	9	9	9
	Галузевий ризик, %	75	66	78
Харчова	Дохідність, тис. грн	6153	5893	6002
	Ставка дисконтування, %	14,2	14,1	15
	Галузевий ризик, %	58,9	64,5	60

Таблиця 3

Відносне відхилення показників фондового ринку акцій досліджених галузей

Галузь	Відхилення показника	Дохідність, %	Ставка дисконтування, %	Галузевий ризик, %
Агропромислова	Продукційний	11,2	7,7	9
	Удосконалений	3,3	7,7	4
Логістична	Продукційний	4,3	6,6	4,4
	Удосконалений	2,1	5,3	3,1
Енергетична	Продукційний	4,6	13,2	1,2
	Удосконалений	2,2	6,8	1,2
Нафтопереробна	Продукційний	2,9	15,7	3,7
	Удосконалений	0,4	9,3	2,7
Металургійна	Продукційний	5,2	5	11,1
	Удосконалений	3,2	4,4	4,1
Автомобільна	Продукційний	11,6	0	13,6
	Удосконалений	8,1	0	3,8
Харчова	Продукційний	4,4	0,7	8,6
	Удосконалений	2,5	5,3	1,8

Рівень точності продукційного методу та удосконаленого методу аналізу фондового ринку акцій

Галузь	Рівень точності продукційного методу, %	Рівень точності удосконаленого методу, %
АПК	72,1	85
Логістична	84,7	89,5
Енергетична	80,1	89,8
Нафтопереробна	77,7	87,6
Металургійна	78,7	88,3
Автомобільна	74,8	87
Харчова	86,3	90,4
Усереднений рівень точності, %	79,2	88,1

та галузевого ризику однієї з 7 галузей. Результати дослідження цих показників представлено в таблиці 2.

Для визначення рівня точності аналізу фондового ринку акцій потрібно визначити відносне відхилення кожного з показників. Для розрахунку відносного відхилення використовуємо формулу [9]:

$$\sigma = \left| \frac{a}{b} * 100 \right| - 100, \quad (4)$$

де a – дійсне значення,

b – значення, отримане за допомогою одного з методів.

Відносне відхилення показників фондового ринку акцій наведено в таблиці 3.

Для розрахунку рівня точності скористаємося формулою [9]:

$$\Delta = 100 - (D + C + G), \quad (5)$$

де D – дохідність, C – ставка дисконтування, G – галузевий ризик.

Результати розрахунку рівня точності продукційного та удосконаленого методів аналізу фондового ринку акцій занесені до таблиці 4.

Висновки. У статті було запропоновано вдосконалений метод аналізу фондового ринку акцій шляхом використання нечіткої логіки, що базується на продукційному методі аналізу. Дослідження ефективності удосконаленого методу аналізу фондового ринку акцій показало, що цей метод дав змогу врахувати нові показники, що складно формалізуються: рівень доходів населення, рівень інфляції, продуктивність праці, рівень податкових ставок, ліквідність активів, кредитний ризик, демографія інвесторів, стан макроекономіки та інші. У результаті порівняння удосконаленого та продукційного методів аналізу фондового ринку акцій (на основі семи різних галузей) виявлено, що в середньому використання запропонованого методу аналізу фондового ринку акцій збільшує точність такого аналізу на 8,9%.

Список літератури:

1. Фондовий ринок. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Фондовий_ринок (дата звернення: 09.06.2020).
2. Бердникова Т.Б. Оцінка цінних паперів : навчальний посібник. Київ : Наш Формат, 2016. 144 с.
3. Руденко В.Г. Інвестиційний аналіз : навчальний посібник. Харків : ЛАБОРАТОРІЯ МІКРО-ЕОМ, 2008. 245 с.
4. Штанько О.Д. Сучасні тенденції функціонування світових фондових ринків. *Академічний огляд*. 2013. № 2(39). С. 170–176.
5. Савчук Т.О., Ваховський В.М. Аналіз фондового ринку з використанням штучного інтелекту. *XLVIII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету*. Вінниця. 2019. С. 756–757. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/index/pages/view/zbirni> 2019 (дата звернення: 25.06.2020).
6. Штучний інтелект на фондовому ринку. URL: <https://habr.com/ru/company/iticapital/blog/350092/> (дата звернення: 09.07.2020).
7. Savchuk T.O., Pryimak N.V., Assembay A., Zyska T., Junisbekov M., and A. Annabaev. *The technology of searching the associative rules while developing the software*, Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017. doi: 10.1117/12.2280900.
8. Українська фондова біржа. URL: <https://ukrse.com.ua/analitika> (дата звернення: 13.07.2020).
9. Романов В.П. Интеллектуальные информационные системы в экономике : учебное пособие. Москва : Издательство «Экзамен», 2013. 496 с.

Savchuk T.O., Vakhovskyi V.M. IMPROVEMENT OF THE METHOD OF ANALYSIS OF THE STOCK MARKET OF SHARES

The scientific article considers the most common methods of stock market analysis and identifies their main advantages and disadvantages. The main disadvantage of these methods of stock market analysis can be considered the low level of their analytical accuracy, which makes them inefficient to use. It is determined that fuzzy logic has the potential to improve the production method of stock market analysis.

The scientific article proposed an improved method of stock market analysis, which is based on the production method of stock market analysis using elements of fuzzy logic. This method allows to increase the efficiency of stock market analysis by using indicators that are difficult to formalize, by introducing fuzzy sets, membership functions, linguistic variables, term sets, fuzzy implication and degree of truth, which in turn improves the accuracy of analysis, and also an increases the degree of automation of conflict resolution during the analysis, which rejects the constant need for user intervention and contributes to the formation of sound conclusions about the trend of changes in stock market prices.

The scientific article conducted a study of the effectiveness of the improved method of stock market analysis, which showed that this method allowed to take into account new indicators that are difficult to formalize, including: profitability, inflation rate, productivity, level of tax rates, liquidity of assets, credit risk, investor demography, the state of macroeconomics and others indicators. As a result of comparing the improved and productive methods of stock market analysis (based on seven different industries of stock market analysis) it was found that the use of the proposed improved method of stock market analysis, on average, increases the accuracy of such analysis by 8.9%.

Key words: stock market, fuzzy logic, stock market analysis method, data mining, fuzzy implication.

Хома Ю.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Микитин І.П.

Національний університет «Львівська політехніка»

Артемук С.І.

Національний університет «Львівська політехніка»

Бридінський В.А.

Національний університет «Львівська політехніка»

НЕЙРОКОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ПЛАТФОРМИ OPEN VCI ТА ГЛИБОКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Інтерфейс «мозок-комп'ютер» є потужним інструментом комунікації між людиною та технічними системами. Потенційні застосування нейрокомп'ютерних інтерфейсів доволі широкі: від сфери ігор та розваг до нейроергономічного керування технічними об'єктами. Особливо важливим є розвиток мобільних роботів, керованих сигналами мозку. Такі системи можуть допомагати людям із нервово-м'язовими розладами рухатися і тим самим покращувати якість свого життя. Завдяки технологічним досягненням на цей час стали доступними прості і зручні способи відбору і реєстрації сигналів ЕЕГ. Тому ключовими завданнями створення нейрокомп'ютерної системи керування роботом є ефективне кондиціонування зареєстрованих сигналів та їх розпізнавання. У роботі описано сутність функціонування нейрокомп'ютерного інтерфейсу, а також наведено прототип власної нейрокомп'ютерної системи керування, який включає шолом із платформою Open VCI Cyton, VCI-сервер на основі персонального комп'ютера і, власне, колісний робот із бортовим комп'ютером Raspberry Pi. Передавання зареєстрованих засобами Open VCI Cyton 16-каналних ЕЕГ-записів на VCI-сервер здійснюється через протокол Bluetooth, а для комунікації між роботом та VCI-сервером застосовано стандарт WiFi. Основним завданням було створення і дослідження змоги застосувати технології глибокого навчання для класифікації відфільтрованих сигналів, що відповідають частотній смузі Alpha-хвиль енцефалограм. Представлено програмну архітектуру й алгоритм функціонування системи, а також досліджено в ролі нейрокласифікатора згорткову нейронну мережу і багатошаровий перцептрон. Фільтрування ЕЕГ-сигналів та їх класифікація виконуються на VCI-сервері. Нейрокласифікатор на основі згорткової мережі показав вищу точність, але вимагає для своєї реалізації більших обчислювальних ресурсів.

Ключові слова: ЕЕГ-сигнали, інтерфейс «мозок-комп'ютер», глибоке навчання, згорткова нейронна мережа, багатошаровий перцептрон.

Постановка проблеми. Системи взаємодії людини і машини мають мати різну структуру і призначення. Протягом останніх років увагу дослідників привертають системи, що базуються на використанні інтерфейсу «мозок-комп'ютер» (англ. Brain-Computer Interface - BCI). Основна ідея роботи таких систем полягає у відборі та опрацюванні сигналів електроенцефалограми з метою інтерпретації образів (емоцій, думок, команд тощо). Інтерфейс «мозок-комп'ютер» (інша назва – нейрокомп'ютерний інтерфейс (НКІ)) є унікальним комунікаційним каналом між людським мозком і зовнішнім світом, який, на відміну від традиційних технологій обміну

повідомленнями, має низку особливостей, переваг і обмежень [1; 2].

Системи управління на основі інтерфейсу «мозок-комп'ютер» можуть знайти і вже знаходять широке застосування від сфери ігор та розваг до нейрональної реабілітації і нейроергономічного керування технічними об'єктами [3; 4]. Ключовим аспектом у роботі НКІ є інтелектуальний аналіз енцефалограм. Для цього використовують різні алгоритми машинного навчання [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Активність головного мозку, в тому числі і розумова діяльність людини, супроводжується розкладом на поверхні голови електричних біопотенціалів.

Зйом за допомогою електродів цих біопотенціалів, їх підсилення і запис за використанням відповідного обладнання і становить сутність методу електроенцефалографії [6]. Упродовж тривалого часу цей метод застосовувався в медичній діагностиці, де лікар-діагност «розшифровував» багатоканальні ЕЕГ-записи на предмет встановлення відповідності чи відхилення енцефалограми від норми.

З розвитком інформаційних технологій ситуація докорінно змінилася. На базі алгоритмів машинного навчання створюються не лише системи підтримки прийняття рішень у медичній діагностиці, але постійно розширюється коло завдань, пов'язаних з інтелектуальним аналізом енцефалограм. Значна частина таких завдань базується на використанні інтерфейсу «мозок-комп'ютер» [1,3,7]. Створення комунікаційного інтерфейсу за допомогою сигналів мозку зіткнулося з багатьма проблемами як технічного характеру, так і спричинених зручністю використання в реальних застосуваннях (англ. usability).

Складність опрацювання ЕЕГ-сигналів зумовлена їх нестаціонарною природою, слабкою інтенсивністю, податливістю до дії сторонніх дестабілізуючих чинників, таких як зміни в розміщенні електродів, інтерференція інших електричних сигналів, спричинених електричною активністю серця (електрокардіограма) і скелетних м'язів (електроміограма), а також внаслідок руху очей (електроокулограма). Для зменшення впливу артефактів застосовується низка методів цифрового кондиціонування сигналів, що засновані на формальних методах частотної і просторової фільтрації, часо-частотних перетворень, статистичного і кореляційного аналізу тощо [3; 8; 9]. Деякі фірми, наприклад, Texas Instruments, випускають спеціальні апаратні модулі (Front-End) для реєстрації і кондиціонування ЕЕГ-сигналів [10; 11]. Є проблема у застосуванні формальних методів для придушення впливу артефактів, частотна смуга яких перекривається з корисними компонентами сигналів ЕЕГ. У зв'язку з цим виглядає перспективним застосування неформальних моделей машинного навчання для виявлення й усунення аномалій із біосигналів [12].

Іншим серйозним бар'єром, що стоїть перед технологією НКІ, є природна мінливість електрофізіологічних сигналів мозку [6; 13]. Психічний та емоційний стан, рівень втоми і концентрації є факторами, що породжують непередбачувані зміни і відхилення сигналів ЕЕГ, одержаних у різ-

них сесіях запису. Ці чинники маскують основну структуру ЕЕГ-сигналів, утруднюючи розрізнення і виокремлення слабких корисних компонент. Звідси потреба використання неформальних моделей опрацювання ЕЕГ-сигналів, які засновані на алгоритмах машинного навчання.

Незважаючи на те, що сама галузь машинного навчання є порівняно молодою, в останні роки в цій царині з'явився та бурхливо розвивається новітній напрям – глибинне навчання (Deep Learning). Завдяки саме технології глибинного навчання відбувся революційний прорив у питаннях комп'ютерного розпізнавання зображень, опрацювання живої мови, розшифруванні геному людини [14; 15]. Для реалізації глибинного навчання застосовують різні архітектури нейронних мереж, зокрема згорткові мережі [14; 16].

Сфера застосування технологій глибинного навчання постійно розширюється. Глибинне навчання доцільно застосовувати для розв'язання складних задач. До таких, безперечно, належить й інтелектуальний аналіз ЕЕГ-сигналів в інтерфейсі «мозок-комп'ютер».

Постановка завдання. Метою роботи є порівняльний аналіз двох варіантів реалізації інтерфейсу «мозок-комп'ютер» для керування колісним роботом на базі технологій глибинного навчання, а саме згорткової нейронної мережі і багаточарового перцептрона.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Структура і функціонування нейрокомп'ютерного інтерфейсу. Типова структура інтерфейсу «мозок-комп'ютер» складається з п'яти структурних компонентів (рис. 1).

Блок відбору ЕЕГ-сигналів відповідає за багатоканальний зйом за допомогою електродів розкладу біопотенціалів із поверхні голови та формування «сирих» цифрових ЕЕГ-сигналів. Наступний блок виконує функцію кондиціонування сирих ЕЕГ-сигналів шляхом їх підсилення та фільтрації шуму. Блок витягування характерних ознак формує дискримінаційні характеристики (дескриптори) з релевантних ЕЕГ-сигналів, зменшуючи розмір даних, що надходять до класифікатора. Блок класифікатор, що збудований за одним із методів машинного навчання, аналізуючи вектор дескрипторів, зараховує ЕЕГ-сигнали до одного з класів. Блок трансляції формує вихідні дані, формат яких залежить від цільового призначення інтерфейсу «мозок-комп'ютер». Наприклад, це можуть бути команди управління технічним об'єктом, рух курсором чи написання букв на моніторі.

Для зйому сигналів EEG використовують спеціальні шоломи. На цей час на ринку є шоломи різних фірм, найпопулярнішими з яких є Emotiv, OpenEEG, OpenBCI, Muse, MindWave [9]. Системи відбору різняться типом і числом електродів (каналів зйому) їх розташуванням, якістю зареєстрованих EEG-сигналів. У табл. 1 подано основні технічні характеристики двох шоломів, які використовувалися в дослідженнях.

Інтенсивність EEG-сигналів більше ніж на два порядки нижча за сигнали електрокардіограми і не перевищує 100 мкВ. Це означає надзвичайно високу вразливість EEG-сигналів до дії різних дестабілізуючих факторів, які мають внутрішню біологічну природу, як рухи очей, м'язів, робота серця, а також технічне походження, насамперед, наведення силової мережі живлення, артефакти зумовлені змінами імпедансу «шкіра-електрод». Для придушення мережевої завади застосовують загороджувальні фільтри (Power-Line Notch Filter). Щоб покращити відношення сигналу до шуму, традиційно використовують різного роду смугові фільтри (Band-pass Filter), які розраховані на частотний інтервал інформативних складників EEG-сигналів. З-поміж різних хвиль мозкової активності найбільш придатними є Alpha-хвилі, зосереджені в смузі між 7 Hz та 13 Hz.

Традиційні підходи інтелектуального аналізу електрокардіограм передбачають етап витягування характеристичних ознак, за якими класифікатор може однозначно диференціювати EEG-сигнали, щоб забезпечити наступну фазу – класифікацію. Для витягування таких ознак застосовуються різні методи перетворення і трансформацій як у часовій, так і у частотній областях, наприклад авто-регресійний аналіз, канонічно-кореляційний

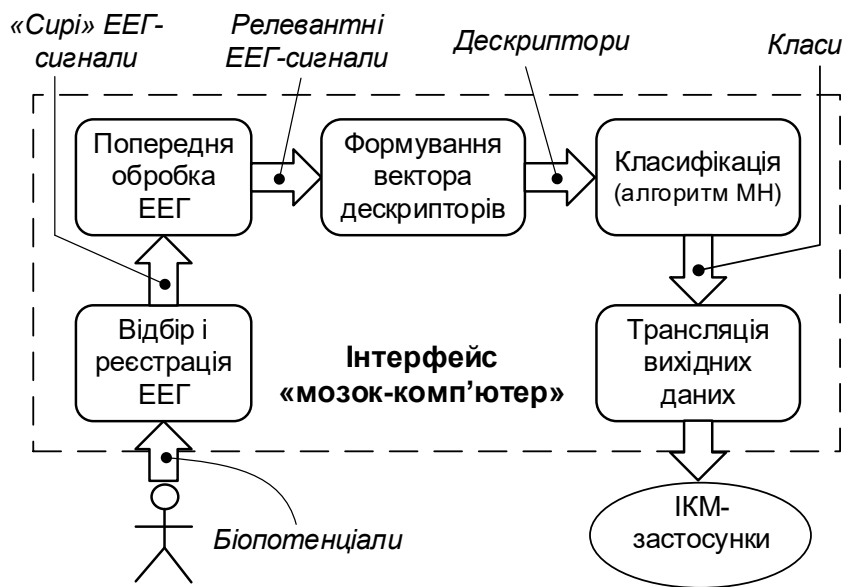


Рис. 1. Типова структура інтерфейсу «мозок-комп'ютер»

аналіз (Canonical Correlation Analysis – CCA), короткочасове перетворення Фур'є (Short-Time Fourier Transform – STFT), хвилькове перетворення, згладжувальне фільтрування (Smoothing Filter) [3; 9; 17]. Видобуті ознаки формують вектор дескрипторів, який становить вхідні дані для класифікатора, який реалізує один з алгоритмів машинного навчання.

Реалізація системи управління роботом на основі інтелектуального аналізу EEG-сигналів глибокими нейромережами. Для проведення натурального експерименту автори збудували систему, що складається з трьох окремих фізичних компонент (рис. 2):

- шолом з платформою Open BCI Cyton [18];
- персональний комп'ютер, що виконує функцію BCI-сервера;
- колісний робот, на якому встановлено плату Raspberry Pi.

Шолом зі встановленою апаратно-програмною платформою Open BCI Cyton забезпечує 16-каналний відбір енцефалограм та їх передавання Bluetooth-протоколом до персонального комп'ютера. На ПК відбувається програмне кондиціонування EEG-сигналів.

Таблиця 1

Основні технічні характеристики двох шоломів для зйому EEG-сигналів

Тип шолома	Число каналів	Розміщення електродів	Вихідні інтерфейси	Доступність програмного забезпечення
Emotiv Insight	5	Фіксоване	Bluetooth	Закрите
Open BCI Cyton	16	Еластичне	Bluetooth, Wi-Fi, UART	Відкрите

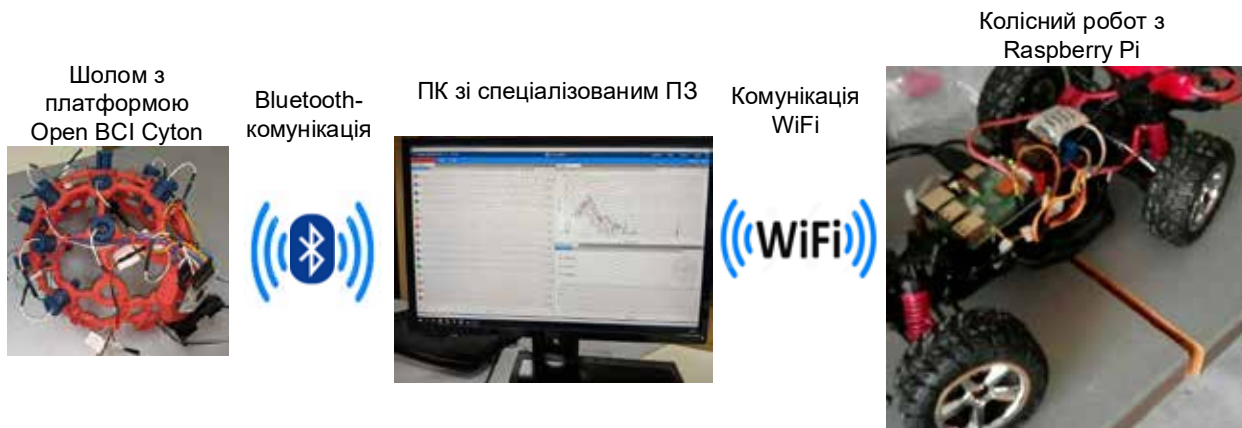


Рис. 2. Узагальнена структура системи управління колісним роботом

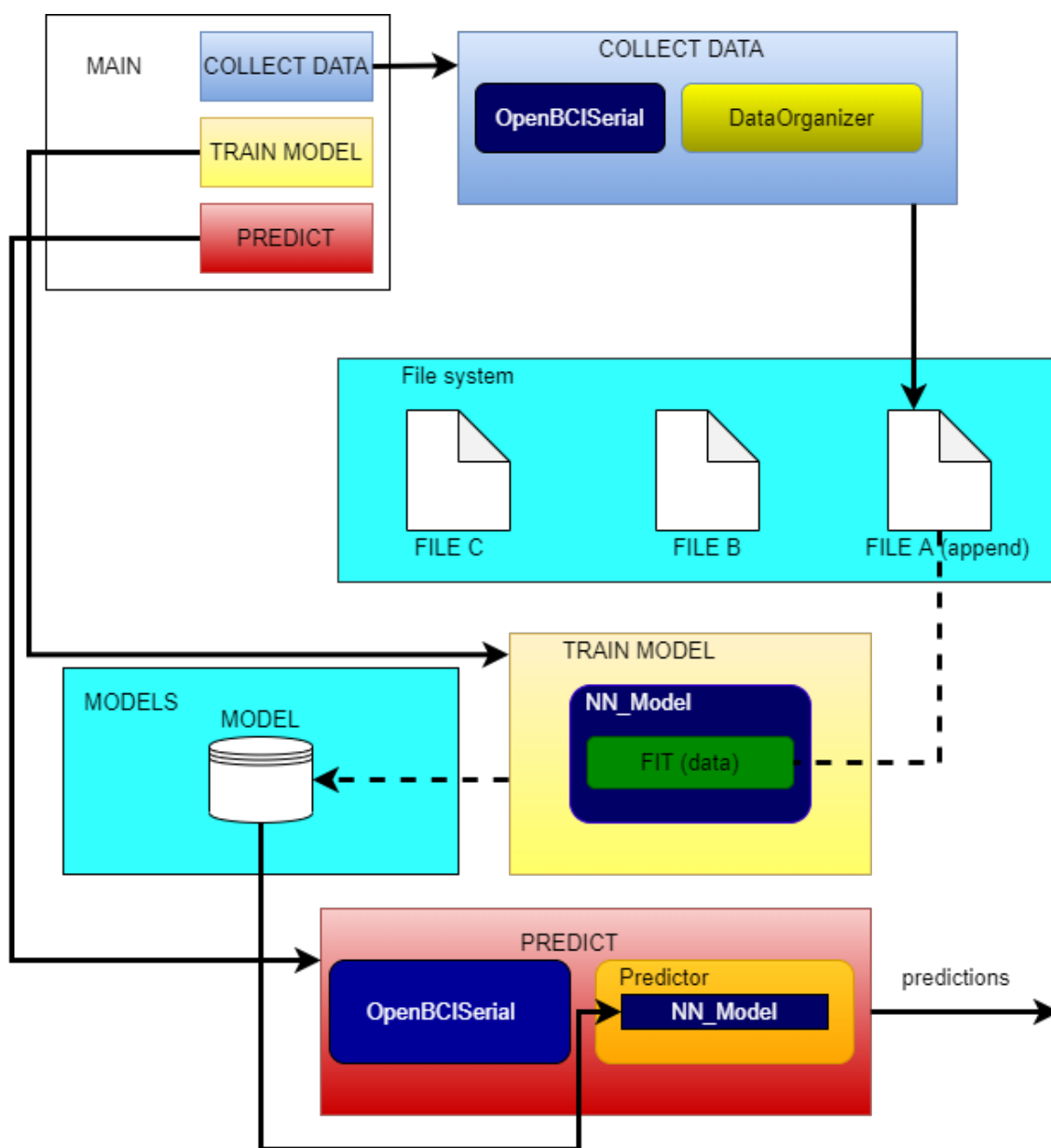


Рис. 3. Архітектура інтелектуальної системи опрацювання ЕЕГ-сигналів

Для інтелектуального аналізу ЕЕГ-сигналів автори застосували парадигму глибинного навчання, за якою на вхід класифікатора подаються не дескриптори, а відфільтровані ЕЕГ-сигнали. Для виконання досліджень нами розроблено два варіанти класифікаторів – на основі згорткової нейронної мережі і багатошарового перцептрона.

Результати класифікації із VCI-сервера за стандартом WiFi передаються на одноплатний комп'ютер Raspberry Pi, який встановлено на колісному роботі. До основних переваг Raspberry Pi варто зарахувати компактні габарити (85 × 56 × 17 mm), наявність спеціалізованої операційної системи Raspbian (написаної на базі ядра Linux), підтримка безпроводних протоколів обміну даними Wi-Fi та Bluetooth. Okремо варто зазначити наявність цифрових виводів типу GPIO, які уможливають формування сигналів управління для керування моторами, через спеціальну плату-драйвер. Таким чином, Raspberry Pi забезпечує управління колісною платформою та комунікацію з VCI-сервером.

Програмна архітектура та алгоритм функціонування системи. Авторами розроблено власний варіант інтелектуальної системи опрацювання ЕЕГ-сигналів (рис. 3), до складу якої входять три основні блоки:

- блок збору даних (COLLECT DATA);
- блок тренування моделі (TRAIN MODEL);
- блок передбачення (PREDICT).

Кожен із цих блоків відповідає за окремий режим роботи системи, який задається встановленням відповідного параметра в конфігураційному файлі перед запуском основної програми (MAIN).

У режимі *COLLECT DATA* за допомогою модулів *OpenBCISerial* та *DataOrganizer* відбувається відбір та запис на файлову систему зареєстрованих ЕЕГ-сигналів. При цьому об'єкт *OpenBCISerial* зчитує дані з шолому через протокол Bluetooth. З початком відбору даних із плати Open VCI Cyton створюється окремий потік, дані з якого записуються в буфер VCI-сервера паралельно з роботою програми. У разі заповнення буфера дані з нього переносяться в модуль *DataOrganizer*, а буфер очищається. Модуль *DataOrganizer* відповідає за зберігання отриманих із буфера пакетів даних у файли *.csv* та організацію файлів на диску за заданою структурою.

У режимі *TRAIN MODEL* відбувається навчання нейронних мереж за допомогою модуля *NNModel*. У цьому блоці створюється модель нейронної мережі шляхом навчання на даних, зібраних

у режимі *COLLECT DATA*. Вичитані з файлів дані агрегуються у вхідну матрицю або тензор і так подаються на вхід обчислювального графу, де відбувається ітераційний процес підбору оптимальних вагових коефіцієнтів у шарах нейронної мережі. Після завершення навчання модель нейронної мережі зберігається у два окремі файли – *.json* із структурою обчислювального графу і *.h5* з отриманими ваговими коефіцієнтами.

У режимі *PREDICT* за допомогою модулів *OpenBCISerial*, *Predictor* та *NNModel* відбувається розпізнавання зареєстрованих ЕЕГ-сигналів за допомогою нейронної мережі, навченої в режимі *TRAIN MODEL*. Модуль *OpenBCISerial* надсилає пакетами нові оброблені ЕЕГ-дані для інтелектуального аналізу на модуль *Predictor*, де сигнали нарізаються на сегменти відповідної довжини та подаються на модуль *NNModel*, в якому, власне, і відбувається процедура класифікації. Результати класифікації з модуля *Predictor* передаються на бортовий комп'ютер колісної платформи, де на їх основі формуються відповідні команди керування.

Методика та результати експерименту. У проекті розроблено та випробувано в ролі класифікатора ЕЕГ-сигналів два типи глибоких нейронних мереж – багатошаровий перцептрон (далі – MLP) і згорткова нейронна мережа (далі – CNN). Програмну імплементацію алгоритму виконано мовою програмування Python3 із використанням спеціалізованих фреймворків для побудови глибоких нейронних мереж: *Tensorflow v1*, *Keras*, *NumPy*, *cuDNN*.

Нейронна мережа на основі багатошарового перцептрона складається з 4 блоків на основі *dense*-шарів (рис. 4а). Загальне число шарів у мережі MLP – 9, із них 4 – шари з ваговими коефіцієнтами, за рахунок яких, власне, і відбувається навчання нейромережі. Розміри зазначених шарів такі: *Dense1* – 32, *Dense2* – 64, *Dense3* – 32, *Dense4* – 5. Дані, що подаються на вхідний шар *Input* мережі MLP, мають вигляд вектора розміром 4096×1. В усіх активаційних шарах, окрім вихідного, використовувалася функція *ReLU*, а у вихідному шарі функція – *softmax*.

Навчання мережі MLP здійснювалося за таких гіперпараметрів:

- функція втрат (loss): *categorical_crossentropy*;
- алгоритм навчання (optimizer): *Adadelta*;
- число епох навчання (num_epoch): 100;
- швидкість навчання (learning_rate): 0,001;
- коефіцієнт кросс-валідації (співвідношення навчального і тестового наборів даних): 70/30.

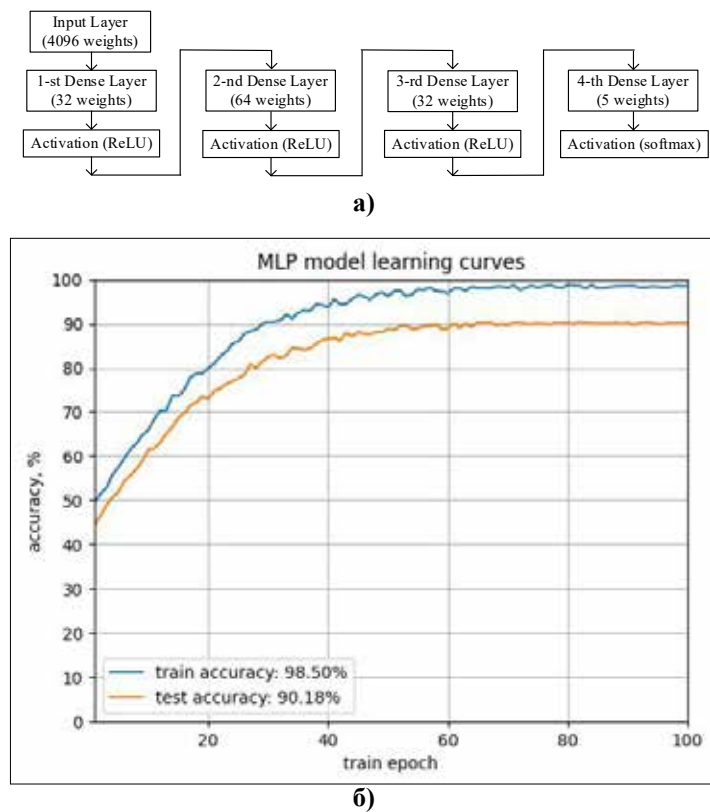


Рис. 4. Архітектура мережі MLP (а) та криві навчання (б)

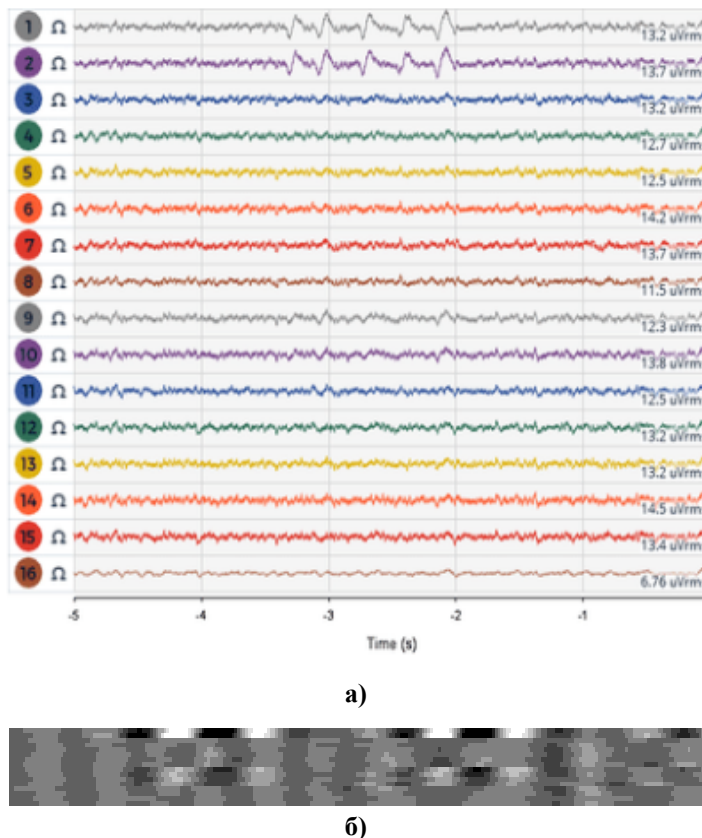


Рис. 5. Відфільтровані EEG-сигнали із 16 каналів (а) та візуалізація матриці вхідних даних (б)

Значення таких параметрів, як тип і коефіцієнт регуляризації, алгоритм ініціалізації вагових коефіцієнтів взято за замовчуванням.

Етап навчання зайняв 30 хвилин на процесорі Intel Core i7-5500 (операційна система Ubuntu 18.04 LTS, 8 ГБ оперативної пам'яті). Візуалізацію кривих навчання (learning curves) наведено на рис. 4б.

Мережа CNN складається із 3 блоків на основі згорткових шарів. У другому та третьому блоці додатково використано шари типу *dropout* та *max pooling*. Після згорткових шарів у CNN-архітектурі імплементовано два *dense*-шари. Загальне число шарів у мережі – 18, з них 5 – шари з ваговими коефіцієнтами, за рахунок яких власне і відбувається навчання CNN. В усіх активаційних шарах, крім вихідного, використовувалася функція *ReLU*, а у вихідному шарі функція – *softmax*. Зазначені шари мають такі розміри: *Conv1* – $16 \times 254 \times 32$, *Conv2* – $16 \times 252 \times 32$, *Conv3* – $16 \times 124 \times 32$, *Dense1* – 128, *Dense2* – 5.

Особливістю даних, що подаються на вхідний шар *Input* мережі CNN, є їх матричне, а не векторне представлення, у форматі $16 \times 256 \times 1$. На рис. 5а показано вигляд релевантних сигналів ЕЕГ із 16 каналів. Матрицю вхідних даних одержано шляхом нормалізації 256 вибірок зазначених 16 ЕЕГ-сигналів. На рис. 5б виконано візуалізацію матриці вхідних даних мережі CNN (як зображення у градаціях сірого).

Навчання мережі CNN здійснювалося за таких гіперпараметрів, що й мережі MLP, однак із використанням додаткового гіперпараметра – коефіцієнта *dropout*, значення якого встановлено на рівні 0,2. Навчання тривало 80 хвилин на процесорі Intel Core i7-5500 (операційна система Ubuntu 18.04 LTS, 8 Гб оперативної пам'яті). Архітектуру мережі і візуалізацію кривих навчання (learning curves) наведено на рис. 6.

Після завершення навчання оцінено точність класифікації нейромережею сигналів ЕЕГ на тестовій вибірці. Крім оцінювання точності мережі на тестовій вибірці, проведено додаткове тестування вже на реально працюючій системі – в режимі експлуатації (production). З цією метою оператор у шоломі подумки виконував команди

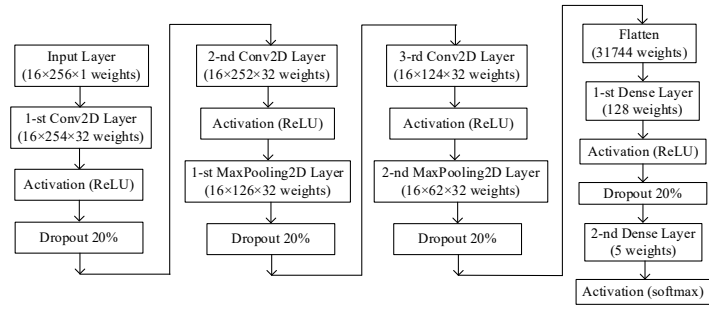
«вперед» (forward), «стоп» (stop), «вправо» (right), «вліво» (left), а ЕЕГ-сигнали, які відповідають цим командам, подавалися на ВСІ-сервер для розпізнавання нейронною мережею (спочатку MLP, а потім CNN). Загальне число команд, які подав оператор у режимі production, становило по 50 для кожної категорії (вперед, стоп, вправо, вліво). Підраховувалося число правильно і хибно визначених команд оператора. Результати експериментів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2
Результати тренування нейронних мереж

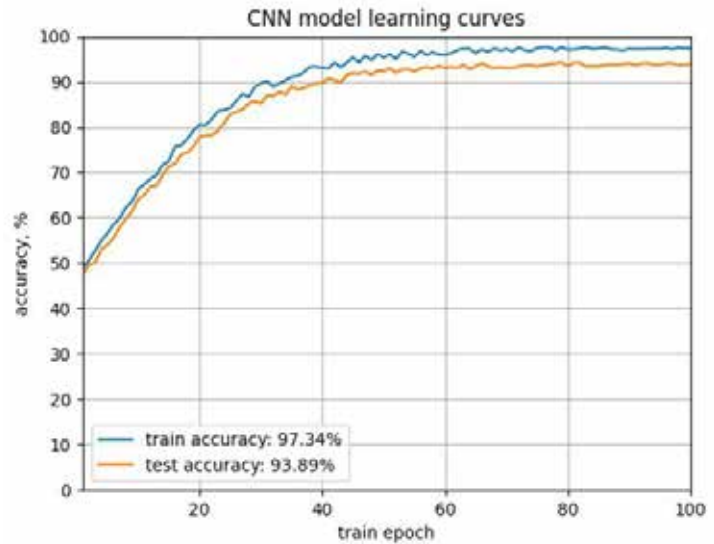
	MLP Model	CNN Model
Accuracy (Train set)	98,50 %	97,34 %
Accuracy (Test set)	90,18 %	93,89 %
Accuracy (Production)	78,5 %	86,07 %

Для глибшого аналізу поведінки нейрокомп'ютерної системи керування в режимі експлуатації (production), результати експериментів додатково відображено на рис. 7.

Результати роботи системи представлено у вигляді таблиці помилок (confusion matrix), рядки якої – це команда, яку подумки подавала людина-оператор, а стовпці – команда, яку розпізнала система. Таким чином, цифри на діагональних елементах відтворюють число коректних спрацювань, а числа поза межами діагоналі матриці, відповідно, – число хибних спрацювань. За результатами досліджень встанов-



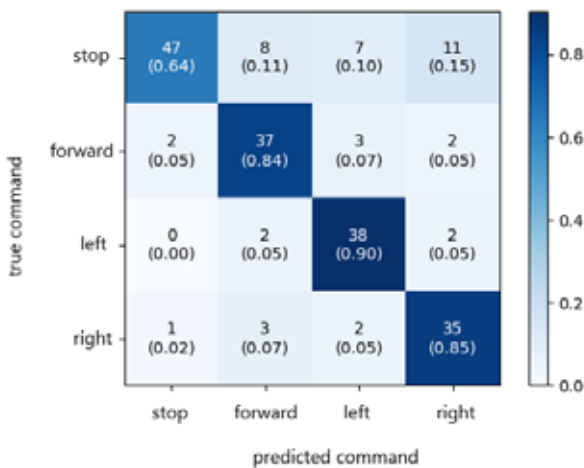
а)



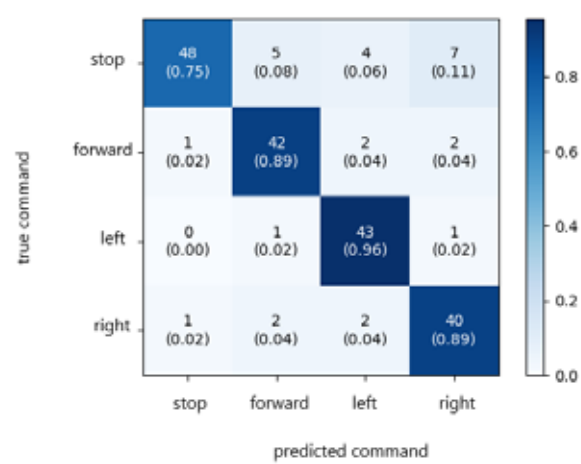
б)

Рис. 6. Архітектура мережі CNN (а) та криві навчання (б)

лено, що класифікатор ЕЕГ-сигналів на основі згорткової мережі показав кращі результати порівняно з класифікатором на багатошаровому перцептроні (точність на моделі CNN 86,07%, проти 78,5% на моделі MLP). Проте обчислювальна складність глибокої нейронної мережі



а)



б)

Рис. 7. Таблиця помилок MLP-моделі (а) та CNN-моделі (б)

CNN є істотно вищою як у режимі навчання, так і в режимі розпізнавання. Оскільки на практиці CNN-модель показала кращий результат, її використано для керування колісною платформою.

Як видно з результатів експерименту, нейрокомп'ютерна система управління демонструє доволі високу точність, враховуючи клас складності задачі. З метою подальшого підвищення точності автори вважають за доцільне застосувати технологію автоенкодерів для виявлення та коригування аномалій у відфільтрованих EEG-сигналах. Такий підхід показав свою ефективність у системах біометричної ідентифікації, що базуються на аналізі іншого виду біосигналів – електрокардіограм [XXX].

Висновки. Застосовано парадигму глибокого навчання до створення інтерфейсу «мозок-комп'ютер». Представлено прототип власної нейрокомп'ютерної системи керування, який включає такі три компоненти: шолом із платформою Open BCI Cyton, BCI-сервер на основі персо-

нального комп'ютера і колісний робот із бортовим комп'ютером Raspberry Pi. Передавання зареєстрованих засобами Open BCI Cyton 16-канальних EEG-записів на BCI-сервер здійснюється протоколом Bluetooth, а для комунікації між роботом та BCI-сервером застосовано стандарт WiFi.

Основним доробком є створення та дослідження двох варіантів реалізації нейрокласифікаторів – на основі багат шарового перцептрона та згорткової нейронної мережі. Обидва експерименти показали досить високі результати: точність декодування команд з EEG-сигналів із тестової вибірки становила 90,18% для багат шарового перцептрона і 93,89% – для згорткової мережі. Точність виконання команд керування в режимі експлуатації дещо знизилася (майже на 12% на моделі MLP і на 8% на моделі CNN). Хоча нейрокласифікатор на згортковій мережі забезпечує вищу точність, в аспекті обчислень є складнішим, а також час його навчання майже втричі триваліший.

Список літератури:

1. Hippe Z.S., Kulikowski J.L., Mroczek T., Wtorek J. Human-Computer Systems Interaction: Backgrounds and Applications. *Kacprzyk J. (eds) Advances in Intelligent Systems and Computing Vol. 300*, Springer, Switzerland, 2014.
2. Wolpaw, J.R.; Birbaumer, N.; McFarland, D.J.; Pfurtscheller, G.; Vaughan, T.M. Brain-computer interfaces for communication and control. *Clin. Neurophysiol.* 2002, 113, 767–791.
3. Abdulkader S.N., Atia A., Mostafa M-S.M. Brain computer interfacing: Applications and challenges. *Egypt. Informatics J.* Vol. 16 (2), 2015, 213–230.
4. Padmavathi, R., Ranganathan, V. A review on EEG based brain computer interface systems. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* 2014, 4, 683–696.
5. Kalshetti U., Goel A., Srivastava P., Ingole M., Bhide D. Human Authentication from Brain EEG Signals using Machine Learning. *Int. J. Pure and App. Math.*, 2018, Vol. 118 (24), 1–7.
6. Subha D.P., Joseph P.K., Acharya R., Lim C.M. EEG signal analysis: A survey. *J. Med. Syst.* 2010, 34, 195–212.
7. Nguyen P.T. On EEG-based Person Recognition and Human Characteristics Classification. Dr Ph. Thesis, University of Canberra, 2015, 188 p.
8. Georgieva P., Silva F., Milanova M., Kasabov N. (2014) EEG Signal Processing for Brain-Computer Interfaces. *Kasabov N. (eds) Springer Handbook of Bio-Neuroinformatics*. Springer, Berlin, Heidelberg.
9. Minguillona J., M. Lopez-Gordoc A., Pelayo F. Trends in EEG-BCI for daily-life: Requirements for artifact removal. *Biomed. Sign. Proces. & Contr.*, 2017, 31, 407–418.
10. EEG Front-End Performance Demonstration Kit. Texas Instruments. *User's Guide*. SLAU443B–May 2012–Revised January 2016.
11. Uktveris, T., Jusas, V. Development of a Modular Board for EEG Signal Acquisition. *Sensors*, 2018, 18, 2140.
12. Хома В.В., Хома Ю.В., Сабодашко Д.В., Хома П.П. Автоенкодери для опрацювання промахів сигналів ЕКГ у системі біометричної автентифікації. *Штучний інтелект*. 2019. № 1-2. С. 101–110.
13. American Electroencephalographic Society Guidelines for Standard Electrode Position Nomenclature. *Journal of Clinical Neurophysiology*. 1991. 8 (2): 200–202.
14. Seonwoo, M., Byunghan, L., Sungroh, Y. Deep learning in bioinformatics. *Briefings in Bioinformatics*, Vol. 18(5), 2017, p. 851–869.
15. Belo, B., Rodrigues, J., Vaz, J.R., Pezarat-Correia P., Gamboa, H. Biosignals learning and synthesis using deep neural networks. *BioMed Eng OnLine*, 2017, 1–17.
16. Ковальчук А.М., Марчук Г.В., Марчук Д.К. Застосування згорткової нейронної мережі для розпізнавання рукописних символів. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського*. 2019. Том 30 (69), ч. 1. № 4. С. 68–73.
17. Kawala-Sterniuk, A., Podpora, M., Pelc, M., Blaszczyzyn, M., Gorzelanczyk, E.J., Martinek, R., Ozana, S. Comparison of Smoothing Filters in Analysis of EEG Data for the Medical Diagnostics Purposes. *Sensors*. 2020, 20, 807.
18. Open BCI Documentation. Cyton Board. URL: <https://docs.openbci.com/docs/02Cyton/CytonLanding>.

Khoma Yu.V., Mykytyn I.P., Artemuk S.I., Brydinskyi V.A. NEUROCOMPUTER CONTROL SYSTEM BASED ON OPEN BCI PLATFORM AND DEEP NEURAL NETWORKS

The brain-computer interface is a powerful communication tool between humans and technical systems. The potential applications of neurocomputer interfaces are quite wide: from games and entertainment to neuroergonomic control of technical objects. Especially important is the development of mobile robots controlled by brain signals. Such systems can help people with neuromuscular disorders to move and thus improve their quality of life. Thanks to technological advances, simple and convenient ways of EEG signals acquisition have become available at this time. Therefore, the key task of creating a neurocomputer robot control system is the effective conditioning of the recorded signals followed by pattern recognition. The paper describes the essence of the neurocomputer interface operating process, as well as presents a prototype of the custom neurocomputer control system, which includes a helmet based Open BCI Cyton platform, BCI-server based on a personal computer and, in fact, a wheeled robot with a single-board computer Raspberry Pi. The transmission of 16-channel EEG recordings registered by Open BCI Cyton to BCI-server is carried out via Bluetooth protocol, and the WiFi standard is used for communication between the robot and BCI-server. The main task was to create and investigate the possibility of using deep learning techniques for the classification of filtered signals that represent the frequency band of Alpha waves of encephalograms. The software architecture, data flow, and operating details of system functioning are presented in the paper. Also, two alternative implementations of neuroclassifier based on a convolutional neural network and a multilayer perceptron are investigated. EEG signal filtering and their classification are performed on BCI-server. The neuroclassifier based on the convolutional network has shown higher accuracy but requires more computing resources for its implementation.

Key words: EEG signals, brain-computer interface, deep learning, convolutional neural network, multilayer perceptron.

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 662.995:662.997

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/19>

Беляновська О.А.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Пустовой Г.М.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Суша І.В.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Скляренко О.І.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Сухий М.П.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Губинський М.В.

Національна металургійна академія України

Сухий К.М.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АДСОРБЦІЙНОГО ХОЛОДИЛЬНОГО МОДУЛЯ ПАРОВОЇ КОМПРЕСІЙНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Розглянуто заходи з утилізації низько-потенційної теплової енергії під час експлуатації парових компресійних холодильних установок. Запропонована схема парової компресійної холодильної установки з адсорбційним холодильним модулем, який включає холодильну камеру, адсорбер, випарник та конденсатор. Холодильним агентом в адсорбційному холодильному модулі запропоновано використовувати воду. Розроблена процедура розрахунку експлуатаційних характеристик адсорбційного холодильного модуля, яка включає визначення маси води, маси адсорбенту, холодопродуктивності та холодильного коефіцієнта. Оцінено холодопродуктивність та холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля в умовах експлуатації типової пароконпресійної холодильної установки. Проаналізовано основні фактори, які впливають на ефективність адсорбційного холодильного модуля. Встановлено, що холодопродуктивність та холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля визначаються тепловим навантаженням на конденсатор, і отже, масою води, яка десорбується та випаровується. Оцінено холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля, який дорівнює 0,878. Розглянуто критерії підбору адсорбентів для адсорбційного модуля – температура регенерації, яка визначається температурами в конденсаторі, та гранична адсорбція, яка визначає масу адсорбенту та розміри адсорбера. Порівняно ефективність адсорбційних холодильних модулів на основі силікоалюмофосфатів та композитних адсорбентів «силікагель – натрій ацетат». Показана перспективність використання композитів «силікагель – CH_3COONa ». Встановлено оптимальний склад композиту, який відповідає мінімальним розмірам адсорбера, 80% натрій ацетату та 20% силікагелю. Показана перспективність використання адсорбційного перетворення теплової енергії для утилізації низько-потенційної теплової енергії під час експлуатації парових компресійних холодильних установок.

Ключові слова: адсорбційне перетворення теплової енергії, композитний адсорбент, парова компресійна холодильна установка, адсорбція, адсорбційна ємність.

Постановка проблеми. Для охолодження та зберігання сільськогосподарської продукції велике поширення отримали парові компресійні холодильні установки, в яких холодильним агентом є рідини з низькими температурами кипіння. Практичне використання отримали переважно різні фтор-хлор-бром-похідні метану та етану, а також пропану та бутану (так звані хладони, або фреони) [1, с. 991; 2, с. 834]. Подібні системи включають випаровувач, де відбувається відведення теплоти від охолоджуваного середовища, компресор, який стискає пари холодоагента, конденсатор, в якому відбуваються охолодження холодоагента та відведення теплоти від холодоагента до навколишнього середовища, та дросель [1, с. 196]. Подібні системи є інтенсивними споживачами електричної енергії, особливо в літній період. Крім того, під час їх експлуатації доволі значна кількість теплоти викидається до навколишнього середовища, що призводить до теплового забруднення.

Це стимулює розробку заходів для утилізації низько-потенційної теплової енергії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перспективним рішенням є адсорбційне перетворення теплової енергії, зокрема, адсорбційні холодильні установки. Основними елементами їх конструкції є сонячний колектор, адсорбер, конденсатор та випаровувач, який встановлено біля холодильної камери [3, с. 2]. Зазвичай адсорбційна холодильна установка працює в дві стадії: адсорбція та випаровування холодоагента, яка сприяє зниженню температури в холодильній камері, та регенерація адсорбенту, тобто десорбція холодоагента та його конденсація.

Одним з перспективних холодоагентів завдяки екологічній безпеці та нетоксичності є вода. Як адсорбенти пропонувались різні типи силікагелів [3, с. 3; 4, с. 8; 5, с. 86], цеолітів [6, с. 520; 7, с. 1120], металоорганічних координаційних полімерів MOF [8, с. 3] та композитних матеріалів типу «сіль у поринній матриці» [9, с. 1; 10, с. 100].

Вочевидь, ключовим фактором, який впливає на конструктивні характеристики та ефективність адсорбційної холодильної установки, є властивості адсорбенту.

Доцільно розглянути можливість впровадження адсорбційного модуля до парової компресійної холодильної установки.

Постановка завдання дослідження. Метою дослідження є встановлення експлуатаційних характеристик адсорбційного холодильного модуля парової компресійної холодильної уста-

новки. Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання:

- розробити процедуру розрахунку конструктивних характеристик модуля;
- виявити основні критерії підбору адсорбенту;
- оцінити ефективність адсорбційного холодильного модуля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Схема запропонованої установки представлена на рис. 1. Така система включає два контури. Перший, який відповідає традиційній парокомпресійній холодильній установці, включає компресор 1, конденсатор 2, дросель 3 та випаровувач 4. Як холодильний агент у першому контурі пропонується використовувати будь-який традиційний холодоагент, наприклад, R407C. Другий контур включає адсорбер 5, заповнений адсорбентом, в якому розміщено теплообмінник 6, додаткову холодильну камеру 7, конденсатор 8 та випаровувач 9. У другому контурі як холодоагент пропонується використовувати воду.

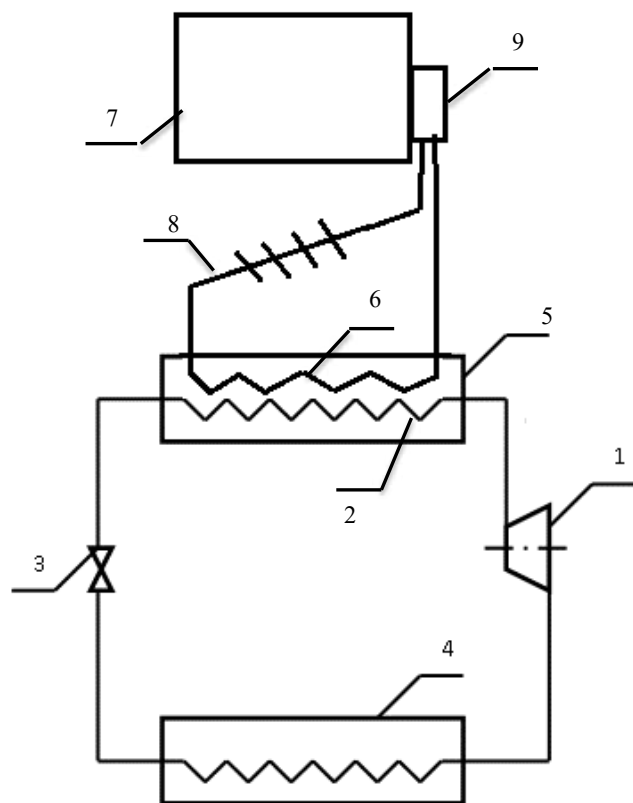


Рис. 1. Схема парової компресійної холодильної установки з адсорбційним модулем

На відміну від традиційних установок, цикл теплоти від конденсатора 2 пропонується використовувати для підігріву адсорбенту та його регенерації.

Адсорбційний холодильний модуль працює відповідно до термодинамічного циклу, який наведено на рис. 2.

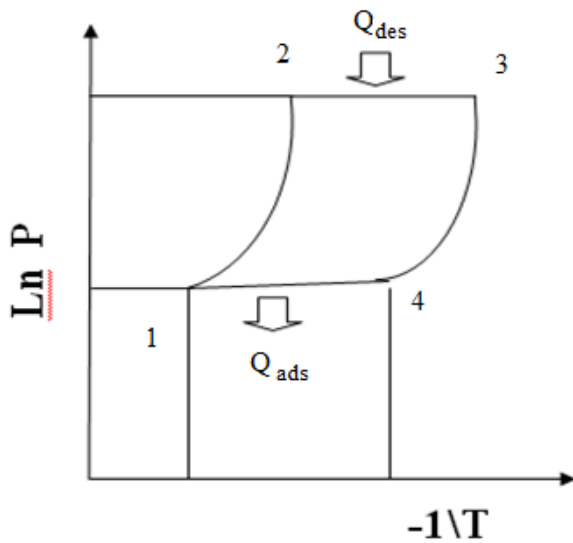


Рис. 2. Робочий цикл адсорбційного холодильного модуля [11]

Регенерацію адсорбенту, тобто десорбцію та конденсацію води, зображують лінії 1 – 2 – 3, а отримання холоду, тобто адсорбцію та випаровування води, – лінії 3 – 4 – 1.

Експлуатація адсорбційного холодильного модуля здійснюється в два етапи – отримання холоду та регенерації адсорбенту. На першому етапі пари води дифундують через конденсатор 8 до адсорбера 5. Адсорбція води адсорбційним матеріалом сприяє її випаровуванню у випарнику, що створює холодильний ефект у додатковій холодильній камері 7. На другому етапі нагрівають адсорбент, використовуючи теплоту конденсації. Вода десорбується та збирається в конденсаторі 8, далі зливається у випарник 9 і починається процес отримання холоду.

Вочевидь, ключовим фактором, який визначає ефективність роботи адсорбційного модуля, є перш за все властивості адсорбенту, зокрема його адсорбційна ємність та температура регенерації. Водночас вибір адсорбентів за цими критеріями обмежено експлуатаційними характеристиками парових компресійних холодильних установок.

Так, відповідно до результатів розрахунку за традиційною методикою під час експлуатації типової парокомпресійної холодильної установки холодопродуктивністю 322,7 кВт теплове навантаження на повітряний конденсатор становить

434,18 кВт за температури конденсації на рівні 40 °С. Іншим технічним рішенням є використання як конденсатора зануреного кожухотрубчастого теплообмінника, в якому холодоагент буде передавати теплоту перегріву та конденсації теплоносію, тобто воді, яка буде циркулювати в системі теплопостачання. При цьому холодильний коефіцієнт становить 3,56. За умови температури холодоагента в конденсаторі на рівні 70°С теплове навантаження на конденсатор становитиме 484,7 кВт. Холодильний коефіцієнт такої установки знижується до 2,8.

Далі проведено розрахунок адсорбційного модуля, маси води та холодопродуктивності додаткової холодильної камери. Розрахунок проводився відповідно до методики, яка є зворотною до розробленої в [11, с. 39].

На першій стадії пропонується проводити розрахунок маси води:

$$M_{H_2O} = \frac{Q_1 \cdot \tau}{\Delta H_{des}} \quad (1)$$

де M_{H_2O} – маса води, кг; Q_1 – теплове навантаження на конденсатор, кВт; τ – тривалість циклу, с; ΔH_{des} – теплота десорбції, кДж/кг.

Далі проводиться розрахунок маси адсорбенту як відношення маси води до граничної адсорбції:

$$M_{ads} = \frac{M_{H_2O}}{A_{max}} \quad (2)$$

де M_{ads} – маса адсорбенту, кг; A_{max} – гранична адсорбція, кг/кг; M_{H_2O} – маса води, кг.

Далі проводиться розрахунок кількості теплоти, яку відведено від холодильної камери:

$$Q_2' = (M_{H_2O} \cdot \Delta H_{ev}) / \tau \quad (3)$$

де Q_2' – кількість теплоти, яку відведено від додаткової холодильної камери, кВт; M_{H_2O} – маса води, кг; ΔH_{ev} – питома теплота випаровування, кДж/кг; τ – тривалість циклу, с.

Холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля пропонується визначати як відношення кількості теплоти, яку відведено від додаткової холодильної камери, до теплового навантаження на конденсатор.

Враховуючи температуру в конденсаторі, доцільно використати адсорбенти з температурою регенерації близько 60 °С. Цим вимогам відповідають силікоалюмофосфати [12, с. 87] та композитні адсорбенти «силікагель – натрій ацетат» [13, с. 82].

Результати розрахунків наведені в таблиці 1.

Експлуатаційні характеристики адсорбційного холодильного модуля

Адсорбент	M_{H_2O} , кг	A_{max} , кг	M_{ads} , кг	Q_2'	Холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля, ϵ
Силікоалюмофосфат [12]	306,13	0,250	1224,51	425,35	0,878
Композит «Силікагель (20%) – натрій ацетат (80%)» [14]	306,13	0,756	404,93	425,35	0,878
Композит «Силікагель (40%) – натрій ацетат (60%)» [14]	306,13	0,596	513,63	425,35	0,878
Композит «Силікагель (60%) – натрій ацетат (40%)» [14]	306,13	0,462	662,61	425,35	0,878
Композит «Силікагель (80%) – натрій ацетат (20%)» [14]	306,13	0,33	927,66	425,35	0,878

Тепловому навантаженню на конденсатор 484,7 кВт за умови тривалості адсорбційного циклу 1 год. відповідає маса води 306,13 кг. Холодопродуктивність та холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля для силікоалюмофосфатів та композитів «силікагель – натрій ацетат» залишаються практично ідентичними, оскільки вони визначаються перш за все тепловим навантаженням на конденсатор, що визначає масу води, яка випаровується. Але маса адсорбенту визначається, вочевидь, граничною адсорбцією.

Найменша гранична адсорбція та максимальна маса адсорбенту відповідають адсорбційному модулю на основі силікоалюмофосфату, який є найменш ефективним.

Дещо менша маса адсорбенту, яка необхідна для поглинання заданої кількості води, встановлена для композиту, який містить 80% силікагелю та 20% натрій ацетату. Зростання вмісту солі, яка утворює кристалогідрат, тобто натрій ацетату, сприяє підвищенню граничної адсорбції, отже, зменшенню маси адсорбенту. Найменша маса адсорбенту, а отже, об'єм адсорбційного модуля відповідає композиту, який містить 20% силікагелю та 80% натрій ацетату, який доцільно використовувати як адсорбційний матеріал.

Висновки. Розглянуто процеси утилізації низько-потенційної теплової енергії під час експлуатації парових компресійних холодильних установок. Запропонована схема парової компресійної холодильної установки з адсорбційним холодильним модулем.

Оцінено холодопродуктивність адсорбційного холодильного модуля в умовах експлуатації типової пароконпресійної холодильної установки. Показано, що холодопродуктивність та холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля визначаються тепловим навантаженням на конденсатор, отже, масою води, яка десорбується та випаровується.

Розглянуто критерії підбору адсорбентів для адсорбційного модуля – температура регенерації, яку визначають температури в конденсаторі, та гранична адсорбція, яка визначає масу адсорбенту та розміри адсорбера.

Оцінено ефективність адсорбційних холодильних модулів на основі силікоалюмофосфатів та композитних адсорбентів «силікагель – натрій ацетат». Підтверджено перспективність використання композитів «силікагель – CH_3COONa ». Встановлено оптимальний склад композиту, який містить 80% натрій ацетату та 20% силікагелю, що відповідає мінімальним розмірам адсорбера.

Список літератури:

1. Мааке В., Эккерт К.-Ю., Кошпен Ж.Л. Учебник по холодильной технике. Москва : Издательство Московского университета, 1998. 1142 с.
2. Calm J.M. Comparative efficiencies and implications for greenhouse gas emissions of chiller refrigerants. *International Journal of Refrigeration*. 2006. Vol. 29. Pp. 833–841
3. Rouf R.A., Jahan N., Alam K.C.A., Sultan A.A., Saha B.B., Saha S.C. Improved cooling capacity of a solar heat driven adsorption chiller. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020. Vol. 17. Pp. 100–568.
4. Mohamed M. Younes, Ibrahim I. El-Sharkawy, A.E. Kabeel, Kutub Uddin, Takahiko Miyazaki, Bidyut Baran Saha. Characterization of silica gel-based composites for adsorption cooling applications. *International*

- Journal of Refrigeration*. 2020. In Press. Journal Pre-Proof. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.04.002>.
5. Wang D., Zhang J., Tian X., Liu D., Sumathy K. Progress in silica gel – water adsorption refrigeration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, Vol. 30, Pp. 85–104.
 6. Wang L.W., Wang R.Z., Oliveira R.G.A. Review on adsorption working pairs for refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. Pp. 518–534.
 7. Kayal S., Baichuan S., Saha B.B. Adsorption characteristics of AQSOA zeolites and water for adsorption chillers. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2016. Vol. 92. P. 1120–1127.
 8. Palash M.L., Jahan I., Rupam T.H., Harish S., Saha B.B. Novel technique for improving the water adsorption isotherms of metal-organic frameworks for performance enhancement of adsorption driven chillers. *Inorganica Chimica Acta*. 2020. Vol. 501, Pp. 119–313.
 9. Aprile M., Freni A., Toppi T., Motta M. Modelling and Performance Assessment of a Thermally-Driven Cascade Adsorption Cycle Suitable for Cooling Applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020. Journal Pre-proofs. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100602>.
 10. Belyanovskaya E., Pustovoy G., Sukhyy M.P., Sukhyy K.M., Lytovchenko R. Performance evaluation of adsorptive refrigerators based on composite adsorbents “silica gel – sodium sulphate” and “silica gel – sodium acetate”. *Scientific Works*. 2019. Vol. 83(2). Pp. 96–101.
 11. Беляновская Е.А., Пустовой Г.Н., Сухой К.М., Коломиец Е.В., Сухой М.П. Адсорбционные холодильные установки на основе композитных адсорбентов «силикагель – сульфат натрия». *Вісник Національного технічного університету «ХПИ» Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2018. № 39(1315). С. 38–42.
 12. Freni A., Maggio G., Sapienza A., Frazzica A., Restuccia G., Vasta S. Comparative analysis of promising adsorbent/adsorbate pairs for adsorptive heat pumping, air conditioning and refrigeration. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 104, Pp. 85–95.
 13. Sukhyy K.M., Belyanovskaya E.A., Sukha I.V., Kolomiyets E.V., Gavrilko A.V., Sukhyy M.P. Solar Adsorptive Chiller based on Composite Sorbent “Silica Gel – Sodium Acetate”, synthesized by Sol – Gel Method. *Вопросы химии и химической технологии*. 2015. Т. 6 (104). С. 80–86.
 14. Sukhyy K., Belyanovskaya E., Kovalenko V., Kotok V., Sukhyy M., Kolomiyets E., Gubynskiy M., Yerin O., Prokopenko O. The study of properties of composite adsorptive materials “silica gel – crystalline hydrate” for heat storage devices. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 91, No. 1. Pp. 52–58. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.123896.

Belyanovskaya E.A., Pustovoy G.N., Sukha I.V., Sklyarenko A.I., Sukhyy M.P., Gubynskiy M.V., Sukhyy K.M. OPERATING PARAMETERS OF ADSORPTIVE CHILLING UNIT OF VAPOR COMPRESSION MACHINE

Methods for utilization of low-potential thermal energy were studied when vapor compression machine operated. The scheme of a vapor compression refrigerator with an adsorptive chilling unit, which includes a refrigerating chamber, an adsorber, an evaporator and a condenser, has been suggested. As a refrigerant in the adsorptive chilling unit, water is proposed. The procedure for calculation of the operational characteristics of the adsorption chilling unit is proposed. It includes the calculation of value of water mass, adsorbent mass, refrigeration capacity and coefficient of energy performance. The refrigeration capacity and the coefficient of energy performance of the adsorption chilling unit are estimated under conditions of operating a standard compressor refrigeration machine. The main factors affecting the efficiency of the adsorptive chilling unit were analyzed. It has been stated that the refrigeration capacity and coefficient of performance of the adsorptive chilling unit are based on the heat supply to the condenser, and also with a mass of water, which is desorbed and vaporized. The coefficient of performance of the adsorptive chilling unit is estimated to be of 0.878. The choice criteria for an adsorbent for the adsorptive unit are substantiated to be a temperature of the regeneration, as determined by the temperatures in the condenser, and a maximal adsorption which determined an adsorbent mass. Adequate efficiency of adsorptive chilling units based on silicoaluminophosphates and composite adsorbents “silica gel – sodium acetate” is stated. Perspective of composites “silica gel – CH₃COONa” is confirmed. An optimal composition for the composite corresponded with the minimal size for the adsorber is stated to be of 80% sodium acetate and 20% for silica gel. The perspectives of the adsorptive conversion of thermal energy for the utilization of low-potential thermal energy during the operation of steam compression refrigeration machines are shown.

Key words: adsorptive conversion of thermal energy, composite adsorbent, vapor compression chilling machine, adsorption, maximal adsorption.

Гулей О.Б.

Українська інженерно-педагогічна академія

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО ВУГІЛЛЯ УКРАЇНСЬКОГО ВИДОБУТКУ ДЛЯ ПАРОКИСНЕВОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ В СТАЦІОНАРНОМУ ШАРІ

Метою роботи є дослідження можливості вибору оптимальної марки вугілля українського видобутку для ефективної внутрішньоциклової газифікації його у бінарному термодинамічному циклі на ТЕС.

На підставі результатів літературного огляду з теми дослідження показано, що в дослідженнях технологій газифікації вугілля для отримання газового енергетичного палива вплив складу вихідного вугілля, як правило, не був предметом спеціального розгляду. Тому зроблено висновок, що натепер відсутній універсальний, заснований на системному підході метод попереднього вибору енергетичного вугілля для наперед заданої технології газифікації.

Предметом дослідження є вплив складу вихідного вугілля на склад генераторного газу і його основні теплотехнічні характеристики, що дає підставу для подальшого вибору оптимального за складом вугілля.

Як критерій оптимальності вибору запропоновано використовувати величину хімічного коефіцієнта корисної дії (ККД) процесу газифікації, а також сумарну чутливість цього ККД до зміни вмісту компонентів складу вугілля залежно від неоднорідності цього складу.

Як інструмент дослідження автором використано метод оцінки складу генераторного газу – алгебраїчний метод Дешаліта. Метод дає змогу розрахунковим шляхом отримувати кількісні оцінки складу продуктів газифікації залежно від характеристик складу вихідного вугілля, складу дуття, температури та тиску в газогенераторі. Допущення в методі Дешаліта, як показав досвід, не призводять до суттєвих помилок отриманих оцінок.

На прикладі поширених марок енергетичного вугілля математичним моделюванням процесу газифікації (технологія «Лургі») отримані характеристики газового палива, на підставі яких можна зробити вибір оптимальної марки вихідного вугілля.

Ключові слова: вугілля, генераторний газ, газогенератор, дуття, шар, хімічний ККД, питома теплота згорання, температура, тиск, вихід газу, склад, зольність, вологість.

Постановка проблеми. Природний газ має великі технологічні переваги перед іншими видами палива на теплових електричних станціях (ТЕС). Це практично єдиний вид палива, придатний для безпосереднього використання в газотурбінних енергетичних установках (ГТУ) блоків парогазових установок (ПГУ) на ТЕС.

Тому актуальною стає проблема заміни імпортованого природного газу штучним газовим паливом. Таким паливом є горючі газові суміші, що одержані в результаті газифікації вугілля [1, с. 5, 27, 163; 2, с. 5, 21].

Апарати, призначені для газифікації, називають газогенераторами, гази, що виробляються в них – генераторними газами.

Сировиною для газифікації може служити вугілля з великим діапазоном відмінності характеристик, у тому числі і низькоякісне. Зазначимо, що в українських родовищах велика частка запасів припадає на вугілля з високим вмістом золи, сірки, важких металів, а крім того, в країні накопичено великі обсяги відходів вуглевидобутку та збагачення вугілля [1, с. 159].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Є багато технологій газифікації вугілля [1; 2; 4], але нині більшість їх не виходить за межі дослідних зразків, тому розглянемо такі, що найбільш поширені на практиці і мають тривалу історію застосування.

Так, у промисловому масштабі широко освоєно технологію «Лургі» – газифікацію кускового палива в стаціонарному шарі під тиском від 2,0 МПа до 3,0 МПа і температурі процесу до 1200 °С на парокисневому або пароповітряному дутті [4, с. 395]. Зазначимо, що зараз у світі в експлуатації більше 140 генераторів за схемою «Лургі».

Газифікація в киплячому розрідженому шарі – технологія «Вінклера» (нині в світі працює до 50 газифікаторів) – за часом застосування одна з найстаріших. Паливо дрібнозернисте (розмір частинок менше 10 мм). Процес йде за атмосферного тиску і температури до 1100 °С [4, с. 396].

Технологія за методом “Shell” – газифікація в потоці пилоподібного вугілля сухим шляхом. Шлаковидалення в рідкому вигляді. Тиск – 3,1 МПа. Температура потоку від 1400 °С до 1500 °С [1, с. 141].

Технологія газифікації вугілля може бути економічно ефективною у разі використання дешевого вугілля і застосування комплексних газохімічних схем процесу, а також у разі наближення виробництва до місць видобутку вугілля [1, с. 149; 3, с. 139]. Для України необхідні вугільні енерготехнології, які дадуть змогу використовувати високозольне ($A^p > 35\%$) низькорекційне вугілля, а також відходи вуглевидобутку і вуглезбагачення з A^p від 35% до 65% і високим вмістом сірки [1, с. 165; 2; 6]. Тут газифікація виступає процесом збагачення високобаластного вугілля.

Підвищити технологічні показники генерації на ТЕС можна у разі використання бінарного термодинамічного циклу в ПГУ з внутрішньоцикловою газифікацією вугілля [1, с. 167; 6]. Спалювання газу відбувається в камері згоряння ГТУ і забезпечує більш високі температури робочого тіла порівняно з паровим циклом. У ПГУ ККД (нетто) досягає до 48%. До речі, ТЕС на базі ПГУ відповідають жорстким екологічним вимогам.

На ефективність процесу газифікації суттєво впливають хімічні і фізичні властивості палива [2, с. 82; 5, с. 35]. Характер цього впливу в загальному випадку досить суперечливий, важко піддається систематизації. Так, для газифікації вугілля з рідким шлаковидаленням низька температура плавлення золи є позитивним фактором. А у разі газифікації в шарових газогенераторах з мокрим золовидаленням бажано отримати тугоплавку золу.

У разі газифікації низькорекційного вугілля в газогенераторі температура повинна бути не менше 1000 °С, що необхідно для потрібної продуктивності процесу. А для високосірчаного вугілля переважні методи газифікації, які обмежують температури в газогенераторі рівнем, що забезпечує ефективне зв'язування сірки з допомогою присадок доломіту і вапняку.

Таким чином, можна стверджувати, що вимоги до вибору вугілля значною мірою визначаються способом газифікації.

Для довідки доцільно звернутися до ГОСТ 25543-88 [8] (скасований з 01.01.2019), де наведено класифікацію вугілля, яке придатне для виробництва змішаного генераторного газу на газогенераторах стаціонарного типу. Це вугілля таких марок, груп і підгруп: Б, ЗБВ, ЗБФ; ДГ, ДГФ; КС, 1КС, 2КС, 1КСВ, 1КСФ, 2КСВ, 2КСФ; ГЖО, 1ГЖО, 1ГЖОФ; СС, 2СС, 3СС; ПЗ, ПСВ; П, 1Т, 1ТВ. Як видно з переліку, для газифікації придатне широке коло марок вугілля, що суттєво розрізняються за характеристиками.

Таким чином, для вибору оптимальної марки вугілля замовник, виходячи на ринок і знаючи характеристики заданої технології газифікації, повинен проаналізувати дані про вугілля багатьох марок і порівняти характеристики одержуваних з них газів, насамперед їх калорійність.

Відзначимо, що в рамках літературного пошуку за доступними джерелами нам не вдалося знайти спеціалізованої методики, налаштованої до виконання такого аналізу. Тому доцільно виділити низку публікацій, в яких придатність українського вугілля до газифікації розглядається більш системно, що важливо для подальшого аналізу.

Так, у роботі [9, с. 11] стверджується, що методам газифікації підвладне все вугілля, починаючи від бурого і до антрациту. Наведені практичні результати газифікації вугілля марок ГЖ і бурого вугілля. Також згідно з [6] уже відпрацьовані на практиці технології газифікації вугілля, включаючи "Shell" [11], які підходять для всіх типів вугілля.

У роботі [10], говорячи про плани будівництва в Україні заводів з газифікації вугілля за технологією "Shell", один з провідних науковців галузі висловлюється про те, що: «Мінеральна частина вугілля вітчизняного видобутку містить майже 23% окису заліза і лужноземельних елементів, тоді як австралійська і американська – лише від 3% до 5%; щодо сірки це відношення становить 3,5% порівняно з 0,5%». Тобто саме посередні характеристики українського вугілля є самостійною складною проблемою.

З іншого боку, достовірні запаси Львівсько-Волинського бурого вугілля – до 2 млрд. т. Після збагачення його можна було б ефективно газифікувати [12].

З результатів огляду за темою дослідження можна зробити висновок, що нині в Україні немає методики попереднього вибору оптимального вихідного вугілля для газифікації на ТЕС. Тому залишається актуальним питання вибору вугілля за умови, що технологія газифікації вже задана.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методу вибору марки оптимального вугілля для газифікації. Метод базовано на математичній моделі газифікації вугілля за заданою технологією в газогенераторі.

Математичне моделювання процесу виконується на основі апріорної інформації про склад робочої маси вихідного вугілля і режимні характеристики газогенератора. Характеристики шуканого вугілля повинні задовольняти запропонованому в роботі критерію оптимальності – хімічному ККД процесу газифікації та чутливості його до змін вмісту вихідного палива.

Виклад основного матеріалу дослідження.

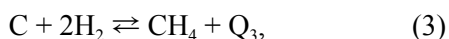
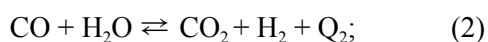
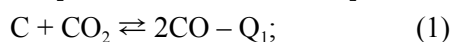
У роботі розглянуто варіант парокисневої газифікації в стаціонарному шарі вугілля під тиском, яка дає змогу застосовувати більшість марок вугілля й отримувати хімічні продукти з мінімальною кількістю стадій переробки. Такий процес на практиці масово реалізований у технології «Лургі» [1, с. 1; 3, с. 126; 4, с. 395; 5, с. 19, с. 29; 6; 14, с. 45].

У процесі газифікації більшість органічної маси палива перетворюється на газ і також утворюються смолопродукти і бензин [3, с. 121; 5, с. 119; 14].

Реакції взаємодії водяної пари з вуглецем і сумарні процеси газифікації є ендотермічними. Джерелом тепла служить екзотермічна реакція часткового окислення вугілля, для чого в газогенератор подають парокисневу суміш.

Для розрахунку складу продуктів газифікації нами застосовано метод алгебри Дешалита, який базується як на положеннях хімічної кінетики, так і на результатах промислових випробувань газифікаторів [3, с. 133; 15, с. 14].

Під час газифікації на парокисневому дутті під тиском мають місце реакції, що визначають склад газу, що виходить [13, с. 133; 14; 15, с. 122]:



де Q_i – тепловий ефект відповідної реакції.

Тут передбачається, що горюча частина палива під час газифікації складається тільки з вуглецю C . Відзначимо, що на практиці вміст основних компонентів газу близький до розрахункових значень [3, с. 136; 15, с. 124].

За даними практичних досліджень [15, с. 122] приймаємо, що склад генераторного газу містить такі компоненти: CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O .

Замінюємо шуканий процентний вміст компонентів парціальними їх тисками. Тоді сума парціального тиску компонентів дорівнює загальному тиску газу, що утворився (цей тиск задає дуття):

$$P_{заг} = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{H_2} + P_{CH_4} + P_{H_2O}. \quad (4)$$

Константи рівноваги реакцій (1–3) розраховують за рівняннями:

$$\frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = K_1, \quad (5)$$

$$\frac{P_{CO_2} P_{H_2}}{P_{CO} P_{H_2O}} = K_2, \quad (6)$$

$$\frac{P_{CH_4}}{P_{H_2}} = K_3. \quad (7)$$

Для оцінки констант рівноваги реакцій K_j (5–7) Дешалітом зроблено припущення, що довідкові значення K_j , отримані за умови рівноваги цих реакцій, можна використовувати і в разі розрахунку газифікації. Згідно з [15, с. 17] це не призводить до суттєвих помилок.

Рівняння (8) складене, виходячи з того, що відношення вмісту водню до кисню в одержаному газі і в початковій газифікованій суміші не змінюється [3, с. 135; 15, с. 123]:

$$\frac{P_{H_2O}}{2P_{O_2} + P_{H_2O}} = D \quad (8)$$

Введемо такі позначення:

$$P_{H_2} = x; P_{CH_4} = t; P_{H_2O} = y; K_1 = B; P_{CO_2} = u; K_2 = A; K_3 = C; P_{CO} = z;$$

На підставі цих позначень рівняння (5–8) приймуть такий вигляд:

$$x + z + t + u + y = P_{заг};$$

$$\frac{z^2}{u} = B; \frac{ux}{zy} = A; \frac{t}{x^2} = C; \frac{2t + y + x}{2u + y + z} = D.$$

Після перетворень цих рівнянь одержимо два алгебраїчні рівняння:

$$x + \frac{xz}{AB} + z + \frac{z^2}{B} + Cx^2 - P_{заг} = 0; \quad (9)$$

$$x + zx \left(\frac{1-D}{AB} \right) - zD - \frac{2D}{B} z^2 + 2Cx^2 = 0, \quad (10)$$

де величина D є відношенням водню до кисню в дутті [3, с. 135].

Значення констант рівноваги залежно від температури для реакцій (1–3) наведені в [16, с. 162]. Вирішення одержаної системи рівнянь (9–10) одержують стандартним чисельним методом на ПЕОМ.

За розрахованими парціальними тисками компонентів газової суміші визначаємо їх відповідні вмісти. Оскільки генераторний газ на виході осушують, то $P_{H_2O} = 0\%$. Одержаний газ є сумішшю газів та пари у вигляді смолопродуктів і бензинів, які конденсуються за температури вище нуля [3, с. 136; 15, с. 126]. Їх вихід, а також втрати вуглецю з унесенням і провалом визначають з урахуванням даних експериментів [3, с. 127].

Питомий вихід (на 1 кг твердого палива) сухого газу V_{ce} , nm^3/kg розраховують за балансом вуглецю [3, с. 136; 15, с. 126].

Величина хімічного ККД є однією з вирішальних енергетичних характеристик процесу газифікації. Цей ККД характеризує ефективність перетворення теплоти вихідного вугілля в хімічно потенційне тепло генераторного газу. Ця ефективність визначається саме складом вугілля (вибору вугілля), на відміну від термічного ККД процесу, який залежить і від умов теплообміну топки з навколишнім середовищем [15, с. 73].

Хімічний ККД не залежить від того, які енергетичні втрати мають місце в такому газифікаторі у разі забезпечення заданих величин температури і тиску або втрати дуття у разі окислення шару палива. Кінетика хімічних реакцій не залежить від технологій забезпечення необхідних умов, але залежить від складу вихідного вугілля. Відзначимо, що в умовах заданого процесу газифікації вплив усіх витрат вуглецю на ці ККД порівняно.

Тому під час вибору вихідного вугілля як критерій ми використовуємо величину хімічного ККД, %, цього процесу, яку визначають за формулою [3, с. 138]:

$$\eta_{хим} = \frac{Q_{c.z.}^d \cdot V_{c.z.}}{Q_n^p} \cdot 100 \quad (11)$$

де $V_{c.z.}$ – вихід сухого газу, $\text{м}^3/\text{кг}$, $Q_{c.z.}^d$ – нижча теплота згорання сухого газу, $\text{кДж}/\text{м}^3$, Q_n^p – нижча теплота згорання вихідного вугілля, $\text{кДж}/\text{кг}$.

Довідкові дані щодо Q_n^p проєктного вугілля наведені в [17, с. 129].

Своєю чергою нижчу теплоту згорання $Q_{c.z.}^d$ газового палива, $\text{кДж}/\text{м}^3$ (сухого газу), визначають за законом адитивності за виразом:

$$Q_{c.z.}^d = \sum_j \left(\frac{C_j}{100} \right) Q_j \quad (12)$$

де C_j – молярна концентрація j -го горючого компонента в газовому паливі, %; Q_j – нижча теплота згорання j -го горючого компонента, $\text{кДж}/\text{м}^3$.

Нижчу теплоту згорання компонентів палива наведено в [17, с. 15].

За зміни складу вихідного вугілля нижчу теплоту згорання Q_n^p розраховують за формулою Д.І. Менделєєва:

$$Q_n^p = 339,1 C^p + 1055,6 H^p + 108,9 (S_{гор}^p - O^p) 24,42 W^p, \text{кДж}/\text{кг} \quad (13)$$

де C^p , H^p , O^p , $S_{гор}^p$, W^p – компоненти робочої маси вугілля.

Основні характеристики для моделювання газифікації в нашому дослідженні такі: температура процесу – 900°C ; тиск процесу (дуття) – $3,46 \text{ МПа}$; дуття з відношенням тиску водяної пари до кисню – $85:15$.

Результати розрахунків вмісту та нижчої теплоти згорання компонентів і теплоти згорання отриманого генераторного газу наведені в таблиці 1.

У таблиці 2 наведені розрахункові характеристики марок енергетичного вугілля українського видобутку для дослідження [17, с. 129].

Вихід сухого газу, теплота згорання і хімічний ККД газифікації для палива, отриманого з відповідного вихідного вугілля, наведені в таблиці 3.

За даними розрахунків, наведених у таблиці 3, можна зробити попередній вибір вугілля для заданої технології. Так, максимальний хімічний ККД $67,43\%$ має вугілля марки ПА Вуглегірського Східного родовища Донецького басейну. Мінімальний хімічний ККД $53,96\%$ має вугілля марки Ж, ОС, промпродукт Донецького басейну.

Але навіть для попередньої оцінки вибору вугілля даних про величину хімічного ККД газифікації не досить, значною мірою це пов'язано з особливістю вугілля – винятковою неоднорідністю складу і властивостей, незалежно від того, чи надійшло вугілля безпосередньо з пласта або це товарна проба. Також неоднорідність вугілля залежить від родовища [3, с. 217] і від багатьох природних і техногенних факторів [18, с. 20], надійний контроль яких на етапі поставок вугілля практично неможливий.

Тому, на наш погляд, на етапі вибору вугілля необхідно аналізувати вплив на хімічний ККД газифікації зміни вмісту компонентів вихідного вугілля. Для

Таблиця 1

Вміст і теплові характеристики компонентів генераторного газу, отриманого в процесі моделювання газифікації

Компоненти газу	CO_2	CO	CH_4	H_2	H_2O	Всього
Парціальний тиск P, МПа	0,434	1,295	0,216	1,045	0,464	3,455
Вміст газу (вологий), %	12,57	37,49	6,26	30,25	13,43	100
Вміст газу (сухий), %	14,52	43,30	7,23	34,95	0,00	100
Нижча теплота згорання компонентів газу, МДж/м ³	–	12,64	35,82	10,80	–	–
Складник до теплоти згорання компонентів газу, МДж/м ³	–	5,473	2,59	3,775	–	11,838

Таблиця 2

Розрахункові характеристики варіантів вугілля

№ вугілля в роботі / (за нормативом) Басейн	1/ (9) Донецький	2/ (11) Донецький	3/ (13) Донецький	4/ (24) Донецький	5/ (66) Львівський	6/ (65) Дніпровський
Марка, клас вугілля	Ж, Р	Ж, ОС, пром-прод.	П, Р	П, А	Г, Р, відсів	1Б, Р
W ^p , %	6,0	12,0	6,0	5,0	10,0	18,0
A ^p , %	30,1	37,0	32,0	24,7	27,0	17,9
S ^p _{сумарна} , %	2,5	2,6	2,2	2,4	2,8	3,6
C ^p , %	53,4	41,1	55,2	62,7	49,9	42,6
H ^p , %	3,3	2,7	2,5	3,7	3,3	3,7
N ^p , %	1,0	0,8	1,0	1,1	0,9	0,5
O ^p , %	3,7	3,8	1,1	1,4	6,2	13,7
Q ^p _{н.вуг.} , кДж / кг	21314	16364	21331	25154	19790	16812

Таблиця 3

Вихід сухого газу, теплота згорання і хімічний ККД газифікації для вугілля розрахункової характеристики

№ вугілля в роботі / норматив	1/ (9)	2/ (11)	3/ (13)	4/ (24)	5/ (66)	6/ (65)
Вихід сухого газу V _{св} , м ³ /кг	1,136	0,746	1,173	1,433	1,06	0,92
Теплота згорання газу, МДж/м ³	11,838	11,838	11,838	11,838	11,838	11,838
Нижча теплота згорання вугілля Q ^p _{н.вуг.} , кДж / кг	21314	16364	21331	25154	19790	16812
Хімічний ККД, η _{хім} , %	63,1	53,96	65,11	67,43	63,43	64,82

цього необхідно отримати кількісну оцінку зміни виходу моделі газифікації (хімічного ККД) у разі відхилення параметрів моделі (вмісту компонентів вихідного вугілля) від їх номінальних значень.

Сама зміна виходу математичної моделі у разі відхилення її параметрів характеризує чутливість моделі. А аналіз чутливості зводиться до оцінки хімічного ККД газифікації за умовою зміни вмісту компонентів вугілля.

Метод такого аналізу – імітаційне моделювання. За методом, змінюючи значення вмісту одного з компонентів з деяким кроком у разі постійних значень інших і щоразу перераховуючи результат (хімічний ККД), отримують функцію залежності чутливості ККД від вмісту компонентів палива. Перша похідна цієї функції по параметру – чутливість, кількісна оцінка якої називається коефіцієнтом чутливості моделі по параметру:

$$S_j = \frac{dy}{dx_j} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_j} \quad (14)$$

де S_j – коефіцієнт чутливості моделі у по параметру x_j.

На рис. 1–3 показані результати розрахунку чутливості хімічного ККД до зміни компонентів вихідного вугілля.

У таблиці 4 представлені результати розрахунку наведених функцій чутливостей хімічного

ККД газифікації до вмісту компонентів вихідного вугілля (вугілля в табл. 2). Тут величина Δx_j приймається рівною 0,01 x_j у формулах (14) для всіх варіантів палива, а величина x_j приймається для кожної j відповідно до вмісту вугілля з табл. 2.

Розрахунок наведених чутливостей виконують за формулою (15):

$$S_j^{нав} = \left(\frac{\Delta \eta}{\Delta x_j} \right) / C \quad (15)$$

де C – розрахунковий вміст вуглецю у вихідному паливі, %.

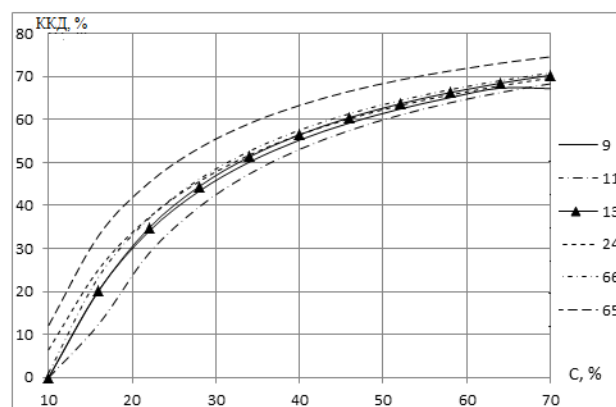


Рис. 1. Функції чутливості хімічного ККД вуглефікації до зміни вмісту вуглецю вихідного вугілля

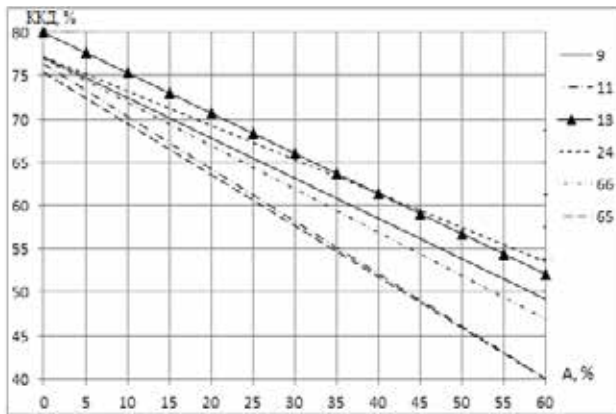


Рис. 2. Функції чутливості хімічного ККД вуглефікації до зміни вмісту зольності вихідного вугілля

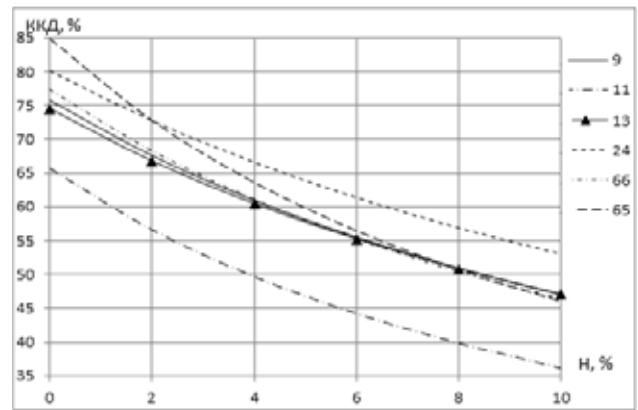


Рис. 3. Функції чутливості хімічного ККД вуглефікації до зміни вмісту водню вихідного вугілля

Таблиця 4

Наведені чутливості хімічного ККД (η) до вмісту компонентів вихідного вугілля (розрахунковий варіант)

№ вугілля	Марка вугілля	Хім. ККД, η , %	Наведені чутливості η до вмісту компонентів вугілля					Сумарна
			$d\eta/dW \times W/C$	$d\eta/dA \times A/C$	$d\eta/dS \times S/C$	$d\eta/dC$	$d\eta/dH \times H/C$	
1	Ж, Р	63,11	0,0007	13,9834	1,0013	23,6022	-10,9207	-0,0432
2	Ж, ОС	53,96	-0,0062	-22,3895	-1,1998	30,3025	9,3471	-0,0642
3	П, Р	65,11	-0,0004	-14,8547	-0,9002	24,0341	7,8748	0,0073
4	П, А	67,43	-0,0001	-9,7231	-0,8586	22,0247	11,3937	0,0008
5	Г, Р	63,43	-0,0012	-13,5092	-1,2169	25,4956	16,9492	-0,0217
6	ІБ	64,82	-0,0021	-10,5427	-1,8704	23,2848	16,9492	-0,1427

Запис наведеної чутливості за (15) дає можливість отримати оцінки коефіцієнтів чутливостей за всіма j компонентами складу вихідного вугілля, віднесеними до 1% маси його вуглецю. Це необхідно для порівняння між собою коефіцієнтів функцій чутливості до компонентів складу різного вугілля в процесі його вибору. Вибір вуглецю тут пов'язаний з тим, що в моделі Дешаліта він є єдиним джерелом для горючої частини генераторного газу. На практиці це припущення виконується в зв'язку з порівняно низьким вмістом інших горючих елементів у вихідному вугіллі [3, с. 136].

Як впливає з даних таблиці 4, а також з рис. 2 і рис. 3, функції чутливості ККД газифікації до зміни вмісту компонентів вихідного палива практично лінійні (окрім вуглецю) на всіх діапазонах їх зміни під час моделювання процесу газифікації. Тому розрахунок цих функцій для всього діапазону моделювання можна замінити розрахунком функцій за проектним складом вихідного вугілля.

Аналізуючи дані про зв'язок функцій чутливості ККД газифікації зі зміною складу вихідного

вугілля, можна зробити висновок про те, що різні знаки цих функцій по-різному впливають на зміну величини самого ККД. Вплив визначається співвідношенням вмісту вуглецю та інших компонентів у робочій масі вихідного вугілля.

Найкращою з точки зору отримання штучного газового палива є мінімальна (за абсолютною величиною) сума наведених функцій чутливості, позаяк при цьому забезпечується максимальна стабільність процесу газифікації і відповідно складу генераторного газу.

За даними розрахунків, наведених у таблиці 4, можна зробити попередній вибір вугілля для заданої технології газифікації. Так, мінімальну величину $S(dy/dx \times x/C) = 0.00695$ ($\eta_{\text{хім}} = 65.11\%$) має вугілля марки П, Р Донецького басейну. Максимальну величину $S(dy/dx \times x/C) = -0.14471$ ($\eta_{\text{хім}} = 64.82\%$) має вугілля марки ІБ, Р Александрійське Дніпровського басейну.

Висновки. На основі аналізу перспектив використання сучасних технологій газифікації вугілля для енергетичної галузі України розглянуто важливе для практичної теплоенергетики

питання оптимального вибору вугілля. Це актуальне ще й тому, що в країні є великі розвідані запаси вугілля, найбільш прийнятні саме для газифікації. Але натепер відсутні формалізовані та практично апробовані методи вибору складу вугілля для наперед заданої технології газифікації.

Для вирішення цього питання запропоновано і розглянуто метод вибору вугілля, заснований на математичній моделі його газифікації. Для цього використано метод газифікації вугілля в стаціонарному шарі під тиском на парокисневому дутті (метод «Лургі»).

Математичну модель процесу основано на методі алгебри Дешаліта, який дає можливість оцінювати склад газового палива та його теплові характеристики. За результатами цього розрахунку визначається хімічний ККД газифікації, який пов'язує між собою склад вихідного вугілля, параметри процесу та характеристики отриманого генераторного газу. Величина цього ККД і його чутливість до зміни складу вихідного вугілля визначають, у кінцевому підсумку, оптимальність зробленого вибору.

За матеріалами моделювання процесу отримано низку рекомендацій для практичного застосування методу.

Список літератури:

1. Корчевой Ю.П. Экологически чистые угольные энерготехнологии / Ю.П. Корчевой, А.Ю. Майстренко, А.И. Топал. Киев : Наукова думка, 2004. 183 с.
2. Воробьев И.Е. Электроэнергия из органических топлив (обзор, прогнозы, экономика) : пособие для теплоэнергетиков / И.Е. Воробьев, А.Л. Фоменко. Киев : Энергетика и электрификация, 2002. 280 с.
3. Белосельский Б.С. Технология топлива и энергетических масел : учебник для вузов. Москва : Издательство МЭИ, 2003. 340 с.
4. Подгородецкий Г.С. Современные тенденции развития технологии производства генераторных газов из различных видов твердого топлива / Г.С. Подгородецкий, Ю.С. Юсфин, А.Ю. Сажин, В.Б. Горбунов, Л.А. Полулях. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2015 Том 58. № 6. С. 393–401.
5. Хоффман Е. Энерготехнологическое использование угля / пер. с англ. Москва : Энергоатомиздат, 1983. 328 с.
6. Топал А. Украина: газификация угля будет востребована. URL: <https://ukrchem.dp.ua/2014/07/31/ukraina-gazifikaciya-uglya-budet-vostrebovana.htm>.
7. Майстренко О.Ю., Использование супер сверхкритических параметров водяного пара – перспектива развития угольных электростанций Украины / О.Ю. Майстренко, О.Ф. Буляндра, С.М. Василенко. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2007. № 5. С. 11–15.
8. ГОСТ 25543-88 Вугілля буре, кам'яне та антрацити. Класифікація за генетичними і технологічними параметрами (Дата скасування дії 01.01.2019).
9. Газификация каменного угля без вредного воздействия на окружающую среду. URL: <https://studylib.ru/doc/301689>.
10. Потапова А. Нет газа без угля. URL: http://ukrrudprom.ua/analytics/Net_gaza_bez_uglya.html?print.
11. Химик Г. Альтернатива Газпрому ... не уголь на ТЭЦ, а газ из угля.... URL: <https://cont.ws>.
12. Волков И. Газификация бурого угля. URL: <https://ukrcoal.at.ua/index/serchcoal/0-59>.
13. Загрудинов Р.Ш., Нагорнов А.Н., Сеначин П.К. Наладочные испытания газогенераторов Лурги и перспективы газогенераторных технологий. *Ползуновский вестник*. 2007. № 3. С. 40–47.
14. Дешалит Г.И. Расчет процессов газификации топлива : учебное пособие для химико-технологических, металлургических и энергетических специальностей вузов УССР. Харьков : изд-во Харьковского университета, 1959. 170 с.
15. Химические вещества из угля. / Пер. с немецкого; под. ред. И.В. Калечица. Москва : Химия, 1980. 616 с.
16. Абрютин А.А. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание 3-е, переработанное и дополненное / А.А. Абрютин, Э.С. Карасина. Санкт-Петербург : Издательство «ВТИ» и НПО «ЦКТИ», 1998. 262 с.
17. Авгушевич И.В. Стандартные методы испытания углей. Классификации углей / И.В. Авгушевич, Е.И. Сидорук, Т.М. Бронец. Москва : «Реклама мастер», 2018. 576 с.

Huley O.B. SELECTION OF OPTIMAL COAL OF UKRAINIAN PRODUCTION FOR PAROKISENE GASIFICATION IN A STATIONARY LAYER

The aim of the work is to study the possibility of choosing the optimal brand of Ukrainian coal for efficient intra-cycle gasification in the binary thermodynamic cycle at thermal power plants.

Based on the results of the literature review on the topic of the study, it is shown that in studies of coal gasification technologies for gaseous energy fuel, the influence of the composition of the source coal, as a rule, was not the subject of special consideration. Therefore, it is concluded that today there is no universal, system-based method of pre-selection of thermal coal for a predetermined gasification technology.

The subject of the study is the influence of the composition of the source coal on the composition of the generator gas and its main thermal characteristics, which gives grounds for further selection of the optimal composition of coal.

As a criterion for optimal selection, it is proposed to use the value of the chemical efficiency (efficiency) of the gasification process, as well as the total sensitivity of this efficiency to changes in the content of components of the coal composition. depending on the heterogeneity of this composition.

The author used the method of estimating the composition of the generator gas, the alchebraic Deschallite method, as a research tool. The method allows to calculate quantitative estimates of the composition of gasification products depending on the characteristics of the composition of the source coal, the composition of the blast, temperature and pressure in the gas generator. Assumptions in the Deschalit method, as experience has shown, do not lead to significant errors in the estimates.

On the example of common brands of thermal coal by mathematical modeling of the gasification process ("Lurga" technology) the characteristics of gaseous fuel are obtained, on the basis of which it is possible to choose the optimal brand of source coal.

Key words: coal, gas generator, blast, layer, chemical efficiency, specific heat of combustion, temperature, pressure, gas yield, composition, ash content, humidity.

Назарова І.О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БІОПАЛИВНИХ КОТЕЛЕНЬ

Головною метою дослідження є підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) котельні, основним паливом для якої є біомаса, а саме дерев'яна тріска, а також покращення екологічних показників роботи цієї котельні. Підвищення енергоекологічної ефективності призводить до економії палива та скорочення терміну окупності котельні.

У роботі розглянуто основний метод підвищення ККД – встановлення контактного утилізатора теплоти відхідних газів від котла, головним завданням якого є охолодження продуктів згорання до температури, значення якої нижчі температури точки роси, і використання теплоти конденсації водяної пари для підвищення ефективності роботи системи. Встановлено, що ефективність системи буде збільшуватись у разі збільшення кількості додаткової теплоти від процесу конденсації, яка повертається в систему «котел–утилізатор». Отримані залежності теоретично-максимального підвищення ККД системи «котел–утилізатор» стосовно ККД котла від вологості тріски, а також залежність ККД системи «котел–утилізатор» від вологості палива за різних режимів роботи котла й утилізатора. Встановлена енергетична ефективність роботи контактного утилізатора в системі з котлом. Запропоновано використання контактної апаратури, в якому процес контактної тепломасообміну відбувається у супутньому висхідному потоці газів і плівки рідини за швидкості газів, значення якої перевищує верхню межу «захливання» протиточного руху у вертикальних трубах. Приведені залежності для визначення коефіцієнта тепловіддачі в контактному утилізаторі з висхідним рухом теплоносія.

Визначені валові викиди забруднюючих речовин відхідних продуктів згорання та їх концентрації у разі спалювання дерев'яної тріски на виході з системи «котел–утилізатор» відомими розрахунковими методами. Отримано, що відповідно до чинних нормативів по викидах оксидів азоту, оксидів сірки та оксидів вуглецю граничнодопустимі концентрації не нормуються, а масові концентрації викидів твердих частинок не перевищують граничні значення.

Ключові слова: контактний утилізатор, контактний тепломасообмін, біопаливна котельня, система «котел–утилізатор», відхідні димові гази, біопаливо.

Постановка проблеми. Покращення умов довкілля та енергозбереження є найбільш актуальною проблемою на нинішньому етапі розвитку енергетики України. Актуальність наукових досліджень із заміщення викопного палива і впровадження ефективних технологій, працюючих на біопаливі, зростає у зв'язку з дорожчанням палива та посиленням вимог щодо зменшення забруднення навколишнього середовища тепловими установками. У відповідності до «Енергетичної стратегії України до 2035 року» [1] Україна має намір скоротити споживання викопного палива та збільшити частку відновлюваних джерел енергії до 25% у 2035 р. Використання біомаси в загальному обсязі відновлювальних джерел становить приблизно 83%, цей відсоток прогнозовано буде тільки зростати, що відображає тенденція останніх років. Таким чином, розробка комплексу захо-

дів з дослідження та впровадження енергозберігаючих теплотехнологій у секторі виробництва теплової енергії з біомаси є актуальним питанням сьогодення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій, присвячених дослідженню підвищення енергетичної ефективності котелень, показав, що основним методом підвищення ККД є встановлення утилізаторів теплоти відхідних газів від котла. Найпоширенішим напрямом теплоутилізації відхідних газів водогрійних опалювальних котлів, працюючих на природному газі, є підігрівання в теплоутилізаційному устаткуванні зворотної води системи теплопостачання перед надходженням її до котла [2–4]. З метою підвищення ефективності використання палива шляхом реалізації глибокого охолодження відхідних газів упродовж усього опалювального періоду

потрібно використовувати утилізовану теплоту для нагрівання теплоносіїв більш холодних, ніж зворотна вода теплової мережі, наприклад такими теплоносіями можуть слугувати холодна вода системи хімічного водоочищення та вода для технологічних потреб.

В Україні проблема глибокої утилізації теплоти відхідних газів досліджується вже понад 50 років. На основі цих досліджень розроблені і впроваджені утилізаційні установки та конденсаційні котли. Аналіз багатьох публікацій, наприклад [5–8], свідчить про те, що такі розробки переважно пов'язані з котельнями, що працюють на природному газі, а конструкції утилізаторів потребують вдосконалення. У разі все більш зростаючого дефіциту й удорожчання викопного енергетичного палива необхідно впроваджувати високоефективні теплоутилізаційні технології для котелень, що працюють на біопаливі. Цей досвід мають європейські країни, наприклад Литва і Данія. Але під час проектування теплових схем котелень з глибокою утилізацією відхідних газів необхідно врахувати, що наприклад Литва та Україна мають різний температурний графік теплової мережі. У температурному графіку теплової мережі Литви у разі збільшення температури в прямому трубопроводі опалення температура зворотної води змінюється незначно (в межах 8 °С) [9]. Для України, навпаки, характерно значне (до 30°С) збільшення температури зворотної води у разі збільшення температури в прямому трубопроводі опалення, а значить, характерна і відсутність постійного джерела холодної води на вході в економайзер. Тобто необхідно знайти шляхи, які дадуть змогу широко використовувати утилізатори в закритій залежній схемі опалення системи теплопостачання України.

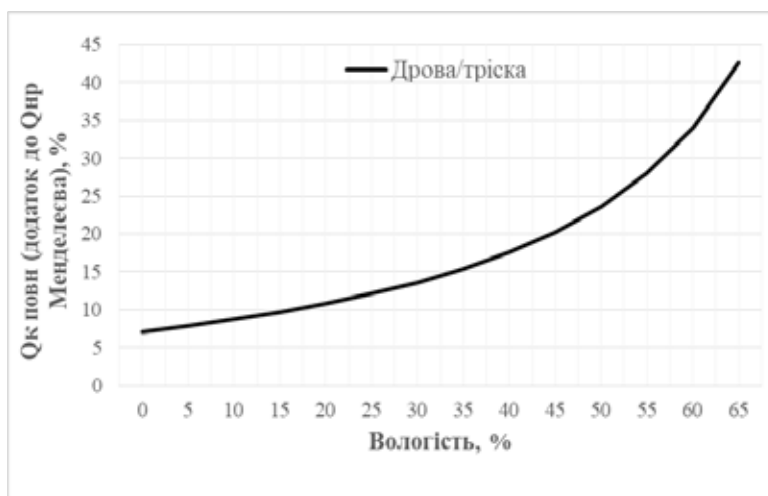


Рис. 1. Теоретично-максимальне підвищення ККД системи «котел-утилізатор» стосовно ККД котла

Постановка завдання. Метою цієї роботи є аналіз енергетичної і екологічної ефективності біопаливної котельні під час її роботи на дерев'яній трісці у системі з утилізатором теплоти відхідних газів.

Виклад основного матеріалу дослідження. На першому етапі досліджувалась енергетична ефективність біопаливної котельні від встановлення утилізатора та вплив вологості палива – тріски на ККД системи «котел-утилізатор». Основна задача контактного утилізатора – охолодити продукти згоряння до температури, значення якої буде нижчим за температуру точки роси, і використати теплоту конденсації водяної пари для підвищення ефективності роботи системи. Ефективність системи буде збільшуватись у разі збільшення кількості додаткової теплоти від процесу конденсації, яка повертається в систему «котел-утилізатор».

На підставі розрахунку повного згоряння тріски, розрахунку нижчої Q_n^p та вищої теплоти згоряння Q_v^p дерев'яної тріски було отримано, що теплота, що виділяється у разі повної конденсації водяної пари $Q_{конд}^{повн}$, становить додаткові 17,8% від Q_n^p :

$$\frac{Q_{конд}^{повн}}{Q_n^p} = 17,8 \% .$$

Значення теплоти конденсації всієї водяної пари, що утворюється під час згорання одиниці палива, було розраховане для різної вологості дерев'яної тріски. Отримані таким чином дані дали змогу побудувати залежність теоретично-максимального підвищення ККД системи «котел-утилізатор» стосовно ККД котла (без теплових втрат в утилізаторі) від вологості тріски (рис. 1), а також залежність ККД системи «котел-утилізатор» від вологості палива за різних режимів роботи котла і утилізатора (рис. 2).

Визначення параметрів димових газів на виході з котлів – вході в утилізатор, розрахунок температури точки роси димових газів на вході в утилізатор, розрахунок теплового балансу системи «котел-утилізатор» та її елементів, розрахунок теплового балансу котлоагрегату дали змогу оцінити значення енергетичної ефективності від встановлення утилізатора. Підвищення ККД системи «котел-утилізатор» порівняно з ККД котла становить 13,6%.

Для утилізації теплової енергії відхідних газів котелень і отримання нагрітої води широко використовують контактні тепломасообмінні апарати, що дає змогу досягти глибокого охолодження газів і таким чином збільшити коефіцієнт використання теплоти палива. У таких апаратах передача теплоти від парогазових продуктів згоряння до рідини, що нагрівається, відбувається у разі безпосереднього контакту теплоносіїв, що значно покращує умови передачі теплоти і маси, а також дає змогу знизити викиди оксидів азоту (NO_x) під час їх абсорбції водою. Принцип дії контактних тепломасообмінних апаратів полягає в підігріві води гарячими продуктами згоряння шляхом їх безпосереднього зіткнення за відсутності розділових стінок поверхні нагрівання між теплоносіями. Поверхнею нагріву в контактних апаратах є поверхні плівки, крапель і струмків води, через яку відбувається тепло- і масообмін між газами і водою. Контактні апарати можуть бути форсунковими, каскадними (поличними), насадковими, барботажними, пінними [8]. У порожніх форсункових апаратах тепло- і масообмін відбувається в порожній контактній камері на поверхні численних крапель, що утворюються у разі подачі води під тиском через форсунки. Поверхня тепло- і масообміну може бути при цьому досить розвиненою, однак частина дрібних крапель, що являють найбільший інтерес з точки зору теплообміну, несеться з газами, і їх подальше уловлювання важке. Для диспергування рідини за допомогою форсунок потрібні значні витрати енергії. До недоліків належать також громіздкість і значний аеродинамічний опір, що пов'язаний з установкою ефективних краплевловлювачів. Апарат являє собою порожнистий циліндр, усередині якого поперек руху газу встановлені форсунки для розбризкування води. У каскадних (поличних, тарілчастих, дискових) апаратах теплообмін між димовими газами і водою відбувається у разі стікання води з полиці на полицю, багаторазового поперечного омивання струменів газами і барботування крізь плівку. Ці апарати прості за конструкцією, однак установка їх на значній висоті часто вимагає спеціальних будівельних споруд, а подача охо-

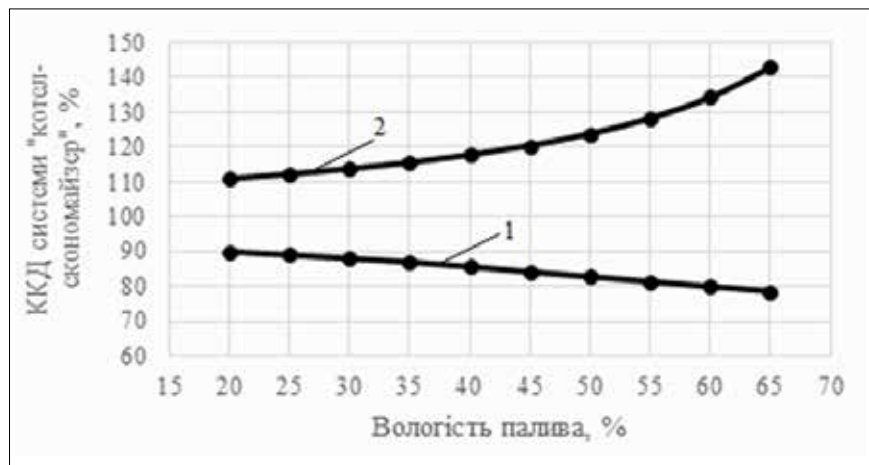


Рис. 2. Залежність ККД системи «котел-утилізатор» від вологості палива за різних режимів роботи котла й утилізатора. 1 – ККД системи без утилізатора; 2 – ККД системи з утилізатором

лоджувальної води на значну висоту пов'язана з великою витратою енергії. У барботажних апаратах поверхня контакту рідкої і газової фаз створюється у разі барботажу газу в рідину у вигляді бульбашок або цівок. Апарати мають форму високих колон, робочий простір яких розділений горизонтальними тарілками на ряд камер. Барботажні апарати характеризуються підвищеною інтенсивністю тепло- і масообміну на одиницю об'єму апарату, допускають роботу із забрудненими і помірно густими рідинами, нечутливі до коливань витрати теплоносіїв. До їх недоліків належать складність конструкції, металоємність, високий гідравлічний опір. Пінні апарати відрізняються високою інтенсивністю процесів тепло- і масообміну. Недоліком пінних апаратів є дуже високий аеродинамічний опір контактної камери, що викликає підвищену витрату електроенергії на власні потреби. Насадкові апарати є найбільш поширеним типом контактних тепломасообмінників. Насадки контактних апаратів можна розділити на дві групи: насипні і регулярні. Насипні насадки складаються з окремих, безладно засипаних або правильно покладених елементів. Регулярні насадки являють собою регулярні поверхні, укладені за певним законом у внутрішню порожнину апарату. Насипні насадки поряд з певними перевагами – технологічністю виготовлення, можливістю використання синтетичних матеріалів, відносно низькою ціною – мають істотні недоліки: низьку механічну міцність, велику металоємність, високий гідродинамічний опір, низьку величину питомої поверхні. Регулярні насадки характеризуються високою інтенсивністю тепломасообмінних процесів і невисоким гідродинамічним опором.

Таким чином, у більшості відомих конструкцій таких апаратів реалізується протиточна схема руху теплоносіїв. Недоліком такої схеми є низька швидкість руху газів в апараті (3 ÷ 4 м/с). Причина низької швидкості газів полягає у виникненні явища «захливання» течії. Відомо, що у разі збільшення швидкості руху теплоносіїв зростає інтенсивність процесів тепломасообміну. У контактному апараті [10] запропоновано підвищити швидкість газів до значення, яке перевищує верхню межу «захливання» протиточного руху у вертикальних трубах. Це забезпечує умови протікання контактного тепломасообміну в супутньому висхідному потоці газів і плівки рідини. У зв'язку з тим, що у висхідному прямотоці мають місце більш високі значення швидкості газового потоку, область стійкої плівкової течії рідини зміщується в бік значно більш високої щільності зрошення. Це, своєю чергою, призводить до значної інтенсифікації процесів міжфазної взаємодії та, як наслідок, до багаторазового збільшення середніх коефіцієнтів тепловіддачі [11] і масовіддачі [12] (рис. 3.) [11].

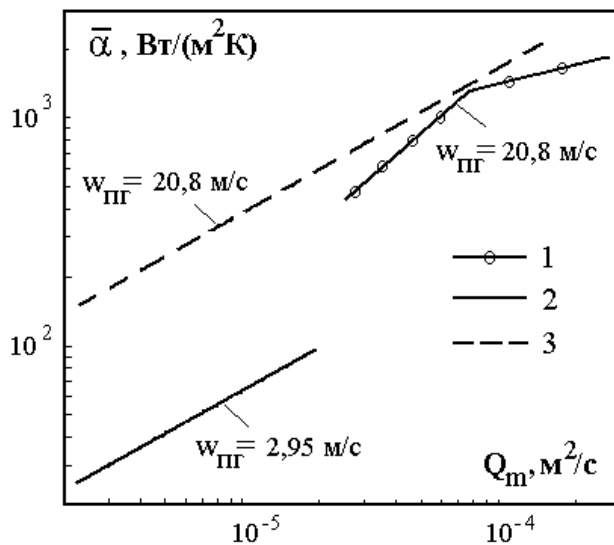


Рис. 3. Залежність середнього коефіцієнта тепловіддачі від щільності зрошення Q_m для різних випадків тепломасообміну. 1 – контактний тепломасообмін у разі супутньої висхідної течії парогазової суміші і рідини; 2 – контактний тепломасообмін у разі протиточного руху парогазової суміші і рідини на сітчастій насадці; 3 – умовна розрахункова залежність (екстраполяція залежності для протиточу)

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі в контактному утилізаторі з висхідним рухом теплоносіїв необхідно скористатись такими залежностями [13]:

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda_r}{d_{\text{вн}}},$$

де число Нуссельта визначається як:

$$\overline{Nu} = 9,6 \cdot 10^4 \cdot Fr_{\text{пл}}^{1,1} \cdot (L/d)^{-0,75} \cdot \varphi^{0,43}$$

$$\text{при } Fr_{\text{пл}}^{\text{сп1}} < Fr_{\text{пл}} < Fr_{\text{пл}}^{\text{сп2}},$$

$$\overline{Nu} = 86 \cdot Fr_{\text{пл}}^{0,2} \cdot Re_r^{0,65} \cdot (L/d)^{-0,75} \cdot \varphi^{0,77}$$

$$\text{при } Fr_{\text{пл}}^{\text{сп2}} < Fr_{\text{пл}} < 6,4 \cdot 10^{-1},$$

$$Fr_{\text{пл}}^{\text{сп1}} = 2,68 \cdot 10^{-4} \cdot Re_r^{0,45} \cdot \varphi^{0,17} \cdot (L/d)^{0,5},$$

$$Fr_{\text{пл}}^{\text{сп2}} = 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot Re_r^{0,72} \cdot \varphi^{0,38}.$$

Число Рейнольдса для парогазового потоку:

$$Re_r = \frac{w_r d_{\text{вн}} \rho_r}{\mu_r}.$$

Число Фруда для плівки рідини:

$$Fr_{\text{пл}} = \frac{Q_m}{\delta \sqrt{g \delta}}.$$

Для визначення висоти труб контактного апарату необхідно скористатись залежністю:

$$(L/d) = 26,77 \cdot Re_r^{-0,04} \cdot \varphi^{-0,17},$$

Об'ємна доля водяних парів у продуктах згорання:

$$\phi = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_r^d}.$$

Отже, високоефективний утилізатор підвищує енергоекологічну ефективність роботи котельні, позаяк, крім енергетичного ефекту, економайзер також працює як мокрий скруббер, забезпечуючи вловлювання забруднюючих речовин та твердих часток із димових газів, які потрапляють у конденсат.

На другому етапі досліджень проводився екологічний розрахунок системи «котел–утилізатор» та її елементів. У результаті процесу спалювання біомаси можуть утворитись такі забруднюючі речовини, як парникові гази та відходи, які разом із продуктами згорання потрапляють у навколишнє середовище або можуть потрапляти в ґрунти та воду.

Під час спалювання дерев'яної тріски потрібно розраховувати викиди оксидів азоту, сірки і вуглецю, твердих частинок. Визначення викидів забруднюючих речовин під час спалювання дерев'яної тріски було проведено розрахунковими методами згідно з відомою методикою. Відповідно до чинних нормативів по викидах оксидів азоту, оксидів сірки та оксидів вуглецю граничнодопустимі концентрації не нормуються. На підставі теоретичного розрахунку масові концентрації викидів твердих частинок не перевищують граничні значення.

Висновки. Технологію глибокої утилізації теплоти димових газів можна використовувати для підвищення енергетичної та екологічної ефективності біопаливних котелень.

У результаті досліджень отримано значення енергетичної ефективності від встановлення утилізатора за котлом, паливом для якого є дерев'яна тріска. Підвищення ККД системи «котел–утилізатор» порівняно з ККД котла становить приблизно 13,6%.

Під час проектування теплових схем біопаливних котелень слід враховувати значне (до 30°C) збільшення температури зворотної води у разі збільшення температури в прямому трубопроводі опалення. Це означає, що постійне джерело холодної води на вході в економайзер відсутнє, тобто необхідно знайти шляхи, які дадуть змогу широко використовувати утилізатори в закритій залежній схемі опалення системи тепlopостачання.

Список літератури:

1. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері тепlopостачання : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 569-р. *Офіційний вісник України*. 08.09.2017. № 70. С. 21–27.
2. Навродська Р.О. Підвищення ефективності теплоутилізаційних технологій для котельних установок комунальної теплоенергетики. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Вип. 25.9. С. 225–229.
3. Маляренко В.А., Темнохунд (Казарова) І.О., Темнохунд О.О. Комунальна енергетика України: проблеми, шляхи розвитку. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. *Технічні науки. Вісник НТУСГ*. 2015. № 164. С. 138–140. ISBN 5-7987-0176X.
4. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Голубинский П.К., Новаковский М.А. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа. *Промышленная теплотехника*. 2008. № 3. С. 68–76.
5. Кудинов А.А., Антонов В.А., Алексеев Ю.Н. Энергосбережение в газифицированных котельных установках путем глубокого охлаждения продуктов сгорания. *Теплоэнергетика*. 2000. № 1. С. 59–61.
6. Yefimov A.V., Goncharenko A.L. Thermal design technique for surface-type heat recovery condenser. *Motrol*. 2010, No. 12. Pp. 248–259.
7. Ефимов А.В, Гончаренко А.Л. Математическая модель системы «котел–теплоутилизатор». *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. 2010. № 21. С. 76–87.
8. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. Ленинград : Недра, 1990. 280 с.
9. Adamczyk F. Integration of a Powerise Flue Gas Heat Recovery System in the Worldwide Largest Fluidized Bed Boiler Lagisza 460 MW Efficiency Increase and CO₂ Reduction. *VGB Power Tech*. 2008. No. 12.
10. Нагрівник текучої рідини: пат. 53256 А Україна. № 2002043046; заявл. 15.04.2002; опубл. 15.01.03, Бюл. № 1. 2 с.
11. Безродный М.К., Назарова И.А., Хавин С.А. Тепломассообмен при конденсации водяных паров из парогазовой смеси в восходящем потоке с пленкой жидкости. *Промышленная теплотехника*. 2003. № 4. С. 26–30.
12. Безродный М.К., Назарова И.А., Хавин С.А. Массообмен при конденсации водяных паров из парогазовой смеси в восходящем потоке с пленкой жидкости. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2003. № 1. С. 58–70.
13. Безродный М.К., Хавин С.А., Назарова И.А. Тепломассообмен при спутном восходящем течении газа и жидкости. *Промышленная теплотехника*. 2003. № 1. С. 23–28.

Nazarova I.O. INCREASING ENERGY AND ECOLOGICAL EFFICIENCY OF BIOFUEL BOILERS

The main purpose of the study is to increase the efficiency of the boiler house, the main fuel for which is biomass, namely wood chips, as well as to improve the environmental performance of this boiler house. Increasing energy and environmental efficiency, respectively, leads to fuel savings and reduced payback period of the boiler house.

The main method of increasing the efficiency is considered – installation of a contact heat recovery from the boiler, the main task of which is to cool the combustion products to a temperature below the dew point temperature and use the heat of condensation to increase the efficiency of the system. It is established that the efficiency of the system will increase with increasing amount of additional heat from the condensation process, which returns to the system “boiler–utilizer”. The dependences of the theoretical-maximum increase of the efficiency of the “boiler–utilizer” system in relation to the efficiency of the boiler on cond humidity and the dependence of the efficiency of the “boiler–utilizer” system on fuel humidity at different

operating modes of the boiler and utilizer are obtained. The use of a contact apparatus in which the process of contact heat and mass transfer takes place in the concomitant upward flow of gases and a liquid film at a velocity of gases exceeding the upper limit of “flooding” of countercurrent motion in vertical pipes. The dependences for determining the heat transfer coefficient in the contact utilizer with the upward movement of the coolants are given.

The gross emissions of pollutants from the combustion products and their concentration during the combustion of wood chips at the outlet of the system “boiler-recycler” are determined by known calculation methods. It obtained that in accordance with the current standards for emissions of nitrogen oxides, sulfur oxides and carbon oxides, the maximum allowable concentrations are not normalized, and the mass concentrations of particulate matter emissions do not exceed the limit values.

Key words: *contact utilizer, contact heat and mass transfer; biofuel boiler house, “boiler–utilizer” system, flue gases, biofuel.*

УДК 533.601:502.36
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/22>

Черноусенко О.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бутовський Л.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Грановська О.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мороз О.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Старченко О.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ РІЗНОЙМЕННОЇ ЗАКРУТКИ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ НА МЕЖІ СТАЛОЇ РОБОТИ СТАБІЛІЗАТОРНОГО ПАЛЬНИКА ПРИ МІКРОДИFUЗІЙНОМУ СПАЛЮВАННІ ГАЗУ

У статті наведено результати експериментальних досліджень характеристик запалювання факела і бідного зриву в пальникових пристроях стабілізаторного типу, в яких стабілізатори обтікаються різномірно закрученими повітряними потоками при мікродифузійному спалюванні газу з подачею палива в зону рециркуляції через систему отворів, що розподілено розташовані вздовж стабілізатора. Дослідження проведені з випробуваннями лінійного стабілізатора шириною 45 мм при зміні кута різномірної закрутки повітряного потоку $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ; \pm 60^\circ; \pm 70^\circ$, а також кільцевого стабілізатора шириною 40 мм при кутах $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ$. Встановлено, що при цьому змінюються структура зони рециркуляції і ближнього сліду за стабілізатором. Дослідження показали, що при закрутці повітряного потоку з'являються складники швидкості потоку по всім осям координат, а при $\varphi > 60^\circ$ зона рециркуляції вироджується в систему вихорів уздовж стабілізатора. Зі збільшенням кута закрутки повітряного потоку інтенсифікуються процеси масообміну по всьому перерізу камери згорання і за стабілізатором, що призводить до підвищення інтенсивності турбулентності повітря. Внаслідок інтенсифікації процесів масообміну при збільшенні кута закрутки повітря погіршуються характеристики запалення факела і бідного зриву полум'я. Була встановлена залежність характеристик сталості факела від кута різномірної закрутки повітря. Наведені експериментальні дані щодо характеристик запалювання факела і бідного зриву полум'я й отримані узагальнюючі залежності, які дають змогу виконувати попередній розрахунок характеристик мікродифузійних стабілізаторних пальникових пристроїв із подачею газу в зону рециркуляції при різномірній закрутці повітряних потоків, що оббігають стабілізатор.

Ключові слова: стабілізаторний пальник, дифузійне горіння, запалювання факела, бідний зрив, зона рециркуляції, швидкість повітря, різномірною закрутка повітря.

Постановка проблеми. Одним із найбільш ефективних методів підвищення економічності циклу газотурбінних (далі – ГТУ) і парогазових установок (далі – ПГУ) є підвищення тиску та температури газів перед турбіною. Так, збільшення температури робочого тіла до $1300 \div 1500$ °С дає змогу

підвищити термічний коефіцієнт корисної дії ГТУ до 40 % [1, с. 241], а ПГУ – до $58 \div 60$ % [1, с. 243]. Отримання високотемпературних газів відбувається в камері згорання, від надійності роботи та економічності якої значною мірою залежать характеристики енергетичної установки загалом.

Так, необхідність підвищення робочого тіла до $1300 \div 1500$ °С зумовлює зменшення загального коефіцієнта надлишку повітря в циклі до $\alpha \approx 1,9 \div 2,5$ [2, с. 23]. Такі режими реалізуються при організації кінетичного режиму горіння попередньо перемішаної гомогенної суміші палива (газу) і повітря. При цьому варто брати до уваги, що горіння повністю перемішаної гомогенної суміші може відбуватись у доволі вузькому діапазоні зміни коефіцієнту надлишку повітря – для метану $\alpha = 0,65 \div 1,8$ [3, с. 69].

Водночас камера згорання має забезпечити надійну роботу установки в умовах значної зміни температури вихідних газів, а, значить, коефіцієнта надлишку повітря в широкому діапазоні режимів, наприклад, при пуску, останову та перехідних режимах при $\alpha = 3,0 \div 30$ в ГТУ та $\alpha = 1,0 \div 10$ – в ПГУ [4, с. 4]. Це вимагає використання у всій камері або в її окремих елементах дифузійного механізму спалювання, при якому є можливість роботи в широкому діапазоні режимів [5, с. 111]. Водночас при дифузійному механізмі спостерігається порівняне збільшення довжини факела і підвищений вихід оксидів азоту [3, с. 104].

Вирішення проблеми забезпечення можливості роботи камери згорання в широкому діапазоні режимів вимагає пошуків її раціональної конструкції, що своєю чергою пов'язане зі знанням фізико-хімічних проблем, які відбуваються в робочому просторі камери згорання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Необхідність покращення економічних і екологічних характеристик камери згорання, а також показників надійності вимагає інтенсифікації всіх процесів, які відбуваються в камері згорання. Підвищення інтенсивності робочого процесу в камері згорання являє собою комплексну проблему, під час вирішення якої враховуються основні стадії робочого процесу – подача палива і повітря в зону горіння, змішування компонентів, процес запалювання факела, стабілізація горіння, екологічні характеристики тощо.

Одним із поширених конструктивних підходів, які використовують відомі газотурбінні фірми, є збільшення поверхні фронту горіння шляхом зменшення розмірів характерних елементів паливкового пристрою і збільшення їх кількості, тобто перехід до багатопаливкових модульних камер згорання [6, с. 23]. Своєю чергою в модулях використовується кінетичний, дифузійний або комбінований механізм організації горіння палива [7, с. 27; 8, с. 511]. При

цьому варто брати до уваги, що зменшення розмірів характерних елементів модульного паливника є можливим до певної межі, після якої виникають ускладнення із забезпеченням повного вигорання палива, сталості факела, рівномірності роздачі палива і повітря між окремими модулями тощо.

Одним із підходів до створення модульної камери згорання, в якій реалізується високоінтенсивне горіння палива, є використання мікрофакельного дифузійного спалювання газу за стабілізаторами, що обтікаються різнойменно закрученими повітряними потоками повітря [9, с. 65; 10, с. 49]. Використання різнойменно закрутки повітряного потоку дало змогу значно підвищити інтенсивність масообмінних і хімічних процесів у зоні горіння, що дало змогу зменшити довжину камери згорання. Водночас відсутні систематизовані дані щодо впливу різнойменно закрутки на характеристики сталого горіння в прийнятій системі.

Постановка завдання. Метою досліджень було експериментальне дослідження особливостей запалювання факелу стабілізації горіння в процесі мікродифузійного спалювання газу за стабілізаторами, що обтікаються різнойменно закрученими повітряними потоками в умовах струменевої подачі газу в зону рециркуляції стабілізаторів із газоподаючих отворів, що розташовані у вихідній торцевій стінці стабілізатора розподілено вздовж його довжини.

Виклад основного матеріалу досліджень. У роботі досліджувались режими сталої роботи лінійного і кільцевого стабілізаторних паливкових пристроїв, схеми яких наведені на рис. 1.

Лінійний стабілізатор мав такі геометричні характеристики: довжина робочої ділянки $L_k = 1000$ мм, ширина каналу в ділянці розміщення стабілізатора $B_k = 150$ мм, ширина стабілізатора $B_{ct} = 45$ мм, коефіцієнт затінення каналу $K_f = B_{ct} / B_k = 0,30$. Газ подавався через систему отворів діаметром $d_r = 4,0$ мм, відношення площі вихідного торця стабілізатора до площі газоподаючих отворів $F_{ct} / F_r = 86,84$. Під час випробувань кут різнойменного закручування повітряних потоків, що обтікають стабілізатор з обох боків, змінювався в діапазоні $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ; \pm 60^\circ; \pm 70^\circ$. Параметри кільцевого стабілізатора були такими: $B_k = 100$ мм, $B_{ct} = 40$ мм, $K_f = 0,4$; середній діаметр осі стабілізатора $D_{ct} = 400$ мм, кривизна кола за середнім діаметром $k = 1/R_{ct} = 5,0$ 1/м; $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ$; $d_r = 3,0$ мм, $F_{ct} / F_r = 82,76$.

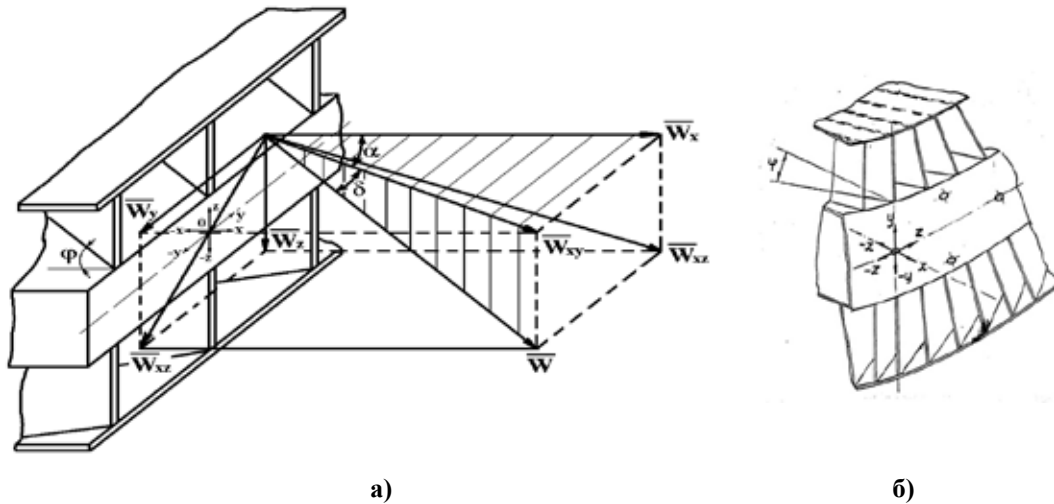


Рис. 1. Схема лінійного (а) і кільцевого (б) мікродифузійного стабілізаторного пристрою в разі обтікання стабілізатора різнойменно закрученими повітряними потоками

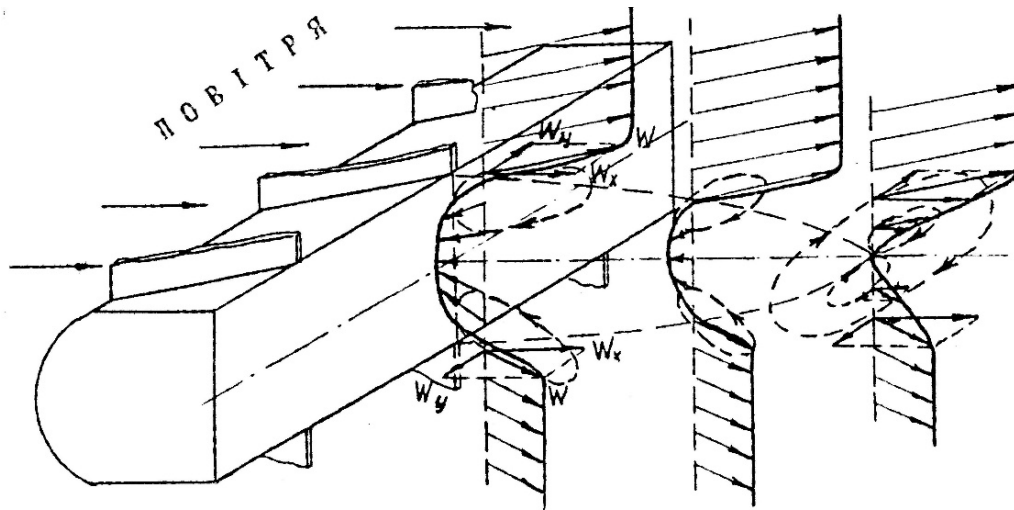


Рис. 2. Розподілення складників швидкості повітряних потоків за стабілізатором при різнойменній закрутці

На рис. 1,а для верхнього каналу показані складники вектора швидкості повітря W по осях x, y, z . За такими ж складниками розглядалися турбулентні складники швидкості. Швидкість повітряного потоку в різних напрямках вимірювалась за допомогою сферичного зонду конструкції ЦКПІ, турбулентні пульсації потоку – за допомогою термоанемометра СТБ.

На рис. 2 наведено розподілення векторів швидкості повітряних потоків у близькому сліді за стабілізатором. Експериментальні дослідження показали, що при закрутці повітряного потоку процеси масообміну в близькому сліді за стабілізатором характеризуються появою осереднених і пульсаційних складників швидкості вздовж всіх осей координат, а також утворенням додаткових вихорів вздовж стабілізатора. Із збільшенням кута різнойменної закрутки повітря

довжина зони рециркуляції зменшується, а при $\varphi > \pm 60^\circ$ зона практично вироджується в систему хаотичних вихорів за стабілізатором.

Аналіз результатів вимірювань інтенсивності турбулентності повітряного потоку за стабілізатором $\varepsilon_{xz} = \frac{\sqrt{(W')^2}}{W_i}$ вздовж перерізу каналу при різних кутах повороту повітряного потоку показано на рис. 3.

Заслуговує на увагу той факт, що з ростом кута $\pm \varphi$ рівень інтенсивності турбулентності підвищується по всьому перерізу з максимумом у сліді за стабілізатором (рис. 3, а). Крім того, з ростом $\pm \varphi$ максимум $\varepsilon_{xz} = \frac{\sqrt{(W')^2}}{W_i}$ наближається до торця стабілізатора (рис. 3, б).

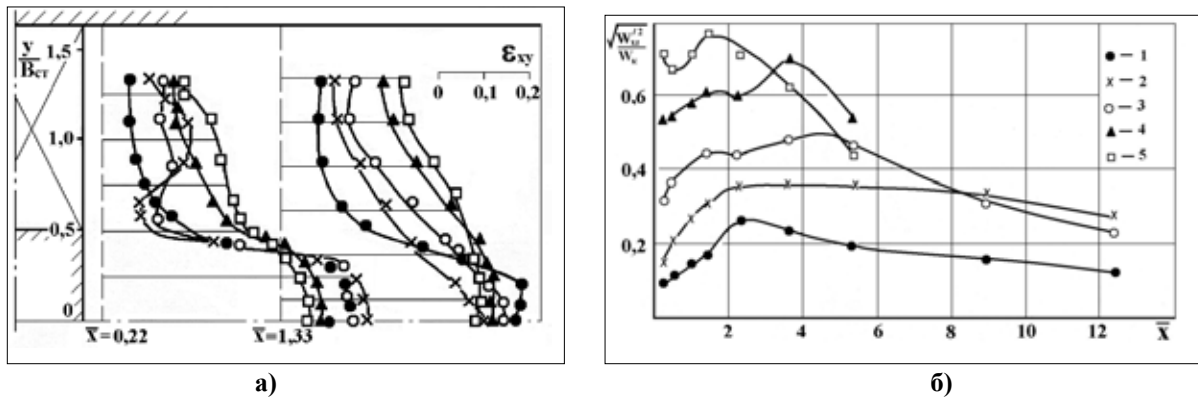


Рис. 3. Зміна інтенсивності турбулентності вздовж перерізу камери (а) та осі сліду за стабілізатором (б) при різних кутах закрутки потоку ($W_k = 15,3$ м/с); 1 – $\varphi = 0^\circ$; 2 – $\varphi = 30^\circ$; 3 – $\varphi = 45^\circ$; 4 – $\varphi = 60^\circ$; 5 – $\varphi = 70^\circ$

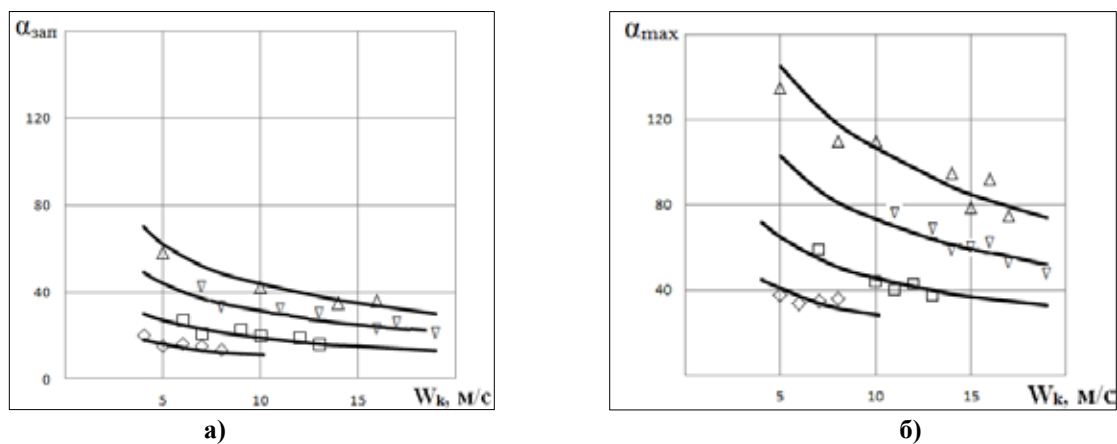


Рис. 4. Порівняння даних щодо запалення (а) і «бідного» зриву (б) факела за лінійним стабілізатором при різномірній закрутці повітряного потоку, що обтікає стабілізатор:
 Δ – $\varphi = \pm 30^\circ$; ∇ – $\varphi = \pm 45^\circ$; \square – $\varphi = \pm 60^\circ$; \diamond – $\varphi = \pm 70^\circ$

На рис. 4 для лінійного стабілізатора наведено порівняльні дані щодо запалення факела і бідного зриву залежно від швидкості повітряного потоку в камері перед стабілізаторами при різномірній закрутці повітряних потоків, що обтікають стабілізатор.

У зв'язку з тим, що для ініціювання реакції горіння необхідно підвести до газоповітряної суміші додаткову енергію активації, процес запалювання факела завжди відбувається при підвищених витратах палива щонайменше на 20–30% і більше, ніж бідний зрив. Аналогічні дані отримано і для кільцевого стабілізатора.

Як видно з рис. 4, спостерігається звичайна залежність падіння α_{zap} і α_{max} з ростом швидкості повітря. Варто зазначити також погіршення характеристик запалювання і бідного зриву факела при збільшенні кута різномірної закрутки повітряного потоку. З одного боку, це зумовлено збільшенням швидкості повітря на зрізі стабілізатора при незмінній витраті і швидкості повітря в камері

перед стабілізатором $G_n = const$ та $W_k = const$, а, з другого боку, додатковим погіршенням стабілізуючих можливостей зони рециркуляції, що пов'язано зі зменшенням її розмірів і теплової потужності, збільшенням пульсаційних складників швидкості і, як наслідок, інтенсифікацією масообмінних процесів, що протікають за стабілізатором, а також збільшенням витрати теплоти зони зворотних токів на підігрів свіжої суміші до температури запалення факела при збільшенні кута закрутки повітря.

Характеристики бідного зриву факела за стабілізатором визначались при поступовому зменшенні витрати газу після певного терміну сталої роботи. У результаті обробки експериментальних даних було знайдено, що залежність характеристик бідного зриву факела від кута різномірної закрутки повітряного потоку також можна визначити комплексом виду

$$\alpha_{max} \sim 1 / (1 + \text{tg}\varphi)^{1,5}$$

Після обробки і аналізу експериментальних даних щодо впливу режимних і конструктивних факторів на характеристики бідного зриву факела встановлено, що в стабілізаторних пальникових пристроях із подачею газу в зону рециркуляції розподілено вздовж стабілізатора можна використовувати залежність, наведену в [11] з урахуванням кута різнойменної закрутки повітряного потоку. Узагальнююча залежність має вигляд:

$$\alpha_{max} = K_{max} \frac{B_{cm}^{0,5} d_z^{0,35} \left(\frac{F_{cm}}{F_z} \right)^{0,2}}{W_k^m \cdot K_f (1 + K_f) (1 + tg\varphi)^{1,5}} \left(\frac{T_n}{273} \right)^{1,3-2K_f}, \quad (1)$$

На рис. 5 отримані експериментальні дані для випробуваних стабілізаторів представлені у вигляді залежності відношення α_{max} / Π_{max} від швидкості повітряного потоку перед стабілізатором:

$$\alpha_{max} / \Pi_{max} = f(W_k), \quad (2)$$

де Π_{max} – параметр бідного зриву,

$$\Pi_{max} = K_{max} \frac{B_{cm}^{0,5} d_z^{0,35} \left(\frac{F_{cm}}{F_z} \right)^{0,2}}{K_f (1 + K_f) (1 + tg\varphi)^{1,5}} \left(\frac{T_n}{273} \right)^{1,3-2K_f}, \quad (3)$$

При обробці дослідних даних розмірність параметрів є такою: W_k , м/с;

B_{cm} , мм; d_z , мм; T_n , К, $m = n = 0,5$.

Як встановлено, для досліджених стабілізаторів за інтенсивності турбулентності повітряного потоку $\epsilon > 3,5\%$ дослідний коефіцієнт $K_{max} = 8,2$.

Під час досліджень щодо запалювання факела використовувались свічка поверхневого розряду типу СПЕ-04-А і котушка запалювання КР-1 з живленням постійним током напругою 24 В. Відповідно до рекомендацій [12] іскровий проміжок свічки при запалюванні факела встановлювався на відстані $L = (0,5 - 0,6) \cdot B_{cm}$.

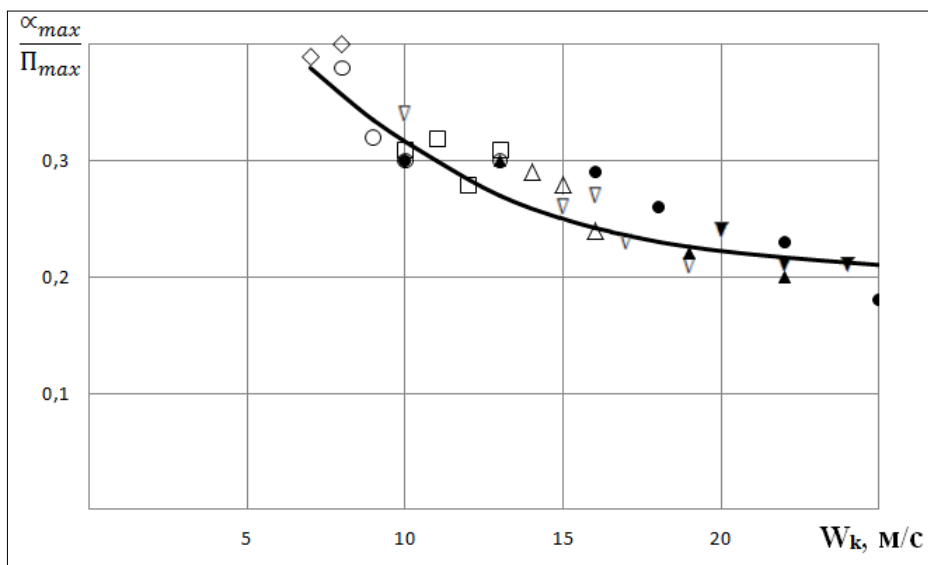
При обробці результатів досліджень із закрутою повітряного потоку знайдено, що залежність характеристики запалювання факела від кута різнойменної закрутки повітряного потоку можна визначити комплексом виду $\alpha_{зан} \sim 1 / (1 + tg\varphi)^{1,5}$.

У результаті аналізу експериментальних даних щодо впливу режимних і конструктивних факторів на характеристики запалювання факела від свічки поверхневого розряду встановлено, що в стабілізаторних пальникових пристроях із подачею газу в зону рециркуляції розподілено вздовж стабілізатора можна використовувати залежність, наведену в [12] з урахуванням кута різнойменної закрутки повітряного потоку. Узагальнююча залежність має вигляд:

$$\alpha_{зан} = K_{зан} \frac{B_{cm}^m}{W_k^n \cdot d_z \cdot K_f (1 + K_f) (1 + tg\varphi)^{1,5}} \left(\frac{T_n}{273} \right)^{1,3-2K_f}, \quad (4)$$

При обробці дослідних даних розмірність параметрів є такою: W_k , м/с;

B_{cm} , мм; d_z , мм; T_n , К, $m = n = 0,5$.



Означення варіантів стабілізаторів: φ , град. $0 \pm 30^\circ \pm 45^\circ \pm 60^\circ \pm 70^\circ$; лінійний стаб. $\circ \Delta \nabla \square \diamond$; кільцевий стаб. $\bullet \blacktriangle \blacktriangledown$

Рис. 5. Залежність відношення α_{max} / Π_{max} для стабілізаторних пальників із подачею газу в зону рециркуляції при різнойменній закрутці повітряного потоку, що обтікає стабілізатор, від швидкості повітря перед стабілізатором

Для досліджених у роботі стабілізаторів шириною $B_{ст} = 40 \div 45$ мм при інтенсивності турбулентності повітряного потоку $\varepsilon > 3,5\%$ дослідний коефіцієнт $K_{зап} = 55$.

Наведені залежності (1) та (4) з порівняною похибкою у $\pm 15\%$ узагальнюють отримані експериментальні дані і можуть бути використані для попереднього розрахунку стабілізаторних пальників із розподіленою роздачею газу вздовж стабілізатора і різнойменною закруткою повітряного потоку, що обтікає стабілізатор, у межах $\varphi = 0^\circ \div \pm 70^\circ$.

Висновки. Після аналізу проведених експериментальних досліджень щодо визначення впливу різнойменної закрутки повітряного потоку, що обтікає стабілізатор, на характеристики запалювання та бідного зриву факелу в стабілізаторних пальниках із подачею газу в зону рециркуляції встановлено, що в разі збільшення кута різнойменної закрутки підвищуються пульсаційні складники швидкості повітряного потоку, що призводить до інтенсифікації масообмінних процесів у перерізі камери і в ближньому сліді за стабілі-

затором. Величини значень коефіцієнта надлишку повітря при запалюванні факела і бідному зриві зменшуються зі збільшенням кута різнойменної закрутки повітряного потоку.

Результати роботи свідчать, що величини коефіцієнта надлишку повітря при запаленні факела є більшими, чим при бідному зриві.

Загалом із наведених даних випробувань стабілізаторних пальників можна зробити висновок, що коефіцієнти надлишку повітря при запалюванні факела і бідному зриві підвищуються в разі збільшення ширини стабілізатора, зменшення коефіцієнту затінення пальника, а також зменшення швидкості повітря. Для підвищення надійності запалювання факела і сталості горіння на бідному зриві рекомендується зменшувати швидкість повітряного потоку в пальнику.

Результати роботи щодо впливу конструктивних і режимних факторів на характеристики запалювання і бідного зриву факела в стабілізаторних пальникових пристроях можуть бути використані в попередніх розрахунках таких пальників.

Список літератури:

1. Халатов А.А. Парогазовые установки в электроэнергетике: современное состояние и перспективы развития в Украине. *Тепловая энергетика – новые вызовы времени* / Под общ. ред. П. Омеляновского и И. Мысака. Львов : НВФ «Українські технології», 2010. С. 238–247.
2. Тумановский А.Г., Гутник М.Н., Артеменко А.А. Перспективы создания высокотемпературных малотоксичных камер сгорания стационарных ГТУ. *Теплоэнергетика*. 2000. № 10. С. 23–26.
3. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. Справочное пособие. Ленинград : Недра, 1987. 336 с.
4. Христин В.А., Любчик Г.Н. Газогорелочные устройства для сжигания газа при высоких и переменных избытках воздуха : Научно-технический обзор. Серия: Использование газа в народном хозяйстве. Выпуск 10. Москва : ВНИИЭгазпром, 1978. 60 с.
5. Спейшер В.А. Сжигание газа на электростанциях и в промышленности. Москва : Энергтя, 1967. 251 с.
6. Тумановский А.Г., Гутник М.Н., Васильев В.Д., Булысова Л.В., Гутник М.М. Проблема и пути создания малотоксичных камер сгорания для перспективных стационарных ГТУ. *Теплоэнергетика*. 2006. № 7. С. 22–29.
7. Булысова Л.А., Васильев В.Д., Гутник М.Н., Гутник М.М., Ермолаев В.В., Русецкий Ю.А. Исследование горелочного модуля низкоэмиссионной камеры сгорания энергетической газотурбинной установки ГТЭ-45. *Теплоэнергетика*. 2009. № 4. С. 26–31.
8. Христин В.А. Влияние дежурной горелки на устойчивость и полноту горения факела / В.А. Христин, Ю.Н. Башкатов. *Теория и практика сжигания газа*. Вып. II. Ленинград : Недра, 1964. С. 510–516.
9. Сударев А.В., Маев В.А. Камеры сгорания газотурбинных установок. Интенсификация горения. Ленинград : Недра, 1990. 274 с.
10. Тумановский А.Г., Гутник М.Н., Соколов К.Ю. Малотоксичные камеры сгорания для энергетических ГТУ. *Теплоэнергетика*. 1997. № 3. С. 48–52.
11. Черноусенко О.Ю. Сталість процесу горіння на «бідному зриві» при мікродифузійному спалюванні газу за стабілізатором / О.Ю. Черноусенко, Л.С. Бутовський, О.О. Грановська, О.С. Мороз, О.С. Старченко. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Том 31 (70). № 2.
12. Черноусенко О.Ю. Пускові характеристики стабілізаторних пальникових пристроїв при подачі газового палива в зону рециркуляції / О.Ю. Черноусенко, Л.С. Бутовський, О.О. Грановська, О.С. Мороз, О.С. Старченко. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Том 31 (70). № 3.

**Chernousenko O.Yu., Butovsky L.S., Hranovska O.O., Moroz O.S., Starchenko O.S.
THE INFLUENCE OF DIFFERENTLY TWISTED AIR FLOWS ON THE BOUNDARYS
OF THE OPERATION OF A STABILIZER BURNER DURING
MICRODIFFUSION GAS COMBUSTION**

The article presents the results of experimental studies of the characteristics of torch ignition and poor failure in burner devices of the stabilizer type, in which the stabilizers are flown around by differently twisted air flows during microdiffusion combustion of gas and with fuel supply to the recirculation zone through a system of holes distributed along the stabilizer. Researches are carried out at tests of the linear stabilizer of 45 mm wide at changing of an angle of a different twist of an air stream $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ; \pm 60^\circ; \pm 70^\circ$, as well as a ring stabilizer with a width of 40 mm at angles $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ$. It is established that in such conditions the structure of the recirculation zone and the near trace of the stabilizer change. Studies have shown that when the air flow is twisted, the components of the flow velocity along all coordinates axes appear, and when $\varphi > 60$, the recirculation zone degenerates into a system of vortices along the stabilizer. With an increase of the angle of the rotation of the air flow the processes of mass transfer intensifies throughout the cross section of the combustion chamber and of the stabilizer, which leads to an increase in the intensity of the air turbulence. As a result of the intensification of mass transfer processes, the characteristics of torch ignition and poor flame failure deteriorate with increasing air swirling angle. The dependences of the characteristics of the torch ignition and of the poor failure from the angle of different swirls of air are established. The receiving experimental datas on the characteristics of flame ignition and poor flame failure and the obtained generalized dependences allow to perform a preliminary calculation of the characteristics of microdiffusion stabilizer burners with gas supply to the recirculation zone at different twists of air flows around the stabilizer.

Key words: stabilizer burner, diffusion combustion, torch ignition, recirculation zone, air velocity, different twists of air flows.

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 331.482-047.37:621.771

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/23>

Тарасов В.К.

Запорізький національний університет

Воденнікова О.С.

Запорізький національний університет

Румянцев В.Р.

Запорізький національний університет

Воденнікова Л.В.

Запорізький державний медичний університет

Бабошко Д.Ю.

Криворізький національний університет

ПОШУК ШЛЯХІВ ПОКРАЩЕННЯ УМОВ ПРАЦІ В ЦЕХАХ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ

На прикладі цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» проаналізовано шкідливі та небезпечні чинники, що виникають у процесі холодної прокатки сталевих листів. Згідно з аналізом карти умов праці в цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» визначено, що працівники цеху можуть піддаватися впливу таких факторів виробничого середовища: запыленість; пари кислот у травильному відділенні; підвищена температура в зоні відпалу в колпачкових печах; пари масти; високий рівень загальної вібрації та високий рівень виробничого шуму в прокатних відділеннях. Визначено характер та проаналізовано вплив мастильно-охолоджуючих рідин на працівників цехів холодної прокатки. Розглянуто шляхи утилізації мастильно-охолоджуючих рідин та зниження впливу парів у цехах холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь». Проведено оцінку раціонального засобу захисту від негативного впливу вібрації та шуму робочої зони цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» біля прокатних станів типу стан «2800», дресировальник стан «Кварто 1680», реверсний стан «1200» та інших. Для зниження впливу вібрації в умовах прокатного виробництва запропоновано використовувати віброізоляцію, засоби індивідуального захисту та інструменти з антивібраційним покриттям контактної поверхні. Встановлено характер впливу маси установки та гранично допустимої частоти власних вертикальних коливань віброізолятора на рівень загальної вібрації. З метою зменшення площі небезпечної зони від дії шуму та зниження рівня звукового тиску в цехах холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» доцільно встановити акустичний екран зі сталевих листів завтовшки 2 мм та шумопоглиначем із мінеральної вати. Розрахунковим шляхом встановлено зменшення площі зони впливу виробничого шуму з 297,91 м² до 9,81 м² та зменшення рівня шуму на 21,7 дБ, що суттєво зменшує шумове забруднення виробничого середовища. Проаналізована ефективність зниження рівня шуму в небезпечній зоні прокатного відділення залежно від зміни відстані від джерела шуму, показана доцільність використання відстані від джерела шуму в межах від 2 м до 6 м.

Ключові слова: умови праці, фактори виробничого середовища, прокатне відділення, мастильно-охолоджуючі рідини, захист від вібрації, захист від шуму.

Постановка проблеми. Відомо, що Україна, входячи в Топ-10 найбільших світових виробників сталі, значною мірою відстає від інших країн

за застосуванням новітніх прогресивних технологій, рівнем технологічного обладнання, енергоємності прокату й екологічної безпеки [1].

Розглядаючи прокатне виробництво, варто зазначити, що технологія прокатного виробництва, а зокрема холодної прокатки листової сталі, характеризується високою інтенсивністю виробництва, складним комплексом технологічних операцій, застосуванням потужного механічного, електричного та термічного обладнання. Підтримка допустимих умов праці в прокатному виробництві згідно з НПАОП 27.1-1.04-09 «Про затвердження правил охорони праці в прокатному виробництві підприємств металургійного комплексу» [2] може бути досягнута шляхом дослідження величини та рівня шкідливих чинників у робочій зоні безперервного прокатного стану та розробки раціональних засобів захисту від шкідливих та небезпечних чинників виробничого середовища.

Саме тому для потреб українських металургійних підприємств необхідно удосконалити засоби захисту від шкідливих та небезпечних чинників виробничого середовища, а зокрема дослідити ефективність сучасних систем шумозахисту біля прокатних станів та уловлювання парів мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) у цехах холодної прокатки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [3] проведено комплексні дослідження умов праці на всіх етапах металургійного виробництва, зокрема, починаючи від робочого місця шихтового відділення агломераційного цеху та закінчуючи робочим місцем пульту керування безперервно-заготівельним станом. Встановлено, що 75% працівників металургійного виробництва працюють в умовах, що не відповідають гігієнічним нормативам, належать до III-го класу 3-го або 4-го ступеня шкідливості та оцінюються як шкідливі та небезпечні. Проведені дослідження доводять необхідність розробки та впровадження профілактичних заходів для покращення умов праці на металургійних підприємствах.

На жаль, шкідливі та небезпечні чинники виробничого середовища спостерігаються в різних галузях промисловості, зокрема в ливарних цехах машинобудівних підприємств [4], у ковально-пресовому виробництві машинобудівних підприємств [5], на підприємствах чорної металургії [6; 7], у вугільній промисловості [8], гірничо-рудній промисловості [9] та інших галузях.

За даними роботи [10], ефективність управління охороною праці в Україні має відповідати основним положенням міжнародних та державних норм (наприклад, МОП-СВОН2001, ILO-OSH 200, OHSAS 18001: 2007, SA 8000, ISO 26000 та ін.).

У роботі [11] проведена оцінка факторів професійного ризику на основі гігієнічного вивчення умов праці в електросталеплавильному та прокатному виробництвах сучасних металургійних підприємств різного рівня модернізації. Запропонована комплексна система управління професійним ризиком для здоров'я робітників металургійного виробництва та визначена її результативність.

Проблемам професійної захворюваності в Україні та шляхам їх вирішення на сучасному етапі присвячено роботу А.В. Басанець, Є.П. Краснюк, І.П. Лубянова [12].

Постановка завдання. Мета роботи – удосконалення системи заходів захисту від небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища в цехах холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь».

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати вплив небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища в цехах холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь»;
- запропонувати засоби захисту робочої зони цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» біля прокатних станів від впливу мастильно-охолоджуючих речовин та надмірної дії вібрації і шуму;
- оцінити вплив маси установки та гранично допустимої частоти власних вертикальних коливань віброізолятора на рівень загальної вібрації;
- проаналізувати ефективність зниження рівня шуму в небезпечній зоні прокатного відділення залежно від зміни відстані від джерела шуму.

Виклад основного матеріалу дослідження. Практичні дані умов праці на металургійних підприємствах України, зокрема в прокатних відділеннях ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «МК «Азовсталь», ВАТ «Дніпропетровський металургійний завод імені Петровського», ПАТ «Дніпропетровський завод прокатних валків», ВАТ «Запоріжсталь», ПрАТ «Дніпроспецсталь», ЗАТ «Мініметалургійний завод ІСТІЛ» та інших металургійних підприємств показують, що працівники прокатного виробництва можуть піддаватися впливу парів кислот у травильному відділенні, високої температури в зоні відпалу та парів мастил, шуму та вібрації в прокатних відділеннях.

Так, за картою умов праці у відділенні прокатки і дресирування листів в умовах цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь», на працівників впливають основні негативні та шкідливі фактори виробничого середовища: шум, вібрація та пари мастил (табл. 1). Аналіз потенційно-небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища

в цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» показує, що умови і характер праці в цеху належать до III класу 3-го ступеня, робоче місце має наявності: 1 фактор 1-го ступеня, 1 фактор 2-го ступеня, 2 фактори 3-го ступеня. За показниками робоче місце варто вважати місцем з особливо шкідливими умовами праці.

Невловлювані пари мастил, що зосереджені в робочій зоні, конденсуються природними шляхами та осідають на обладнанні та пішохідних майданчиках, що може бути причиною травм працівників у цеху від ковзання та падіння. Основною причиною виділення парів є мастильно-охолоджуючі рідини (МОР), які знижують коефіцієнт тертя

в процесі прокатки смуг та листів, сприяють зменшенню зносу валків і налипанню металу на валки, запобіганню смуг і листів від задирів, формуванню допустимої мікрогеометрії поверхні продукції, очищенню поверхні листів від забруднень.

Небажані втрати мастил приводять до підвищення вартості готової продукції та значних втрат на їх утилізацію.

Дані роботи [13] показують, що негативний вплив МОР на працівників цеху холодної прокатки пов'язаний із потраплянням їх на шкіру та в дихальні шляхи в процесі приготування емульсії, її розбризкування та перегріву при охолодженні смуги і листів в процесі прокатки.

Таблиця 1

Оцінка факторів виробничого середовища трудового процесу в цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь»

Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення (ГДК)	Фактичне значення	III клас – шкідливі та небезпечні умови, характер праці			Час дії фактора, %, за зміну
			1 ступінь	2 ступінь	3 ступінь	
Шкідливі хімічні речовини, мг/м ³ : I клас безпеки масла мінеральні	5	9,2	1,84	–	–	96,6
Пил переважно фіброгенної дії, мг/м ³	4	19,6	–	4,9	–	60,2
Вібрація (загальна і локальна), дБ	109	121	–	–	12	95,0
Шум, дБА	80	103	–	–	23	100
Тяжкість праці, напруженість праці	середня, П.б; помірна	–	–	–	–	–
Кількість шкідливих чинників	–	–	1	1	2	–

Таблиця 2

Характер та оцінка рівня впливу мастильно-охолоджуючих рідин на працівників цеху холодної прокатки

Найменування показника оцінки дії різних чинників	Рівень дії	Кількість балів	Ступень впливу
Подразнююча дія на очі	немає впливу	0	×
	слабка дія	1	–
	подразнююча дія	2	–
Шкіряно-резорбитивна	не впливає	0	–
	слабка дія	1	–
	подразнююча дія	2	×
Сенсibiliзуюча	не впливає	0	–
	слабка дія	1	×
	подразнююча дія	2	–
Токсичні речовини, що виділяються в процесі експлуатації МОР	I клас безпеки	4	–
	II клас безпеки	3	–
	III клас безпеки	2	–
	IV клас безпеки	1	×

В умовах холодної прокатки листів найбільш імовірним впливом на працівників є потрапляння парів мастил у дихальну систему та легені. Попадання бризок МОР на шкіру рук і обличчя малоімовірно через наявність спецодягу, але можливе в разі аварій. В умовах постійного і тривалого перебування в шкідливій зоні спостерігаються випадки алергічних реакцій, що виникають внаслідок попадання мастильно-охолоджувальної емульсії на шкіру, вдихання її парів і масляного туману [14].

Відпрацьовані МОР із промислових майданчиків просочуються в ґрунт і мігрують із підземними водами, забруднюючи водою органічними сполуками та іншими токсичними речовинами і присадками. Ступінь впливу МОР на працівників цеху холодної прокатки та екологічну безпеку наведений у табл. 2 та табл. 3, він показує, що в цехах холодної прокатки негативний вплив парів мастил помірний, проте за умови тривалого їх впливу підвищується вірогідність різних захворювань легенів та шкіри.

Згідно з роботою, для утилізації мастил та зниження впливу парів у цехах холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» рекомендовано встановити вдосконалену вентиляційну систему безперервного листового стану холодної прокату, яка сприяє збільшенню кратності повітряобміну в межах 10–25 та картриджний фільтр типу NOM 112 для уловлення особливо шкідливих субмікронних часток до 0,5 мкм.

Таблиця 3

Оцінка сумарної дії шкідливих чинників парів мастильно-охолоджуючих рідин

Сумарний рейтинговий бал, балів	Ступінь впливу мастильно-охолоджуючих рідин	Умове позначення	Результат оцінки
10–12	Гіпер	ГВ	–
7–9	Сильний	СВ	–
4–6	Помірний	ПВ	×
1–3	Слабкий	СлВ	–
0	Без дії	БД	–

Сильний та тривалий вплив шуму і вібрації можуть бути причиною функціональних змін серцево-судинної і нервової систем у людини. Вібрація викликає порушення фізіологічного та функціонального станів людини.

Вплив загальної виробничої вібрації на здоров'я працівників цеху холодної прокатки має

відповідати ДСТУ EN 14253:2018 [16]. Загальні вимоги до методів оцінювання шумового навантаження у виробничих приміщеннях із постійним та непостійним шумом для окремих працівників та їх груп на постійних і непостійних робочих місцях у цеху холодної прокатки мають відповідати ДСТУ 2867-94 [17].

Введення дистанційного управління технологічним обладнанням цеху повністю вирішить проблему захисту від шуму та вібрації.

Вібрація від обладнання в цехах холодної прокатки має характер стаціонарних випадкових (з основною частотою від 4 Гц до 8 Гц) і ударного типу (від 2 до 5 поштовхів на секунду за тривалості 0,05–0,3 с) коливань.

Як методи боротьби з вібрацією на металургійному підприємстві слід використовувати індивідуальні засоби захисту (наприклад, спеціальні захисні рукавиці) та інструменти з антивібраційним покриттям контактної поверхні. Як колективний захід захисту від вібрації рекомендовано використовувати віброізолятор.

Сумарна жорсткість віброізоляторів у вертикальному напрямі розраховується за формулою [18]:

$$\sum K_e = 4\pi^2 f_{од}^2 = 39,48 f_{од}^2 m_0, \quad (1)$$

де $f_{од}$ – гранично допустима частота власних вертикальних коливань віброізолятора, Гц; m_0 – сумарна маса установки, що складається з суми маси установки та маси рами, кг.

Якщо змінювати масу установки в діапазоні від 5 т до 10 т та варіювати значення допустимої частоти власних вертикальних коливань віброізолятора в діапазоні від 2 Гц до 8 Гц, спостерігається прямо пропорційне збільшення сумарної жорсткості віброізолятора до 32 разів (рис. 1 та рис. 2). При допустимій зоні частоти від 2 Гц до 4 Гц сумарна жорсткість віброізоляторів знаходиться в межах 789,6 Н/м до 6316,8 Н/м.

У процесі пошуку засобів захисту робочої зони прокатного відділення ВАТ «Запоріжсталь» біля прокатних станів типу стан «2800», дресирувальний стан «Кварто 1680», реверсний стан «1200» та інших для зменшення площі небезпечної зони від дії шуму та зниження рівня звукового тиску запропоновано встановити акустичний екран зі сталевого листа завтовшки 2 мм та шумопоглиначем із мінеральної вати.

Згідно з табл. 1, еквівалентний рівень шуму в цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» становить 103 дБА, що значно перевершує допустиму норму в 80 дБА для постійних робочих

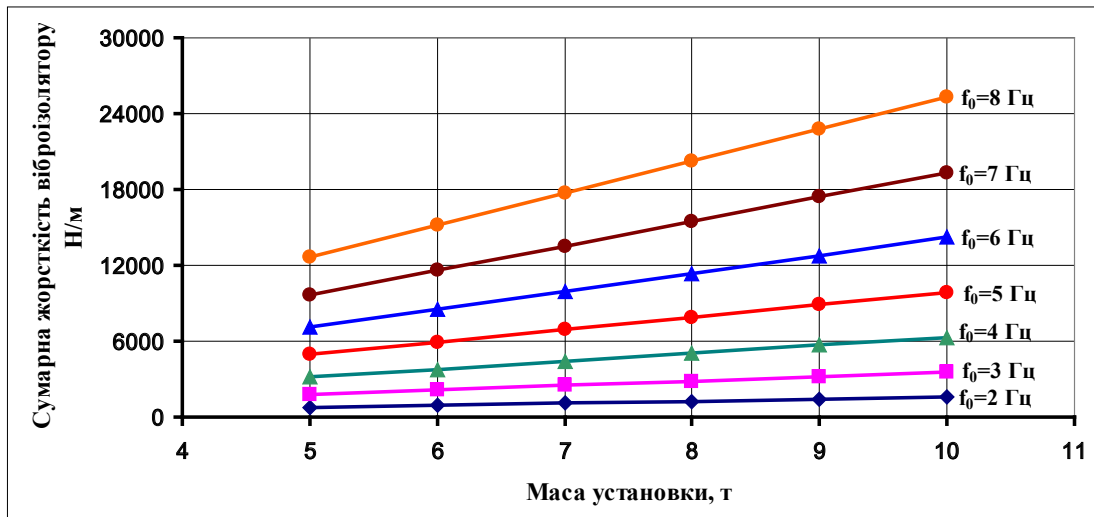


Рис. 1. Залежність сумарної жорсткості віброізолятора у вертикальному напрямі від сумарної маси установки

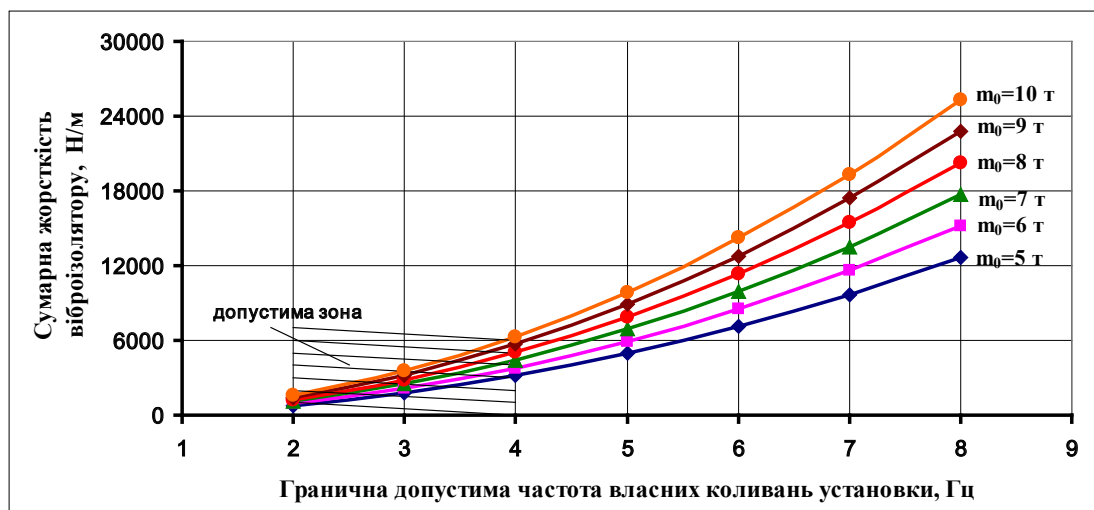


Рис. 2. Залежність сумарної жорсткості віброізолятора у вертикальному напрямі від гранично допустимої частоти власних коливань

місце. Залежно від збільшення відстані від небезпечної зони рівень шуму знижується:

$$L_r = L_1 - 20 \lg r / r_1, \quad (2)$$

де L_1 – рівень шуму на відстані r_1 від джерела шуму, дБА; r_1 – рівень шуму на відстані 1 м від джерела шуму.

Знаходимо значення r для допустимої норми шуму у 80 дБА:

$$\lg r / r_1 = \frac{L_1 - L_r}{20},$$

$$\lg r / r_1 = \frac{103 - 80}{20} = 1,15,$$

Звідки значення r дорівнює 14 м.

Площа небезпечної зони від дії шуму (рис. 3) буде дорівнювати:

$$S_{дзп} = \frac{\pi \cdot r^2}{2}, \quad (3)$$

$$S_{дзп} = \frac{3,14 \cdot 14^2}{2} = 307,72 \text{ м}^2.$$

Визначаємо зниження рівню шуму за допомогою встановлення акустичного екрана:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg S - 10 \lg \Pi, \quad (4)$$

де L_2 – допустимий рівень звукового тиску, приймаємо його рівним 80 дБА;

S – площа екрана, приймаємо $S = H \cdot l = 3 \cdot 4 = 12 \text{ м}^2$; Π – коефіцієнт звукопоглинання.

$$\Pi = \frac{A}{1 - \alpha}, \quad (5)$$

де A – звукопоглинання на поверхні; α – середній коефіцієнт звукопоглинання матеріалів.

Приймаючи звукопоглинання на поверхні сталі $\alpha_{стали}=0,1$ та на поверхні мінеральної вати $\alpha_{вати}=0,69$ при частоті $f=1000$ Гц, отримуємо:

$$A = (\alpha_C + \alpha_B) \cdot S, \quad (6)$$

$$A = (0,1 + 0,69) \cdot 12 = 9,5 \text{ м}^2.$$

Приймаємо середній коефіцієнт звукопоглинання матеріалів рівним:

$$\alpha = \frac{\alpha_{стали} + \alpha_{вати}}{2}, \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{0,1 + 0,69}{2} = 0,395.$$

Тоді, підставляючи отримані дані у формулу (4), отримуємо:

$$\Pi = \frac{9,5}{1 - 0,395} = 16,3.$$

Зниження рівню шуму за допомогою встановлення акустичного екрана становить:

$$R = 103 - 80 + 10 \lg 12 - 10 \lg 16,3 = 23 + 10 \cdot 1,08 - 10 \cdot 1,21 = 21,7 \text{ дБ}.$$

У разі встановлення акустичного екрана на відстані 2,5 м від джерела шуму, площа, обмежена екраном, становить:

$$S_{ek} = \frac{\pi}{2} \cdot (r^2 - r_{ek}^2), \quad (8)$$

$$S_{ek} = \frac{3,14}{2} \cdot (14^2 - 2,5^2) = 297,91 \text{ м}^2.$$

Отже, площа небезпечної зони дорівнює:

$$S_{НЗ} = S_{ДЗП} - S_{ek},$$

$$S_{НЗ} = 307,72 - 297,91 = 9,81 \text{ м}^2.$$

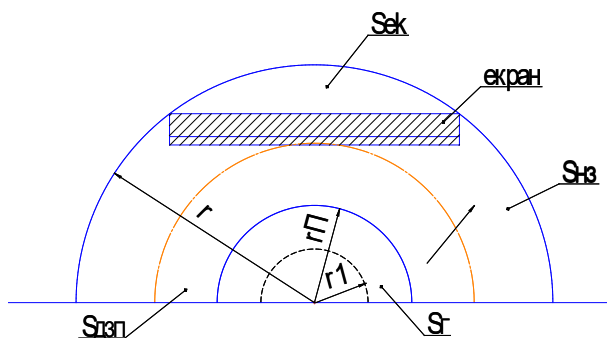


Рис. 3. Схема розрахунку площі небезпечної зони від дії шуму: $S_{НЗ}$ – площа небезпечної зони; S_{ek} – площа зони, що обмежена екраном; $S_{Г}$ – площа зони, де необхідно використати індивідуальні засоби захисту; $S_{ДЗП}$ – допустима зона праці після встановлення екрана; r_1 – рівень шуму на відстані 1 м від джерела шуму; r – радіус зони, де може працювати тільки персонал стану

Таким чином, розрахунковим шляхом встановлено зменшення площі зони впливу виробничого шуму з $297,91 \text{ м}^2$ до $9,81 \text{ м}^2$ та зменшення рівня шуму на $21,7 \text{ дБ}$, що суттєво знижує шумове забруднення виробничого середовища.

Розсіювання звуку в повітрі зменшує негативний вплив шуму на робочу зону на відстані:

$$L_{розсіювання} = 10 \lg (R / R_0), \quad (9)$$

де R – відстань акустичного центру джерела шуму до розрахункової точки, м; R_0 – радіус джерела шуму, приймаємо рівним $1,5 \text{ м}$.

З урахуванням турбулентності повітря, пов'язаного з роботою агрегата та руху повітря внаслідок дії витяжної вентиляції, отримуємо:

$$\Delta L_{розсіювання}^m = \frac{3}{1,6 + 10^5 (1/R)^2}, \quad (10)$$

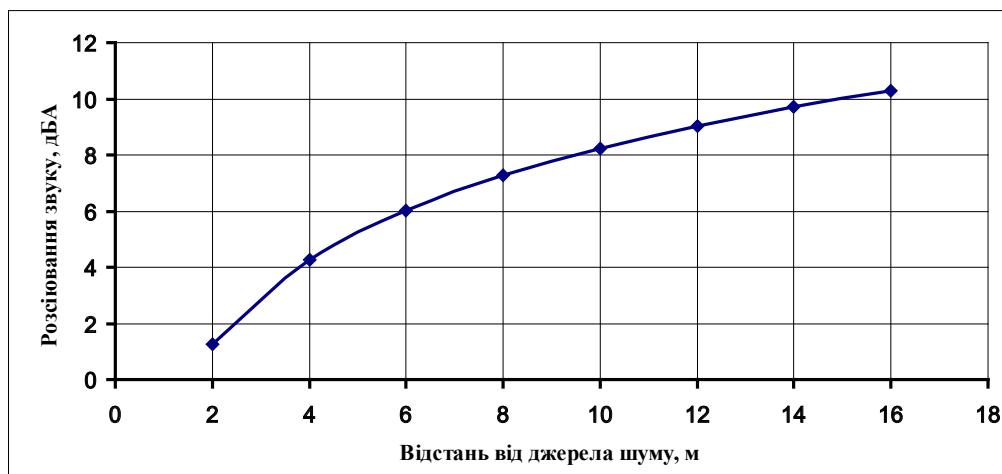


Рис. 4. Залежність розсіювання звуку від зміни відстані від джерела шуму

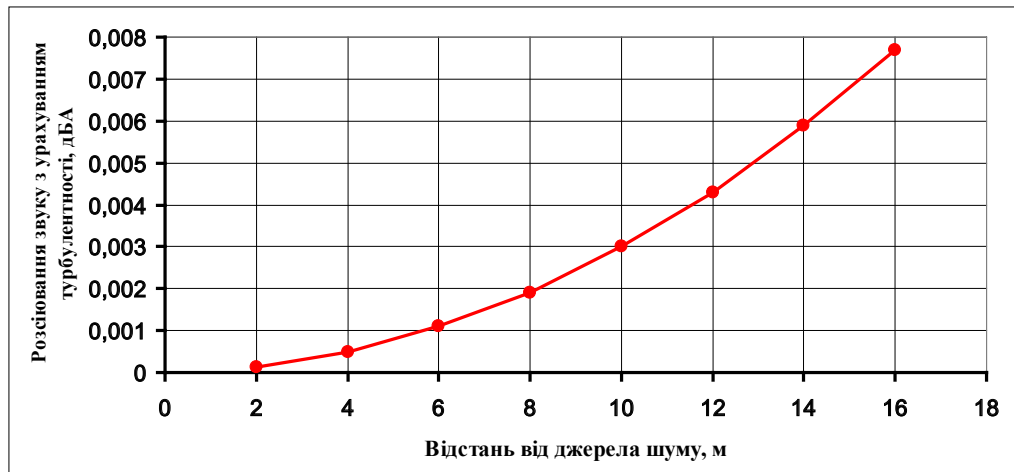


Рис. 5. Залежність розсіювання звуку з урахуванням турбулентності від зміни відстані від джерела шуму

Варіюючи значеннями відстані від джерела шуму в межах від 2 м до 16 м за формулою (9), отримуємо значення розсіювання звуку в повітрі, представлене на рис. 4. У робочій зоні, що знаходиться до 4 м до джерела шуму, спостерігається незначне розсіювання (1,6–4,1%), проте в разі збільшення відстані до 10–16 м вплив вже сягає 7,9–10,2%, і його необхідно враховувати при розрахунках захисних засобів.

Турбулентність повітря незначною мірою (до 0,008 дБ) впливає на розсіювання (рис. 5), тому, розраховуючи робочу витяжну вентиляцію, цей параметр варто враховувати.

Висновки. Серед шляхів покращення умов праці в цехах холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» рекомендовано:

- для зниження впливу мастильно-охолоджуючих речовин на здоров'я працівників цехів холодної прокатки та навколишнє середовище підвищити ефективність вентиляційної системи безперервного листового стану холодної прокатки та додатково встановити картриджний фільтр типу NOM 112;

- для зниження впливу вібрації доцільно використовувати віброізоляцію, засоби індивідуального захисту та інструменти з антивібраційним покриттям контактної поверхні;

- для зниження рівня шуму встановлення акустичного екрана зі сталевих листів завтовшки 2 мм та звукопоглиначем із мінеральної вати.

Список літератури:

1. Бізнес-портал ua.prom.info. URL: <http://uaprom.info/article/5007-proizvodstvo-prokata-v-ukraine-sovremennoe-sostojanie.html> (дата звернення: 01.07.2020).
2. НПАОП 27.1-1.04-09. Про затвердження правил охорони праці в прокатному виробництві підприємств металургійного комплексу [Чинний від 2009-07-29]. Київ : Державний комітет з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду, 2009. 65 с.
3. Орехова О.В. Сучасний стан умов праці в металургійному виробництві України. *ScienceRise. Medical science*. 2016. № 10. С. 34–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/texcsrm_2016_10_8
4. Хамитова Р.Я., Лоскутов Д.В. Профессиональный риск развития болезней органов дыхания у работников литейных цехов машиностроительных предприятий. *Гигиена и санитария*. 2012. № 1. С. 23–26.
5. Никитин А.С. Гигиенические особенности условий труда и состояния здоровья работников современного литейного и кузнечно-прессового производств предприятия машиностроения и пути их оптимизации : дис. ... канд. мед. наук : 14.02.01 / ГОУВПО «Рязанский государственный медицинский университет». Рязань, 2011. 132 с.
6. Кошкина В.С., Антипанова Н.А., Котляр Н.Н. Мониторинг распространенности химических канцерогенов в объектах окружающей среды и биосредах у жителей города с развитой отраслью черной металлургии. *Гигиена и санитария*. 2006. № 1. С. 12–13.
7. Тарасов В.К., Румянцев В.Р., Новокщона О.В., Ткаліч І.О. Розробка заходів покращення умов праці при виробництві чавуну. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Економічні науки*. 2018. № 2 (121). С. 82–90.
8. Kirsch P. Riskgate: Industry Sharing Risk Controls Across Australian Coal Operations. *Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering*. 2014. Vol. 11. Issue 1. Pp. 47–58.

9. Жеглова А. В. Системный подход к управлению профессиональным риском нарушений здоровья работников горнорудной промышленности : автореф. дис. ... доктора. мед. наук : 14.00.50. Москва, 2009. 48 с.
10. Зеркалов Д.В. Безпека праці : монографія. Київ : Основа, 2012. 637.
11. Егорова А.М. Системный подход к управлению профессиональным риском для здоровья рабочих металлургического производства : автореф. дис. ... доктора. мед. наук : 14.00.50. Москва, 2008. 20 с.
12. Басанец А.В., Краснюк Е.П., Лубянова И.П. Проблемы профессиональной заболеваемости в Украине и пути их решения на современном этапе. *Гігієнічна наука та практика на рубежі століть* : матер. XIV з'їзду гігієністів України. Дніпропетровськ, 2004. Т. II. С. 38–41.
13. Молчанова З.В. Охрана труда в прокатном производстве. Москва : Металлургия, 1973. 248 с.
14. Влияние СОЖ на здоровье человека и окружающую среду. URL: https://oilcool.ru/article/vliyanie_sozh_na_cheloveka_i_okruzhayu-shchuyu_sredu/ (дата звернення: 01.07.2020).
15. Тарасов В.К., Воденнікова О.С., Куріс Ю.В., Матяшева О.Б., Воденнікова Л.В., Бабошко Д.Ю. Дослідження заходів покращення умов праці в цехах холодної прокатки. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2020. Т. 31(70). № 3. С. 191–196.
16. ДСТУ EN 14253:2018. Вібрація механічна. Вимірювання та обчислювання впливу на здоров'я загальної виробничої вібрації. Практична настанова (EN 14253:2003 + A1:2007, IDT). [Чинний від 2020-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 15 с.
17. ДСТУ 2867-94. Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги [Чинний від 1996-01-01]. Київ: Держстандарт України, 1994. 32 с.
18. Курдюмов В.И. Проектирование и расчет средств обеспечения безопасности : учеб. пособие. Москва : Колос, 2005. 216 с.

Tarasov V.K., Vodennikova O.S., Rumyantsev V.R., Vodennikova L.V., Babochko D.Yu.
SEARCH FOR WAYS IN ORDER TO IMPROVE WORKING CONDITIONS
IN COLD ROLLING SHOPS

On the example of the cold rolling shop of JSC “Zaporizhstal” the harmful and dangerous factors that arise in the process of cold rolling of steel sheets are analyzed. According to the analysis of the map of working conditions in the cold rolling shop of JSC “Zaporizhstal” it is determined that the workers of the shop may be exposed to the following factors of the production environment: dust; acid vapors in the pickling compartment; elevated temperature in the annealing zone in hood furnaces; steam vapors; high level of general vibrations and high level of production noise in rolling mills. The nature and influence of lubricating and cooling liquids on employees of cold rolling shops are determined. Ways of utilization of lubricating and cooling liquids and reduction of influence of vapors in shops of cold rolling of JSC “Zaporizhstal” are considered. An assessment of the rational means of protection against the negative effects of vibration and noise of the working area of the cold rolling shop of JSC “Zaporizhstal” near rolling mills such as mill “2800”, trainer mill “Quarto 1680”, reverse mill “1200” and others. In order to reduce the impact of vibration under the conditions of rolling production, it is proposed to use vibration insulation, personal protective equipment and tools with anti-vibration coating of the contact surface. The nature of the influence of the installation mass and the maximum allowable frequency of natural vertical oscillations of the vibration isolator on the level of the general vibration is established. In order to reduce the area of the danger zone from noise and reduce the sound pressure level in the cold rolling shops of JSC “Zaporizhstal” it is advisable to install an acoustic screen made of steel sheet with a thickness of 2 mm and a sound absorber made of mineral wool. The reduction of the area of the industrial noise impact zone from 297,91 m² to 9,81 m² and the reduction of the noise level by 21,7 dB, which significantly reduces the noise pollution of the industrial environment, have been calculated. The efficiency of noise reduction in the danger zone of the rolling mill depending on the change of distance from the noise source is analyzed and the expediency of using the distance from the noise source in the range from 2 m to 16 m is shown.

Key words: working conditions, factors of the production environment, rolling department, lubricating and cooling liquids, protection against vibration, protection against noise.

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 504.064.4:66.097

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/24>

Іваненко О.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гомеля М.Д.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Панов Є.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЗІ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ МОНООКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПЕЧЕЙ ВИПАЛЮВАННЯ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОДІВ

На основі статистичних даних за 2018 рік показано, що в Україні 45,81% викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел та автомобільного транспорту представлені викидами токсичного монооксиду вуглецю та становлять серйозну проблему, котра повинна вирішуватися на рівні промислових виробництв. Визначено, що скупчення в місті Запоріжжі промислових підприємств з переважанням важкої промисловості, до переліку яких входить ПрАТ «Український графіт», призвело до утворення території значного техногенного впливу, навантаження якого на довкілля України за рахунок монооксиду вуглецю становить близько 7%. Під час моделювання розсіювання викидів монооксиду вуглецю димових газів печей випалювання у виробництві електродів на ПрАТ «Український графіт» визначено перевищення приземних концентрацій монооксиду вуглецю з урахуванням фону на рівні 1,1–1,2ГДК, що обґрунтовує необхідність розробки технічних рішень щодо зменшення викидів монооксиду вуглецю в атмосферу для підвищення екологічної безпеки виробництва. У результаті проведення досліджень термообробки пересипки заготовок електродів було встановлено, що монооксид вуглецю утворюється за температур, вищих за 400°C, що дає можливість доокислювати СО в присутності каталізаторів до СО₂ та суттєво знижувати викиди монооксиду вуглецю. Було визначено, що найнижча кількість монооксиду вуглецю у газових сумішах відзначена за концентрації кисню 14%. Показано, що у разі нанесення на пересипку електродів діоксиду марганцю з 5 % розчину перманганату калію значно зростає швидкість процесу окислення монооксиду вуглецю до діоксиду вуглецю. У разі виконання розрахунку рівня приземних концентрацій монооксиду вуглецю в атмосферному повітрі після впровадження у виробництво розробленого технічного рішення щодо застосування пересипки, модифікованої 5 % розчином перманганату калію, встановлено дотримання санітарно-гігієнічних норм та нормативів на викиди. Обґрунтовано, що перевагою використання модифікованої MnO₂ пересипки є невисокі матеріальні затрати на обробку пересипки порівняно зі значними капіталовкладеннями на будівництво каталітичних реакторів із знешкодження СО.

Ключові слова: монооксид вуглецю, печі випалювання, димові гази, пересипка, діоксид марганцю, атмосфера повітря, зниження викидів.

Постановка проблеми. Серед українських промислових підприємств ПрАТ «Український графіт» (м. Запоріжжя) посідає одне з чільних місць, будучи провідним виробником в Україні графітованих електродів для електросталеплавильних та руднотерміч-

них печей, вуглецевих мас для алюмінієвих електролізерів Содерберга, анодів магнієвих електролізерів, матеріалів для футеровки доменних та феросплавних печей на основі вуглецю для підприємств металургійної, машинобудівної, хімічної та інших

галузей. Ефективна робота цього підприємства пов'язана з упровадженням новітніх технологій, сучасного технологічного обладнання, з розробкою нових видів вуглецевих матеріалів та розширенням асортименту високоякісних виробів. Проте процеси термообробки вуглецевих матеріалів, на основі яких виробляється продукція підприємства, супроводжуються утворенням високих концентрацій монооксиду вуглецю і є екологічно небезпечними [1, с. 9].

Як відомо, монооксид вуглецю (чадний газ) – безколірний отруйний газ без запаху. Відповідно до прийнятої класифікації впливу на людський організм монооксид вуглецю належить до токсичних речовин загальної дії. Це речовини, які викликають отруєння всього організму загалом або впливають на окремі органи і системи (наприклад, кровотворення, центральну нервову систему) [2, с. 24].

За даними Державної служби статистики України за 2018 рік [3, с. 30], підвищене техногенне навантаження на повітря в Україні формується за рахунок викидів монооксиду вуглецю, які становлять 744,3 тис. тонн у рік від стаціонарних джерел забруднення та 1016,8 тис. тонн у рік від автомобільного транспорту, загалом 1761,1 тис. тонн у рік.

Як видно з рис. 1, 2, 3, 29,9% викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел та 74,9% викидів від автомобільного транспорту і загалом 45,81% представлені викидами токсичного монооксиду вуглецю та становлять серйозну проблему, котра повинна вирішуватися на первинному рівні джерела забруднення, зокрема, на рівні промислових виробництв.

Що стосується Запоріжжя [3, с. 43], то скупчення в місті промислових підприємств із переважанням важкої промисловості призвело до утворення території значного техногенного впливу, навантаження якого на довкілля України за рахунок монооксиду вуглецю становить близько 7%, тобто 52,7 тис. т у рік з 744, 3 тис. т за рахунок стаціонарних джерел забруднення.

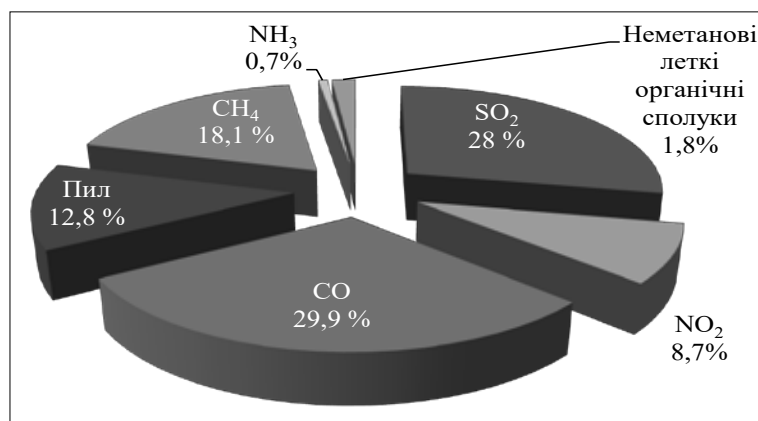


Рис. 1. Діаграма викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел забруднення у атмосферне повітря України за 2018 рік (2486,8 тис. т)

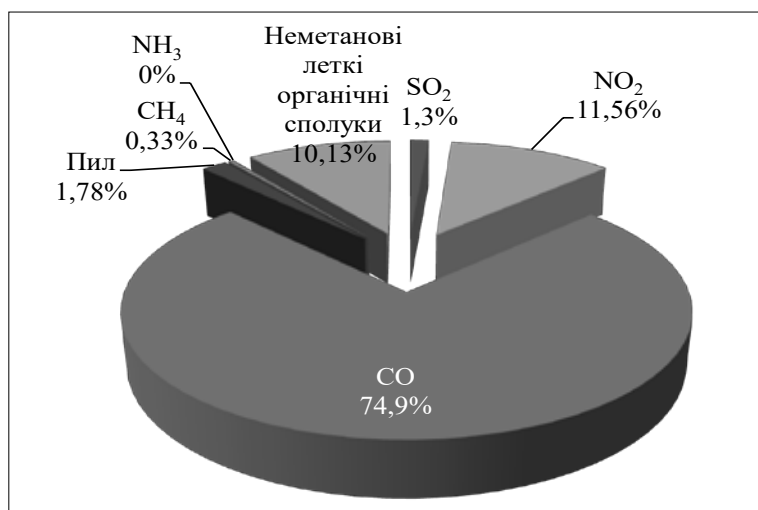


Рис. 2. Діаграма викидів забруднюючих речовин від автомобільного транспорту у атмосферне повітря України за 2018 рік (1357,507 тис. т)

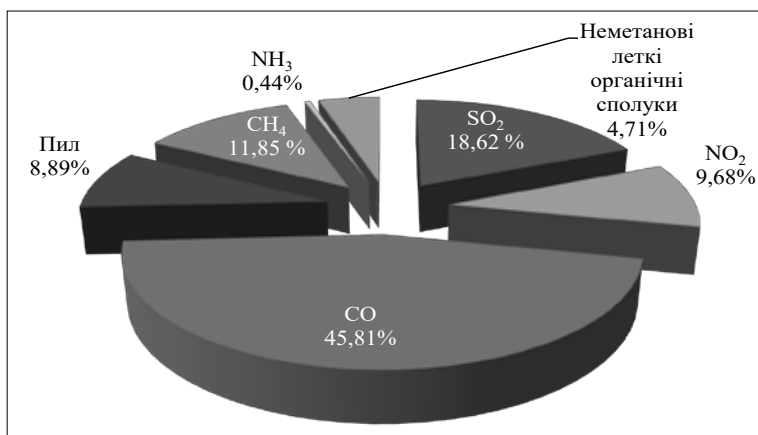


Рис. 3. Сумарна діаграма викидів забруднюючих речовин від стаціонарних джерел забруднення та автомобільного транспорту у атмосферне повітря України за 2018 рік (3844,307 тис. т)

Якщо врахувати, що у викидах ПрАТ «Український графіт» присутній монооксид вуглецю в кількості 41,97% [1, с. 12], в цілях підвищення екологічної безпеки підприємства та України загалом необхідно розробляти заходи щодо зниження викидів монооксиду вуглецю димових газів, що утворюються головним чином у печах випалювання під час виробництва електродів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Випалювання спресованих електродних заготовок являє собою процес термічної обробки до температур, близьких 1000°C, за визначеним графіком і швидкістю для забезпечення необхідної якості електродної продукції, в результаті чого відбувається спікання частинок вуглецевого наповнювача і сполучного кам'яновугільного пеку. У разі використання для випалювання електродних заготовок багатокамерних печей типу Рідгамера їх особливістю є пересипка вуглецевим зернистим матеріалом встановлених у печі заготовок. Як показали попередні дослідження [4, с. 15], утворення монооксиду вуглецю в димових газах печей відбувається як за рахунок часткового окислення матеріалів заготовок, так і, що вірогідніше, пересипки. Як показали багаторазові дослідження, зменшення маси пересипки за весь цикл термообробки становить близько 6% [5, с. 75].

Натепер за нормативу граничнодопустимого викиду CO 250 мг/м³ [6, с. 3] у ПрАТ «Український графіт» спостерігається перевищення цього нормативу у печах № 9 (джерело викиду 326), де фактичний викид сягає 998,3 мг/м³, та у печах № 10 (джерело викиду 347) з фактичним викидом 1750 мг/м³. Таким чином, необхідність перетворення цього процесу в екологічно чистий складник електродного виробництва вимагає пошуку дієвих рішень зі зниження утворення CO в процесі випалювання електродів.

Серед запропонованих кроків зі зниження інтенсивності газовиділення під час випалювання заготовок визначальними є модернізація регламенту обпалу [7, с. 44], застосування теплообмінника-утилізатора для локального допалу CO [8, с. 40], заміна багатокамерних кільцевих печей типу Рідгамера на тунельні печі обпалу [9, с. 18], використання каталітичних методів знешкодження CO [2, с. 33; 10, с. 92] тощо. Впровадження таких технічних рішень на підприємстві обмежене або взагалі неможливе внаслідок значних капітальних витрат на реконструкцію чи модернізацію виробництва. Тому досі на виробництві залишається актуальним розв'язання питання шкідливого впливу викидів монооксиду

вуглецю в атмосферне повітря та розробки заходів щодо зниження його негативного впливу на навколишнє середовище і прилеглу житлову та громадську забудову економічно доцільним шляхом без суттєвого переоснащення виробництва.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є розробка науково-технічних рішень зі зниження викидів монооксиду вуглецю димових газів печей випалювання під час виробництва електродів і дотримання екологічних нормативів, встановлених в Україні.

Для досягнення поставлених цілей у роботі необхідно провести моделювання розсіювання забруднюючих речовин у атмосферному повітрі, що містяться у викидах підприємства ПрАТ «Український графіт», та обґрунтувати необхідність розробки технічних рішень щодо зменшення викидів монооксиду вуглецю в атмосферу для підвищення екологічної безпеки виробництва.

Виклад основного матеріалу. Промисловий майданчик ПрАТ «Український графіт» входить у склад промислового вузла, розташованого в північно-східному напрямку основного житлового масиву м. Запоріжжя, в його східній частині на лівому березі р. Дніпро. Для оцінки екологічної безпеки наявного стану підприємства в житловій та громадській забудові виконаний розрахунок приземних концентрацій монооксиду вуглецю в атмосферному повітрі з урахуванням розмірів санітарно-захисної зони, що становить 1000 м.

Розрахунок виконаний з використанням програмного комплексу «ЕОЛ Плюс (версія 5.3.8)», розробленої ТОВ «Топаз» (м. Київ) і погодженої Міністерством охорони навколишнього природного середовища України (3141/10/2-10 від 27.03.2007).

Розрахунки виконувались у разі середньозважених небезпечних швидкостей вітру $1U_{неб}$, $0,5U_{неб}$, $1,5U_{неб}$, 0,5 м/с, 1 м/с, 1,5 м/с, 2,0 м/с, 2,5 м/с. Розташування джерела викиду забруднюючих речовин в атмосферу визначено в координатній сітці «Х-У», яка орієнтована по сторонах світу: вісь «0У» – напрямом «Південь–Північ», вісь «0Х» – «Захід–Схід». Поля максимальних концентрацій розраховувались для території, представленій у вигляді розрахункового квадрата зі стороною 6,0 км із кроком розрахункової сітки 250 м. Крок перебору небезпечних напрямків вітру становив 10 градусів. Розрахунок розсіювання виконувався з урахуванням фонових концентрацій, а також середньорічна роза вітрів приймалася згідно з даними Запорізького обласного центру з гідрометеорології.

Аналіз результатів розрахунку забруднення атмосферного повітря показав, що в п'яти точках розрахункового майданчика спостерігається перевищення максимально допустимої концентрації монооксиду вуглецю, що становить 5 мг/м³, з урахуванням фону в 1,1–1,2 раза (табл. 1, рис. 4).

Отже, негативним фактором функціонування ПрАТ «Український графіт», який безпосередньо впливає на довкілля та здоров'я людини, є викиди монооксиду вуглецю в атмосферне повітря, що, своєю чергою, вимагає впровадження технічних рішень з мінімізації викидів монооксиду вуглецю та дотримання санітарно-гігієнічних норм

Таблиця 1

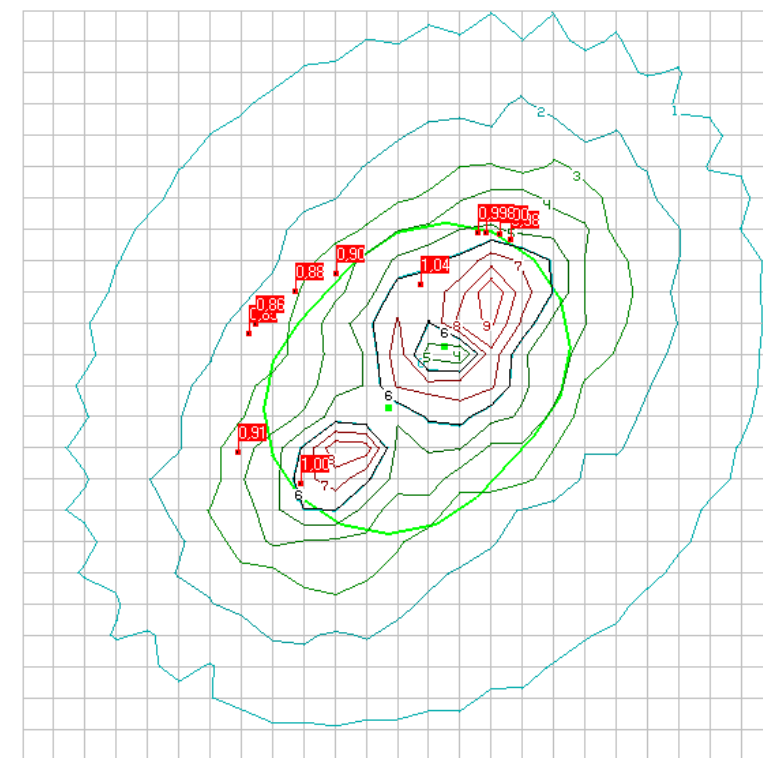
Перелік найбільших приземних концентрацій монооксиду вуглецю у разі заданих напрямків та величин швидкості вітру за наявного стану функціонування ПрАТ «Український графіт»

Координата X, м	Координата Y, м	Концентрація в точці, мг/м ³	Концентрація в точці, долей ГДК	Напрямок вітру, град.	Швидкість вітру, м/с	Код джерела	Внесок, %	Код джерела	Внесок, %
13783	16527	5,992465	1,198493	120,00	2,46	347	82,09	326	17,91
14033	16777	5,808430	1,161686	130,00	2,50	347	69,54	326	30,46
14033	16527	5,652540	1,130508	150,00	2,46	347	80,84	326	19,16
13033	15527	5,598890	1,119778	300,00	2,50	326	68,31	347	31,69
12783	15527	5,549255	1,109851	320,00	2,50	326	57,62	347	42,38

Речовина 06000 / 337 Оксид вуглецю

19026.5

13026.5



10283

16283

Ізолінії концентрацій монооксиду вуглецю: 0 – 1ГДК; 1 – 0,802ГДК; 2 – 0,842ГДК; 3 – 0,882ГДК; 4 – 0,922ГДК; 5 – 0,962ГДК; 6 – 1,002ГДК; 7 – 1,042ГДК; 8 – 1,082ГДК; 9 – 1,122ГДК

Рис. 4. Карта-схема розсіювання викидів монооксиду вуглецю за наявного стану функціонування ПрАТ «Український графіт»

і нормативів на викиди згідно з Наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309.

Як показали дослідження газовиділення печей випалювання під час виробництва електродів [11, с. 89], максимальна концентрація монооксиду вуглецю, що вимірювалась безпосередньо в камерах печей випалювання, сягала 3500–3700 мг/дм³. Необхідно також відзначити, що за результатами попередніх досліджень різке підвищення концентрації СО в димових газах відбувається за температури заготовок 320–390°C. Досягнута концентрація СО в газовій суміші практично не змінюється до викидів в атмосферу. З урахуванням того, що в склад димових газів входить

кисень з концентрацією 14% та пари води з концентрацією 8%, високий вміст СО можна теоретично обґрунтувати присутністю лімітуючої стадії конверсії монооксиду вуглецю в діоксид вуглецю. Загалом, виходячи з незначного збільшення констант швидкостей реакцій окислення СО від температури, було зроблено припущення про необхідність використання каталізаторів для прискорення процесів його окислення. При цьому застосування каталізатора повинно обумовлювати невисокі матеріальні затрати на обробку вуглецевого матеріалу порівняно зі значними капіталовкладеннями на будівництво каталітичних реакторів із знешкодження СО. Таким чином, є необхідність дослідження залежності кількості

утвореного монооксиду вуглецю під час використання немодифікованої та модифікованої каталізатором пересипки за різних концентрацій кисню в газовій суміші.

Обов'язковою умовою проведення процесу лабораторного моделювання утворення монооксиду вуглецю в печі випалювання у разі використання пересипки є дотримання теплового регламенту печі та вмісту кисню в суміші газів. Як матеріал для дослідження використовували термоантрацитну пересипку крупністю 2,8–6 мм.

Процеси утворення монооксиду вуглецю в термокамері установки описані в роботі [12, с. 140]. У такому разі через камеру, в якій розміщено наважку пересипки, продували повітря або суміш повітря та діоксиду вуглецю під час нагрівання камери електронагрівачем від кімнатної температури до температури ~850 °С. При цьому газоаналізатором на виході вимірювали концентрації СО, СО₂, О₂ у газовому потоці.

У разі визначення впливу температури концентрації кисню в газовій фазі на вміст монооксиду вуглецю в газових викидах у термокамеру установки завантажували близько 445 г пересипки та пропускали через неї газову суміш з витратою 131,4 дм³/год за концентрації кисню 13–15%, 98,4 дм³/год за концентрації 15–16 % та 60 дм³/годину за концентрації 17–18%.

З огляду на те, що подача газів у термокамеру регулювалась з метою досягнення заданої концентрації кисню і за

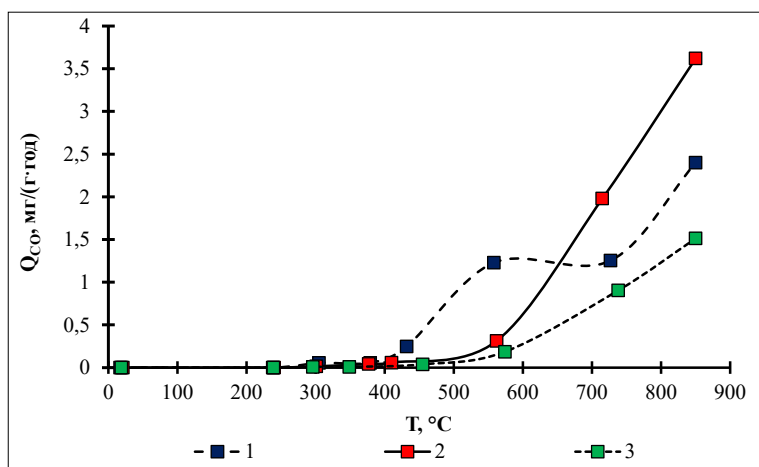


Рис. 5. Зміна кількості монооксиду вуглецю, що утворюється з 1 г пересипки, залежно від температури у разі витрати газової суміші, пропущеної через термокамеру, дм³/год: 131,4 (1) (C_{O₂} = 13–15%); 98,4 (2) (C_{O₂} = 15–16%); 60,0 (3) (C_{O₂} = 17–18%)

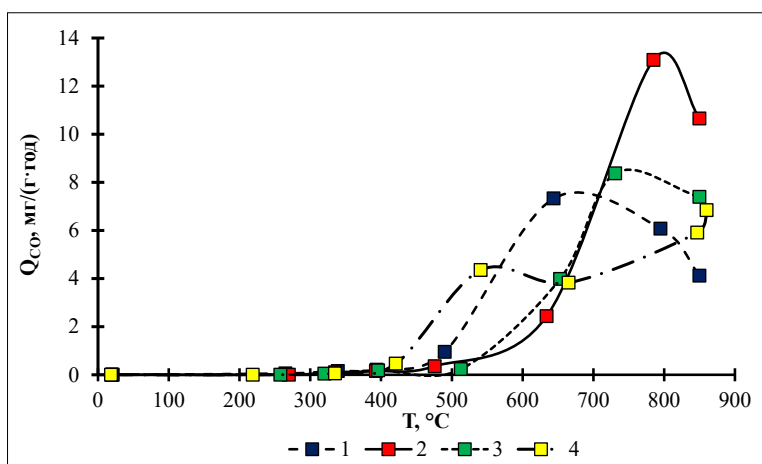


Рис. 6. Зміна кількості монооксиду вуглецю, що утворюється з 1 г пересипки, залежно від температури у разі витрати газової суміші, пропущеної через термокамеру, дм³/год: 376 (1) (C_{O₂} = 14,06%); 350 (2) (C_{O₂} = 15,50%); 323 (3) (C_{O₂} = 17,50%); 350 (4) (C_{O₂} = 20,95%)

різних його концентрацій витрата газів була різною, практичний інтерес викликає розрахунок значення кількості утвореного монооксиду вуглецю за певний час, приведений до одиниці маси вуглецевого матеріалу. У такому разі кількість утвореного СО визначається не лише його концентрацією в газовій суміші, а розраховується як витрата газу на концентрацію за час дегазації за формулою:

$$Q_{CO} = C \cdot V / M \text{ (мг/г*год)}, \quad (1)$$

де C – концентрація СО, мг/м³; V – витрата газової суміші, м³/год; M – маса завантаженої термоантрацитної пересипки, г.

Про зміну кількості утвореного монооксиду вуглецю в газовій суміші, яка проходила через термокамеру, можна судити по графіках, приведених на рисунку 5.

У такому разі слід відзначити, що в діапазоні температур 100–400 °С кількість утвореного СО у газовій суміші була незначною і лише за температури 400 °С становила 0,0553 мг/г*год для газової суміші, що містить 13–15% кисню, 0,0417 мг/г*год за концентрації кисню 15–16% і всього 0,0087 мг/г*год за вмісту кисню 17–18%. В усіх випадках показник зростає із температурою і за 650–800 °С він збільшується до 1,2539 мг/г*год, 1,9796 мг/г*год та 0,9040 мг/г*год у разі зростання вмісту кисню в газовій суміші від 13–15% до 17–18%, а за температури 850 °С цей показник становить відповідно 2,400 мг/г*год, 3,6207 мг/г*год та 1,5126 мг/г*год.

Щодо концентрації монооксиду вуглецю, то за температур 250–400 °С вона становила 125–250 мг/м³ незалежно від концентрації кисню в газовій суміші. Надалі концентрація СО до температури 653 °С зростала швидше за концентрації кисню 13–15%, а за вищих температур – за концентрації кисню 15–16%. Максимальна концентрація СО сягала 13025–18625 мг/м³ за концентрації кисню 15–16%.

Втрата маси пересипки сягала 3,311, 2,295 та 1,947% відповідно за вмісту кисню у газовій суміші 13–15%, 15–16% та 17–18%. Як видно з результатів досліджень, з підвищенням концентрації кисню у газовій суміші втрата маси пересипки мінімальна.

Зниження маси пересипки з підвищенням концентрації кисню можна пов'язати із зменшенням витрати газоповітряної суміші, що у цілому призвело до зменшення кількості пропущеного кисню. Так, за концентрації кисню 13–15% витрата газу становила 131,4 дм³/годину, або за 7 годин – 919,8 дм³. З них 14% – це кисень,

або 128,772 дм³. За концентрації кисню 15–16% витрата газової суміші була 98,4 дм³/годину, або в цілому 688,8 дм³, в тому числі кисню 106,76 дм³. У разі витрати газової суміші 60 дм³/годину кількість пропущеного кисню складе всього 73,5 дм³. Саме цим можна пояснити і зменшення кількості утвореного монооксиду вуглецю у разі зниження витрати газової суміші.

Очевидно, що з підвищенням концентрації кисню до 15–16% кількість утвореного СО зростає із підвищенням температури. Загалом, за весь час нагрівання середній показник кількості утвореного СО найвищий для концентрації кисню 15–16% і сягає $Q_{CO}^{ср} = 0,8610$ мг/г*год. Слід відзначити, що розрахована в цілому для печі випалювання на виробництві питома кількість монооксиду вуглецю, що утворюється на 1 г пересипки, за весь цикл обробки заготовок становить 0,12297 мг/г*год. Можливо, це пов'язане з тим, що димові гази містять до 8% парів води, яка пришвидшує реакцію доокислення СО за реакціями, приведеними в літературі [13, с. 50], що в цілому забезпечує зниження його концентрації в газовій суміші.

Підсумовуючи результати експериментальних досліджень, можна сказати про те, що температурний діапазон, за якого в процесі випалювання з вуглецевого матеріалу утворюється СО, суттєво відрізняється від раніше опублікованих даних. Вважалось, що основна маса монооксиду вуглецю утворюється за температури 320–390 °С. І це була головна причина, що перешкоджала створювати умови для окислення СО в технологічному процесі. З отриманих даних видно, що реально монооксид вуглецю утворюється за температур, вищих за 400 °С, що дає можливість доокислювати СО в присутності каталізаторів до СО₂ та суттєво знижувати викиди монооксиду вуглецю.

Під час проведення дослідження з підтриманням постійної витрати газової суміші за різних концентрацій кисню було визначено, що найнижча кількість монооксиду вуглецю у газових сумішах відзначена за концентрації кисню 14% – 4,1191–6,0735 мг/г*год на рівні 4875–7188 мг/м³ (рис. 6). У разі підвищення концентрації кисню до 15,5% відзначений максимальний вміст СО 10,6559–13,0915 мг/г*год за температури 785–850 °С (13125–16125 мг/м³).

У разі подальшого зростання концентрації кисню в газовій суміші вміст монооксиду вуглецю в газах на виході з термокамери дещо знижується та у разі концентрації кисню 20,95% кількість утвореного монооксиду вуглецю становить 5,9118–6,8470 мг/г*год, що відповідає 6375–7375 мг/м³.

Для інтенсифікації процесів окислення монооксиду вуглецю під час термообробки пересипки її модифікували 1% та 5% розчинами перманганату калію за методикою [14, с. 60]. При цьому перманганат у разі взаємодії з вугіллям відновлюється до MnO_2 і залишається на його поверхні у вигляді мікрокристалів. У такому разі навіть під час продування через пересипку, модифіковану 5% розчином перманганату калію, чистого повітря кількість утвореного монооксиду вуглецю в газовій суміші становила $0,125 \text{ мг/г}\cdot\text{год}$, що відповідає 70 мг/м^3 за температури $520 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7). Порівняно з пересипкою, модифікованою 1% розчином перманганату калію, та немодифікованою пересипкою, цей показник нижчий у 10 ($1,248 \text{ мг/г}\cdot\text{год}$ або 769 мг/м^3) та, відповідно, $73,5$ ($9,175 \text{ мг/г}\cdot\text{год}$ або 5875 мг/м^3) раз. Якщо врахувати, що в багатоканальних печах Рідгера димовий газ рухається з попередньої гарячої до послідувочі більш холодної камери випалювання, та суттєвий ріст утворення CO відбувається за температури заготовок $320\text{--}390 \text{ }^\circ\text{C}$, то застосування пересипки, модифікованої 5% розчином перманганату калію, є простим і зручним методом запобігання викидам монооксиду вуглецю в атмосферу в процесах випалювання електродів. Причому отримана концентрація монооксиду вуглецю 70 мг/м^3 значно нижча нормативу граничнодопустимого викиду CO 250 мг/м^3 .

Зважаючи на те, що за концентрації кисню 14%, яка відповідає промисловим умовам проходження процесу випалювання електродів, кількість утвореного монооксиду вуглецю нижча, застосування такого технічного рішення на підприємстві

перетворить процес випалювання електродів на екологічно чистий складник електродного виробництва.

Для оцінки дотримання вимог екологічних нормативів, встановлених в Україні, в зоні дії викидів ПрАТ «Український графіт» після впровадження у виробництво розробленого технічного рішення щодо застосування пересипки, модифікованої 5% розчином перманганату калію, виконаний розрахунок рівня приземних концентрацій монооксиду вуглецю в атмосферному повітрі.

Згідно з приведеним переліком найбільших концентрацій розрахункового майданчика (табл. 2, рис. 8) після вдосконалення процесу окислення монооксиду вуглецю його приземні концентрації не перевищують максимально допустимої концентрації монооксиду вуглецю 5 мг/м^3 . При цьому будуть дотримані вимоги нормативів на викиди згідно з Наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309.

Висновки. У результаті проведення оцінки впливу підприємства з виробництва електродної продукції ПрАТ «Український графіт» на рівень забруднень довкілля з урахуванням розмірів санітарно-захисної зони було встановлено, що в п'яти точках розрахункового майданчика спостерігається перевищення максимально допустимої концентрації монооксиду вуглецю, що становить 5 мг/м^3 з урахуванням фону в 1,1–1,2 рази.

У результаті проведення досліджень термообробки пересипки заготовок електродів було встановлено, що монооксид вуглецю утворюється за температур, вищих за $400\text{ }^\circ\text{C}$, що дає можливість доокислювати CO в присутності каталізаторів до CO_2 та суттєво знижувати викиди монооксиду вуглецю. Було визначено, що найнижча кількість монооксиду вуглецю у газових сумішах відзначена у разі концентрації кисню 14%.

Показано, що під час нанесення на пересипку діоксиду марганцю з 5% розчину перманганату калію значно зростає швидкість процесу окислення монооксиду вуглецю до діоксиду вуглецю, при цьому концентрація монооксиду вуглецю в газовій суміші була нижчою 70 мг/м^3 за температури до $520 \text{ }^\circ\text{C}$.

Під час виконання розрахунку рівня приземних концентрацій монооксиду вуглецю в атмосферному повітрі після впровадження у виробництво розробленого технічного рішення щодо застосу-

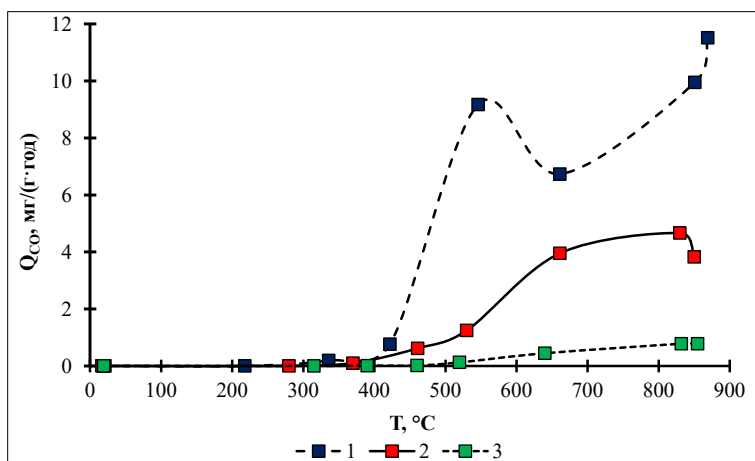
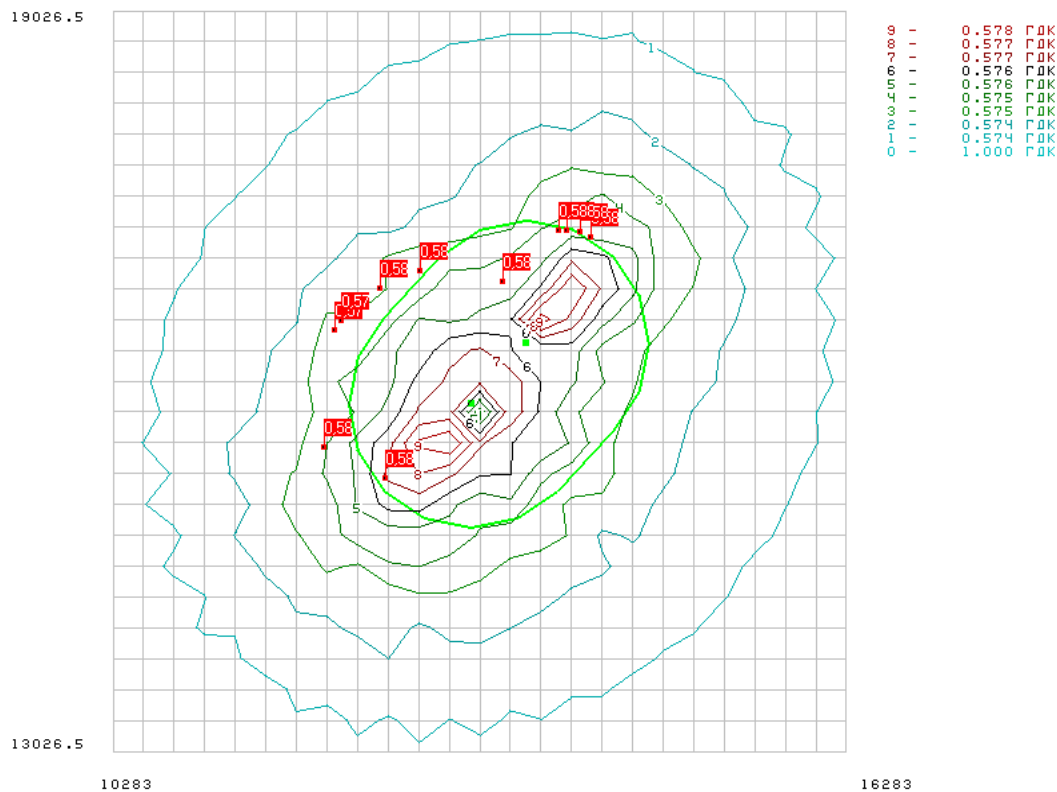


Рис. 7. Зміна кількості монооксиду вуглецю залежно від температури у разі витрати повітря $588 \text{ дм}^3/\text{год}$ ($C_{O_2} = 20,95\%$), пропущеного через: (1) пересипку; (2) пересипку, модифіковану 1% розчином перманганату калію; (3) пересипку, модифіковану 5% розчином перманганату калію

**Перелік найбільших приземних концентрацій монооксиду вуглецю
у разі заданих напрямків та величин швидкості вітру після впровадження технічного рішення
на ПрАТ «Український графіт»**

Координата X, м	Координата Y, м	Концентрація в точці, мг/м ³	Концентрація в точці, долей ГДК	Напрямок вітру, град.	Швидкість вітру, м/с	Код джерела	Внесок, %
13783	16526	3,750055	0,750011	120,00	2,27	347	100,00
13533	16526	3,741875	0,748375	60,00	2,27	347	100,00
13783	16026	3,738440	0,747688	250,00	2,27	347	100,00
13533	16026	3,733390	0,746678	290,00	2,27	347	100,00
14033	16276	3,731940	0,746388	190,00	2,27	347	100,00

Речовина 06000 / 337 Оксид вуглецю



Ізолінії концентрацій монооксиду вуглецю: 0 – 1ГДК; 1 – 0,574ГДК; 2 – 0,574ГДК; 3 – 0,575ГДК; 4 – 0,575ГДК; 5 – 0,576ГДК; 6 – 0,576ГДК; 7 – 0,577ГДК; 8 – 0,577ГДК; 9 – 0,578ГДК

Рис. 8. Карта-схема розсіювання викидів монооксиду вуглецю після впровадження технічного рішення у ПрАТ «Український графіт»

вання пересипки, модифікованої 5% розчином перманганату калію, було встановлено дотримання санітарно-гігієнічних норм та нормативів на викиди згідно з Наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309.

Перевагою використання модифікованої MnO_2 пересипки є невисокі матеріальні затрати на обробку вуглецевого матеріалу порівняно зі значними капіталовкладеннями на будівництво каталітичних реакторів із знешкодження CO .

Список літератури:

1. Екологічний паспорт Запорізької області за 2018 р. / Офіційний портал Міністерства енергетики та захисту довкілля України 30 липня 2019. 173 с. URL: <https://menr.gov.ua/news/33529.html>.
2. Іваненко О.І., Носачова Ю.В., Оверченко Т.А., Наконечна М.В. Особливості застосування каталізаторів різних типів у процесах знешкодження монооксиду вуглецю димових газів. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. Київ, 2020. № 1(19). С. 22–42.
3. Статистичний збірник «Довкілля України за 2018 рік». / Державна служба статистики України. URL: http://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2019/zb/11/Zb_dovk_2018.pdf.
4. Панов Е.Н., Шилович І.Л., Іваненко Е.І., Буряк В.В. Тепловые и химические аспекты образования СО в процессе обжига электродов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2012. № 4/6 (58). С. 15–18.
5. Панов Е.Н., Шилович І.Л., Іваненко Е.І., Буряк В.В. Определение состава газовых выбросов обжиговых печей при производстве электродов. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. Київ, 2012. № 1(9). С. 75–77.
6. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309 «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин зі стаціонарних джерел». Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 1 серпня 2006 р. за № 912/12786. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06#Text>.
7. Карвацкий А.Я., Лелека С.В., Пулинец И.В., Лазарев Т.В. Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовой выделения обжигаемых заготовок. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2011. № 6/5 (54). С. 42–45.
8. Карвацкий А.Я., Шилович І.Л., Крутоус Л.В., Кутузов С.В. Зниження концентрації СО за рахунок установки конверсії монооксиду вуглецю. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2013. № 2/11 (62). С. 38–41.
9. Bogacki M., Oleniacz R., Mazur M., Szczygłowski P. Air pollution emissions during baking of semi-finished graphite products in a tunnel furnace. *Environment Protection Engineering*. Wroclaw, 2012. № 38(1). Pp. 15–23.
10. Belokon K.V., Belokon Y.A., Kozhemyakin G.B., Matukhno E.V. Environmental assessment of the intermetallic catalysts utilization efficiency for deactivation of the pollutants emitted by electrode production enterprises. *Науковий вісник НГУ*. Днепр, 2016. № 3. С. 87–94.
11. Gomelya N.D., Ivanenko E.I. The estimation of influence of kinetic factors on content of CO in the process of baking of electrodes. *Ecobaltica-2012 : book of abstracts the IX International Youth Science Environmental Forum (St-Petersburg, 29–30 Nov. 2012)*. Sankt-Petersburg, 2012. С. 89.
12. Panov Ye., Gomelya N., Ivanenko O., Vahin A., Leleka S. Assessment of the Effect of Oxygen and Carbon Dioxide Concentrations on Gas Evolution During Heat Treatment of Thermoanthracite Carbon Material. *Journal of Ecological Engineering*. Lublin, 2020. № 2 (2). Pp. 139–149.
13. Фокин В.П., Малахов А.А., Малахов С.А., Сошкин С.В. Усовершенствование технологии обжига электродных материалов. *Цветные металлы*. Москва, 2002. № 4. С. 48–51.
14. Хохотва А.П., Мельникова Н.В. Очистка фенолсодержащих вод окислением на суспензии MnO_2 . *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. Київ, 2008. № 5. С. 59–61.

Ivanenko O.I., Gomelya N.D., Panov Ye.M. DEVELOPMENT OF MEASURES TO REDUCE CARBON MONOXIDE EMISSIONS FROM THE FLUE GASES OF KILNS IN THE PRODUCTION OF ELECTRODES

Based on statistical data for 2018, it is shown that in Ukraine 45.81% of pollutant emissions from stationary sources and road transport are emissions of toxic carbon monoxide and are a serious problem that must be addressed at the level of industrial production. It is determined that the concentration of industrial enterprises in the city of Zaporizhzhia with a predominance of heavy industry, which includes PJSC “Ukrainian Graphite”, led to the formation of a significant man-made impact, the load on the environment of Ukraine due to carbon monoxide is about 7%. In modelling the scattering of carbon monoxide emissions from the flue gases of kilns during the production of electrodes at PJSC “Ukrainian Graphite” the excess of surface concentrations of carbon monoxide at the level of 1.1–1.2 MPC was determined, taking into account the background, which justifies the need to develop technical solutions to reduce carbon monoxide emissions into the atmosphere to improve the environmental safety of production. As a result of heat treatment studies of electrode’s packing materials, it was found that carbon monoxide

is formed at temperatures above 400°C, which allows to oxidize CO in the presence of catalysts to CO₂ and significantly reduce carbon monoxide emissions. It was determined that the lowest amount of carbon monoxide in gas mixtures was observed at an oxygen concentration of 14%. It is shown that when applying manganese dioxide electrodes from a 5% solution of potassium permanganate to the packing materials, the rate of the process of oxidation of carbon monoxide to carbon dioxide increases significantly. When calculating the level of surface concentrations of carbon monoxide in the air after the introduction into production of the developed technical solution for the application of the packing materials, modified with 5% solution of potassium permanganate, compliance with sanitary and hygienic norms and emission standards was established. It is substantiated that the advantage of using modified MnO₂ packing materials is low material costs for processing of carbon material in comparison with significant investments in construction of catalytic reactors for CO neutralization.

Key words: carbon monoxide, kilns, flue gases, packing materials, manganese dioxide, atmospheric air, emission reduction.

Казимиренко Ю.О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Дрозд О.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Жарський Є.В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПЕРЕРОБКИ КРИШТАЛЕВОГО СКЛА НА ПОРОШОК

Стаття присвячена вирішенню актуальної на сьогоднішній час науково-практичної проблеми переробки скляного бою та бракованих скляних виробів з нарійсилікатного скла, різновидів кришталю, натрій-кальцій-силікатного скла, якими насичений сучасний ринок. Перспективним напрямом хімічних технологій є одержання скляних порошків. Описано експериментальні роботи та лабораторні дослідження щодо визначення хімічного складу, структури, властивостей, для чого застосовано методи оптичної і електронної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу; аналітичні розрахунки кінетики високотемпературних процесів. Одержані результати зіставлено з діаграмами стану $PbO-SiO_2$, $Na_2O-CaO-SiO_2$, Na_2O-SiO_2 . Процес розм'якшення досліджено за усадочними процесами, для чого застосовано авторський зразок лабораторної установки для виготовлення порошкових виробів.

Авторами пропонується технологічна схема переробки бою скла та бракованих кришталевих виробів на склопорошок, яка включатиме у себе операції дроблення на дробарці до крупності до 10 мм з подальшим здрібненням до дисперсності 30...80 мкм у кульовому млині барабанного типу, виготовлення порошкової суміші з наступним її топленням при температурі 800 °С у муфельній печі з окиснювальним середовищем, дробленням та здрібненням спеченого агломерату. Встановлено, що одержані порошки є рентгеноаморфними, мають округлу форму; їх гранулометричний склад належить діапазону 40...70 мкм, їх мікротвердість становить близько 1,4 ГПа. Проаналізовано фізико-хімічні процеси, характерні для кожного з етапів технологічного циклу. Наведено теоретичне обґрунтування температурних режимів та результати мікроструктурних досліджень, морфологічних характеристик одержаних порошків. Експериментально визначена і теоретично обґрунтована важливість процесу топлення скляного агломерату в діапазоні температур 300...800 °С з максимальною інтенсивністю у перші 8–10 хв. Запропоновано перспективи їх подальшого застосування для виготовлення нових функціональних композиційних матеріалів і покриттів зі стабільними експлуатаційними властивостями.

Ключові слова: переробка, технологія, кришталеве скло, скляний бій, браковане скло, склопорошок, фізико-хімічні процеси.

Постановка проблеми. Браковані скляні вироби і скляний бій являють собою невіддільний складник виробництва і побуту, що потребує утилізації. В Україні розвиток сучасних переробних технологій обмежується через великі енергетичні витрати та складність обладнання. Сучасні принципи утилізації скляного бою ґрунтуються на унікальності хімічного складу і властивостей як «аморфного силікатного матеріалу антропогенного походження» [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На цей час скляний бій використовується в технологіях виготовлення листового скла, скляної тари, піноскла для тепло- і шумоізоляції, під час виробництва композиційних бетонів, покривних матері-

алів, плиток для підлоги тощо [2–4]. Таким чином, виробництво композиційних матеріалів являє собою галузь, для якої скляні відходи та бій є важливою вихідною сировиною, застосування якої сприятиме формуванню комплексу цінних властивостей, які не є характерними для будь-яких природних матеріалів або компактних металів. Для більшості технологій виробництва композиційних матеріалів, зокрема будівельних, не існує жорстких вимог за хімічним складом, які висуваються до хіміко-лабораторного, рентгенозахисного та інших видів скла за спеціальним призначенням [5]. Найвищими показниками хімічної чистоти характеризується кришталеве скло, з якого виробляється високоякісний посуд, декоративні вироби, предмети

мистецтва [6; 7]. Крім декоративних властивостей, спеціалізоване посудне скло характеризується термічною та хімічною стійкістю, механічною міцністю, твердістю. Його хімічний склад та технічні умови щодо виготовлення регламентовані ГОСТ 24315-80 і ГОСТ 30407-96. Сучасний ринок насичений різноманітними виробами, виготовленими з: натрій-силікатного скла; різновидів кришталю, до складу яких входять двоокис кремнію (SiO_2), Pb, Ba і Zn, вміст яких у сумі складатиме не менш 10%; спеціального натрій-кальцій-силікатного скла з функціональними додатками задля формування заданих фізико-механічних властивостей. З такого скла виготовляються масивні вироби у вигляді скульптур малих форм, ваз, попілниць тощо.

На кожному виробництві під час контролю якості виявляються дефекти, які негативно впливають на різні показники та властивості виробів: це дефекти скломаси, виробітки, обробки [8]. Таким чином, відбраковані вироби та скляний бій, який утворюється протягом виробничого циклу, пакування, транспортування, являє собою вторинну сировину з високою ліквідністю, переробка якого є важливою науково-прикладною проблемою, вирішення якої спрямовано на скорочення виробничих відходів та розвиток нових технологій створення нових поліфункціональних матеріалів. Перспективним напрямом хімічних технологій є одержання скляних порошків [9].

Постановка завдання. Мета роботи полягає у дослідженні фізико-хімічних процесів і технологічних особливостей переробки кришталевого скла на порошок.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні роботи включали у себе виготовлення порошку за технологічною схемою (рис. 1), для чого застосовано скляний бій та уламки різних видів кришталевих виробів.

Технологічна послідовність включатиме у себе: дроблення на дробарці до крупності до 10 мм з подальшим здрібненням до дисперсності 30...80 мкм у кульовому млині барабанного типу; виготовлення порошкової суміші з наступним її

топленням при температурі 800°C у муфельній печі з окиснювальним середовищем, дробленням та здрібненням спеченого агломерату. Технологічні режими, застосоване обладнання та пристосування наведено у табл. 1.

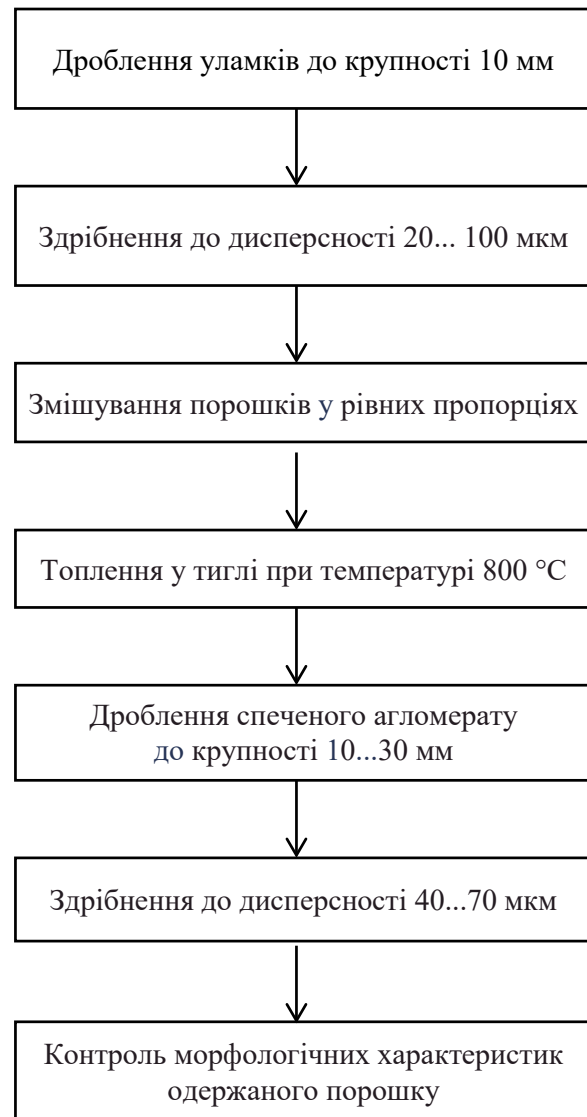


Рис. 1 Технологічна схема переробки бою скла та бракованих кришталевих виробів на склопорошок

Таблиця 1

Технологічні операції, режими, обладнання і пристосування

Технологічні операції	Обладнання і пристосування	Режими
Дроблення	Дробарка механічна	Вільні
Здрібнення	Кульовий млин барабанного типу	Частота обертання ротора – 800 об/хв; час розмелу – 20 хв/100 г скла
Топлення порошкової суміші	Установка для виготовлення порошкових виробів [10] Тигель з термічно необробленого графіту марки МПГ-6	Швидкість підйому температури – 20/хв; ізотермічна витримка при температурах 300 °C і 800 °C протягом 30 хв

Рентгеноструктурний аналіз, виконаний на установці ДРОН-3, показав загальну рентгеноаморфність дослідного скла. Густина вимірено методом гідростатичного зважування. Приблизний хімічний склад застосованого для виготовлення порошку скла (табл. 2) визначено за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА) з використанням електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЭММА-102-02. Зйомку спектрограм здійснено з вирізаних фрагментів, на які для утворення електричного контакту з використанням установки ВУП5 (Вакуумний універсальний пост) нанесено тонкий ($\approx 1-2$ мкм) шар алюмінієвого покриття. Результати досліджень показали наявність характерних спектрів Si, Na, Ca, K, Pb, які дозволяють віднести дослідні зразки до подвійних та потрійних систем PbO–SiO₂, Na₂O–CaO–SiO₂, Na₂O–SiO₂ [11]. Наявність у зразках 2 і 3 спектрів Fe, Ti, Cr пояснюється різними кольоровими відтінками застосованих виробів.

Детально розглянемо особливості та фізико-хімічні процеси на кожному технологічному етапі (рис. 1). Закономірності виявлено за допомогою методів оптичної (мікроскоп БИОЛІАМ-И) і електронної мікроскопії (електронний мікроскоп-мікроаналізатор РЭММА-102-02), підґрунтям для чого є положення хімії твердого тіла та склоподібного стану [13–15].

Переробка скляного бою та бракованих кришталевих виробів починається з дроблення за допомогою дробарки до крупності близько 10 мм. Одержані уламки зазнавали сухого розмелу у кульовому млині барабанного типу. Як молотні тіла застосовано керамічні кульки, частота обертання ротора – 800 об/хв; час розмелу склав 20 хв на кожні 100 г скла. Введення операції здрібнення до дисперсності 20...100 мкм сприятиме інтенсифікації процесів силікато- та склоутворення під час термічного оброблення на наступному етапі. Здрібнені частинки мають уламкову форму. Проте, як показав досвід, викладений у роботі [12], недоліком застосування порошоків, одержаних сухим розмелом, у високотемпературних технологіях, таких як електродугове напилення, є низький коефіцієнт використання матеріалу

(0,6...0,7) внаслідок втрат дисперсного пилу. Крім того, скляні частинки зберігають свою так звану «історію» виготовлення виробу, тому у технологічному процесі введено етап топлення, який забезпечує вирівнювання хімічного складу під час змішування різних видів скла. Виходячи з того, що результати МРСА показали схожість дослідних зразків за хімічним складом, суміш виготовлено у рівних пропорціях; дозування порошоків здійснено об'ємним способом.

Температурні режими термічного оброблення, під час якого виготовлена суміш топиться, перетворюючись на агломерат, обрано на основі аналізу діаграм стану PbO–SiO₂, Na₂O–CaO–SiO₂, Na₂O–SiO₂ [11]. Процес розм'якшення досліджено за усадочними процесами, для чого застосовано авторський зразок лабораторної установки для виготовлення порошкових виробів [10], яка дозволяє щохвилини вимірювати деформації сумішей під час термічних операцій. Для топлення скляного порошку застосовано графітовий тигель з термічно необробленого графіту марки МПГ-6 (ТУ 48-4807-29700), який запобігає прилипанню скла до бокових поверхонь. На думку автора роботи [16] дрібнозернистий графітовий пил є активним відновником кремнезему, який сприяє прискоренню утворення центрів кристалізації SiO₂; при температурі вище ніж 300 °С графіт окислюється та вступає в реакцію з повітрям, що знаходиться у порах формувальної суміші: таким чином, процес топлення відбувається у атмосфері СО. Головним елементом лабораторної установки [10] є піч вертикального завантаження з номінальною температурою 900 °С та окисною атмосферою. Кришка печі має знімну конструкцію: для проведення експериментальних досліджень замість неї встановлюється термостійке скло, скрізь яке можна спостерігати за процесами розм'якшення та склоутворення. В середину скляної суміші вставлена термопара градування ХА (ДСТУ 2837-94, ГОСТ 3044-94), що забезпечує контрольну точність вимірювання на двох етапах ізотермічної витримки відповідно при температурах 300 °С і 800 °С. На першому етапі відбувається агломерація склопорошків, як це показано на фото знімку (рис. 1).

Таблиця 2

Результати досліджень зразків скла

№ дослідного зразку	Виріб	Колір	Наявність спектрів	Густина, ρ кг/м ³
1	Фужери	Білий прозорий	Si, Na, Ca, K, Pb	2800
2	Попільниця	Блідно-жовтий прозорий	Si, Na, Pb, Fe	3032
3	Ваза	Блідно-голубий матовий	Si, Na, Pb, Ti, Cr	3000



Рис. 2. Зовнішній вигляд експериментального зразка після термічного оброблення при $t = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Інтенсивність спікання склопорошків проаналізована за графічною інтерпретацією результатів досліджень усадочних процесів у напівлогарифмічних координатах, для чого авторами розроблено програмний розрахунковий комплекс на мові програмування Common Lisp [17]. Як видно з рис. 3, при виході на режим $300\text{...}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ перші 8–10 хв є найбільш ефективними для спікання дослідних порошків. При підвищенні температури до $800\text{...}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ у межах цих систем відбувається процес силікатування [5].

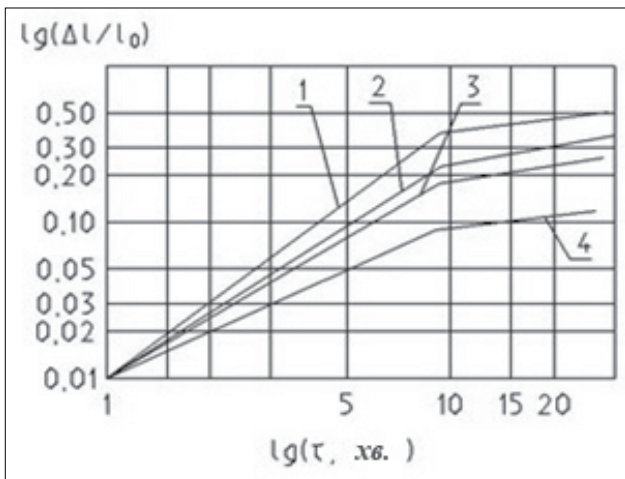


Рис. 3. Кінетика спікання скляних порошків різної дисперсності при виході на режим $800\text{ }^{\circ}\text{C}$:
1 – 10...30 мкм; 2 – 30...60 мкм;
3 – 60...90 мкм; 4 – ≥ 100 мкм

Закінчення усадки свідчить про завершення процесу формування компактного матеріалу, який має пухляку структуру (рис. 4), що, на думку авторів роботи [17], є суттєвим недоліком тигельної плавки. Проте для подальшої переробки на порошок це не впливає. Спечений агломерат певної форми можна застосовувати як сировину для

тривалого зберігання або дробити та здрібнювати до дисперсності 40...70 мкм. Для поліпшення гранулоутворення під час здрібнення у кульових млинах додано полівініловий спирт (ГОСТ 10779-78).

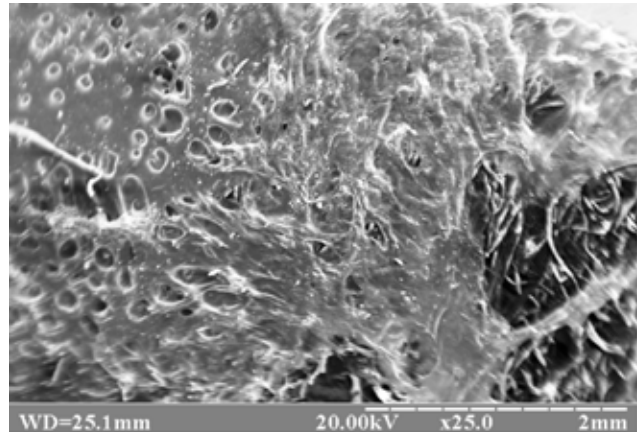


Рис. 4. Мікроструктура розтопленої у графітовому тиглі при температурі $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ скляної порошкової шихти

Одержані результати опосередковано збігаються з дослідженнями авторів робіт [7; 18–20], присвячених фізико-хімічним процесам створення нових легкоплавких стекел зі спеціальними властивостями.

Контроль морфологічних характеристик склопорошків досліджено методами оптичної і комп'ютерної металографії: оптичну мікрофотографію, наведено на рис. 5. Як показали результати рентгеноструктурного аналізу, одержані порошки є рентгеноаморфними, мають середній розмір 50 мкм, за формою наближаються до сферичної. Їх насипна щільність складає 300 кг/м^3 ; мікротвердість, яку виміряно на приладі ПМТ-3 (навантаження на індентор – 200 г), становить 1,4 ГПа.

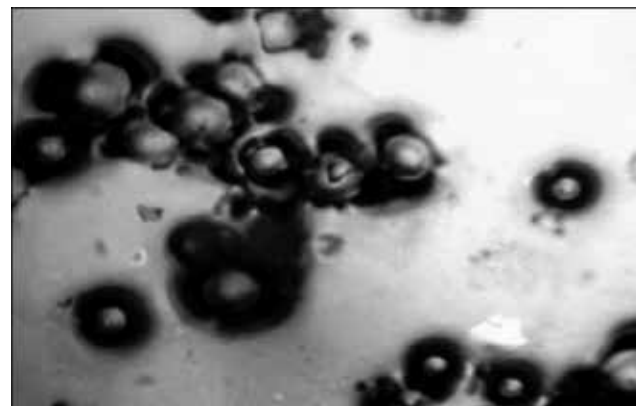


Рис. 5. Оптична мікрофотографія ($\times 370$) одержаного порошку

Результати роботи поглиблюють наукові уявлення про фізико-хімічні процеси одержання склопорошків з кристалевих виробів, що спрямовано на вирішення актуальної на цей час науково-практичної проблеми переробки скляного бою та бракованих скляних виробів. Порівняно висока вартість вихідних матеріалів і технологічного процесу створює передумови для одержання стратегічно важливої сировини для функціональних композиційних матеріалів зі стабільними експлуатаційними властивостями. Перспективи подальших робіт пов'язано з експериментальними дослідженнями фізико-хімічних властивостей одержаних порошків, зокрема у екстремальних умовах.

Висновки

1. Запропоновано технологічну схему одержання порошку шляхом переробки скляного бою кристалевого скла, яка включатиме

у себе дроблення на дробарці до крупності до 10 мм з подальшим здрібненням до дисперсності 30...80 мкм у кульовому млині барабанного типу, виготовлення порошкової суміші з наступним її топленням при температурі 800 °С у муфельній печі з окиснювальним середовищем, дробленням та здрібненням спеченого агломерату.

2. Досліджено технологічні особливості і фізико-хімічні процеси, які відбуваються на етапах здрібнення і спікання порошкової суміші за визначеною схемою. Експериментально визначена і теоретично обґрунтована важливість процесу топлення скляного агломерату в діапазоні температур 300...800 °С з максимальною інтенсивністю у перші 8–10 хв.

3. Одержані порошки є рентгеноаморфними, мають округлу форму; їх гранулометричний склад належить діапазону 40...70 мкм.

Список літератури:

1. Куколев Г.В. Химия кремния и физическая химия силикатов : Учебник для вузов по специальности «Технология силикатов». Изд-во «Высшая школа». 1966. 462 с.
2. Маневич В.Е., Субботин К.Ю., Ефременков В.В. Сырьевые материалы, шихта и стекловарение : монография. : Стройматериалы. 2008. 223 с.
3. Пшінько О.М., Щербак А.С. Эффективный теплоизоляционный материал з відходів скляної промисловості. *Мосты и тоннели: теория, исследования, практика*. 2012. №1. С. 67–70.
4. Завгородня Н.І. Дослідження процесу утилізації екранного бою у виробництві керамічної плитки. *ScienceRise*. 2016. № 1/2 (18). С. 32–36.
5. Павлушкин Н.М. Стекло : справочник / под ред. Н.М. Павлушкина. Москва : Стройиздат. 1976. С. 324–345.
6. Терещенко И.М., Кравчук А.П., Стецкевич А.Ю. Разработка составов накладного стекла для изделий из хрусталя и их промышленная апробация. *Труды БГТУ*. 2014. № 3. С. 67–70.
7. Жерновая Н.Ф., Бессметрный В.С., Дорохов Е.С., Жерновой Ф.Е. Разработка и исследование специальных стекол для посуды. *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2015. № 1. С. 164–168.
8. Гуляян Ю.А. Декоративная обработка стекла и стеклоизделий. Москва : Высшая школа. 1989. 223 с.
9. Гришина А.И. Химические технологии в науке и их роль. *Наука и техника Казахстана*. 2018. № 3. С. 82–86.
10. Установка для виготовлення порошкових виробів : пат. 99331 Україна, МПК В22F3/14. № 201414197 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10. 5 с.
11. Торопов Н.А., Борзаковский В.П., Лапин В.В. Диаграммы состояния силикатных систем : справочник. Вып. 1. Двойные диаграммы. Москва ; Ленинград : Наука. 1965. 545 с.
12. Казимиренко Ю.О. Порошки систем $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ і $\text{K}_2\text{O}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$: переробка відходів і процеси розм'якшення. *East European Scientific Journal Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe*. 2018. № 7 (35), vol. 2. P. 21–30.
13. Даувальтер А. Хрустальные, цветные и опаловые стекла. Москва : Гизлегпром. 1957. 235 с.
14. Анфилогов В.Н., Быков В.Н., Осипов А.А. Силикатные расплавы : монография. Москва : Наука. 2005. 357 с.
15. Аппен А.А. Химия стекла. Ленинград : Химия, 1974. 352 с.
16. Бачин В.А. Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами. Москва : Машиностроение. 1986. 184 с.
17. Сайбеот П. Практическое использование Commtn Lisp: пер. с англ. Москва : ДМК-Пресс. 2017. 488 с.
18. Корякова З., Битт В. Легкоплавкие стекла с определенным комплексом физико-механических свойств. *Компоненты и технологии*. 2004. № 4. С. 126–128.
19. Гловин Н.М. Дослідження фізико-механічних властивостей скла в залежності від його складу і ступеня обробки. *Фізика і хімія твердого тіла*. Т. 14. № 1(2013). С. 145–148.
20. Шапилова, М.В., Акимова С.И. Экологические проблемы в производстве сортовых стекол и хрусталя. *Стекло мира*. № 4. С. 81–82.

Kazymyrenko Yu.O., Drozd O.V., Zharskiy Ye.V. TECHNOLOGICAL FEATURES AND PHYSICOCHEMICAL PROCESSES OF PROCESSING OF CRYSTAL GLASSES TO POWDER

The article is devoted to solving the current scientific and practical problem of processing glassware and defective glassware made of sodium silicate glass, types of crystal, sodium-calcium-silicate glass, which saturate the modern market. A perspective area of chemical technology is the production of glass powders. The authors propose a technological scheme for processing glass and defective crystal products into glass powder. Experimental works and laboratory researches on definition of chemical composition, structure, properties have been described. Methods of optical and electron microscopy, X-ray diffraction analysis; analytical calculations of the kinetics of high-temperature processes have been used. The obtained results are compared with the state diagrams $PbO - SiO_2$, $Na_2O - CaO - SiO_2$, $Na_2O - SiO_2$. The softening process has been investigated by shrinkage processes, for which an author's sample of a laboratory installation for the manufacture of powder products has been used.

The authors propose a technological scheme for processing glass and defective crystal products into glass powder, which will include crushing operations on a crusher to a size of 10 mm with subsequent grinding to a dispersion of 30... 80 μm in a drum-type ball mill, making a powder mixture followed by melting at a temperature of 800 ° C in a muffle furnace with oxidizing medium, crushing and grinding of sintered sinter. It was found that the obtained powders are X-ray amorphous, have a rounded shape; their particle size distribution belongs to the range of 40... 70 μm , their microhardness is about 1.4 GPa. Physicochemical processes characteristic of each of the stages of the technological cycle are analyzed. Theoretical substantiation of temperature regimes and results of microstructural researches, morphological characteristics of the received powders are given. The importance of the glass agglomerate melting process in the temperature range of 300... 800 ° C with the maximum intensity in the first 8–10 minutes has been experimentally determined and theoretically substantiated. Prospects for their further application for the manufacture of new functional composite materials and coatings with stable performance properties have been proposed.

Key words: *processing, technology, crystal glass, glass bottle, defective glass, glass powder, physicochemical processes.*

Фролова Л.А.

Український державний хіміко-технологічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ УМОВ ФОТОКАТАЛІТИЧНОГО ОКИСЛЕННЯ 4-НІТРОФЕНОЛУ

Розвиток промислових технологій та сільськогосподарської діяльності призвів до вивільнення органічних сполук, що є потенційною загрозою для водних екосистем та здоров'я людини. Серед них такі забруднювачі, як пестициди, продукти хлорування та спалювання природного палива, фармацевтичні засоби та засоби особистої гігієни. Щоб підвищити ефективність традиційних методів обробки забруднених стічних вод, використовують передові процеси окислення, які забезпечують потужне руйнування забруднювачів навколишнього середовища завдяки утворенню активних радикалів. Серед них фотокаталітичні процеси є перспективними завдяки високому ступеню деградації стійких забруднюючих речовин.

Крім того, масштабування хімічних технологій – від лабораторних досліджень до промислового виробництва – є складним завданням і вимагає визначення оптимальних умов проведення процесу, глибокого знання механізму реакцій, що відбуваються в системі. Це необхідно для конструкторської та технологічної розробки основних апаратів та визначення оптимальних умов їх експлуатації.

У статті розглянуто процес фотокаталітичного розкладання 4-нітрофенолу, в присутності феритового каталізатору.

Експерименти проводилися з використанням реактора, що був обладнаний УФ-випромінювачем. Концентрацію 4-нітрофенолу визначали за допомогою спектрофотометра UV 5800 PC. Статистична модель була розроблена за допомогою програмного пакета STATISTICA 10 і базувалася на основних реакціях, що відбувалися під дією УФ-випромінювання в присутності феритового каталізатора. Розраховані значення концентрацій та ступеня розкладання 4-нітрофенолу були підтверджені експериментальними результатами. Отримана статистична модель, що є адекватною. За допомогою методу центрального композиційного планування експерименту визначені також оптимальні параметри процесу, а саме концентрації фотокаталізатора, перекису водню і часу обробки.

Ключові слова: ферит, планування експерименту, органічні забруднювачі, каталізатор.

Постановка проблеми. Розвиток промислових технологій та сільськогосподарської діяльності призвів до вивільнення органічних сполук, що є потенційною загрозою для водних екосистем та здоров'я людини. Серед них такі забруднювачі, як пестициди, продукти хлорування та спалювання природного палива, фармацевтичні засоби та засоби особистої гігієни [1–6]. Щоб підвищити ефективність традиційних методів обробки забруднених стічних вод, використовують передові процеси окислення, які забезпечують потужне руйнування забруднювачів навколишнього середовища завдяки утворенню активних радикалів [7–10]. Серед них фотокаталітичні процеси є перспективними завдяки високому ступеню деградації стійких забруднюючих речовин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз останніх публікацій і патентів із використання феритових фотокаталізаторів показав, що активно проводяться дослідження як в області синтезу нових речовин, так і в області їх використання [11].

Оптимізація фотокаталітичного процесу дуже важлива, оскільки трансформація вихідної

забруднюючої сполуки та побічних продуктів її окислення є складною, а математичні моделі, необхідні для прогнозування і оптимізації, не завжди адекватно описують процес. Дослідниками було запропоновано кілька кінетичних моделей для точного опису розкладання органічних сполук у водній фазі шляхом окиснення під дією УФ-випромінювання в присутності перекису водню, використання фотокаталітичного процесу у видимій частині спектра. Розроблені кінетичні моделі описують здебільшого реакцію псевдопершого порядку. Пропонується також механізм, що передбачає утворення активних радикалів, що мають високу окислювальну здатність [12–15].

Постановка завдання. Важливим є встановлення оптимальних умов проведення процесу. Визначення впливових незалежних факторів і використання можливостей методу планування експерименту дає змогу встановити параметри процесу, що дозволяють ефективно видаляти органічні сполуки.

Таким чином, метою цієї роботи було розроблення статистичної моделі для опису деградації 4-нітрофенолу (4-НФ).

Виклад основного матеріалу дослідження. Для оцінки впливу вибраних факторів використовувався метод центрального композиційного планування експерименту. Визначали вплив таких параметрів, як концентрація фотокатализатора (x_1) об'єм H_2O_2 (x_2) та час обробки УФ-опромінненням (t) на деградацію 4-нітрофенолу. Ядро центрального композиційного плану становив повний факторний експеримент (ПФЕ) типу 2^n за $n = 3$.

План ПФЕ доповнювали деякою кількістю зоряних точок, координати яких залежать від прийнятого принципу оптимальності. Загальна кількість дослідів у разі такого планування визначається формулою

$$N = 2^n + 2n + n_0, \quad (1)$$

де доданки – відповідно число дослідів ПФЕ, зоряні точки та нульові точки.

Натуральні та кодовані значення рівнів для кожного з факторів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Натуральні та кодовані значення рівнів факторів

Фактор	Натуральні значення			Кодовані		
	максимум	мінімум	центр	максимум	мінімум	центр
Маса, г /100 мл	1,5	0,5	1	+1	-1	0
Об'єм H_2O_2 , мл / 100 мл	1	0,5	0,75	+1	-1	0
Час, хвилин	80	40	60	+1	-1	0

Регресійна модель другого порядку була використана для опису експериментальних даних, згідно з рівнянням (2):

$$Y_i = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon, \quad (2)$$

де $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ – коефіцієнти при змінних, ε – величина, що враховує вплив випадкових факторів.

Аналіз результатів розрахунку функції відгуку проводили, застосовуючи дисперсійний аналіз результатів.

Як функцію відгуку використовували ступінь розкладання 4-НФ.

$$\%S = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} 100\%, \quad (3)$$

де C_0 – початкова концентрація 4-НФ в розчині, C_t – концентрація 4-НФ у момент часу t .

Ідентифікацію та визначення концентрації сполук проводили спектрофотометричним аналізом за допомогою спектрофотометра UV 5800 PC.

План експерименту складався з 8 основних точок, 6 зіркових точок і 3 повторень у центральній точці, що налічує 17 експериментів, як показано в таблиці 2. Репліки в центральній точці дали змогу оцінити експериментальну помилку та адекватність моделі [16]. Експериментальні значення функції відгуку (ступінь розкладання 4-НФ) для кожної комбінації факторів представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

План проведення та результати експерименту

№	$m_{кат}$	$t_{об}$	$V_{H_2O_2}$	$S, \%$
1	0	0	1,673	74,81
2	1,673	0	0	70,6
3	1	1	1	76,39
4	-1	1	-1	51,37
5	0	0	0	79,6
6	0	0	0	79,8
7	1	-1	1	57,97
8	-1,673	0	0	77,5
9	1	1	-1	76,2
10	0	0	0	79,8
11	0	0	-1,673	53,35
12	1	-1	-1	66,82
13	0	1,673	0	90,95
14	-1	-1	1	70,85
15	-1	1	1	89,26
16	0	-1,673	0	63,85
17	-1	-1	-1	45,22

Таблиця 3

Результати дисперсійного аналізу для трьох факторів

Фактор	Ефект	Стандартне відхилення	t(7)	P	-95%	+95%
Головний	80,07	2,623	30,524	0	73,86	86,27
x_1	1,34	2,470	0,543	0,603	-4,49	7,185
x_1^2	-6,11	2,731	-2,238	0,060	-12,57	0,344
x_2	14,36	2,470	5,815	0,000653	8,526	20,210
x_2^2	-3,72	2,731	-1,362	0,215	-10,17	2,73
x_3	13,34	2,470	5,402	0,001	7,506	19,190
x_3^2	-13,23	2,731	-4,845	0,0018	-19,69	-6,776
$x_1 x_2$	0,81	3,221	0,251	0,8086	-6,807	8,427
$x_1 x_3$	-18,04	3,221	-5,601	0,000815	-25,66	-10,427
$x_2 x_3$	5,325	3,22	1,6530	0,1423	-2,292	12,942

Статистична модель, отримана для квадратичного рівняння регресії, мала вигляд:

$$S(\%) = 80,07 + 0,67x_1 + 7,18x_2 + 46,67x_3 - 3,05x_1^2 - 1,86x_2^2 - 6,62x_3^2 + 0,405x_1x_2 - 9,02x_1x_3 + 2,66x_2x_3, \quad (4)$$

Високі значення коефіцієнтів у лінійних доданках (x_2 , x_3) порівняно з іншими коефіцієнтами означають, що вони є найбільш впливовими в рівнянні (4).

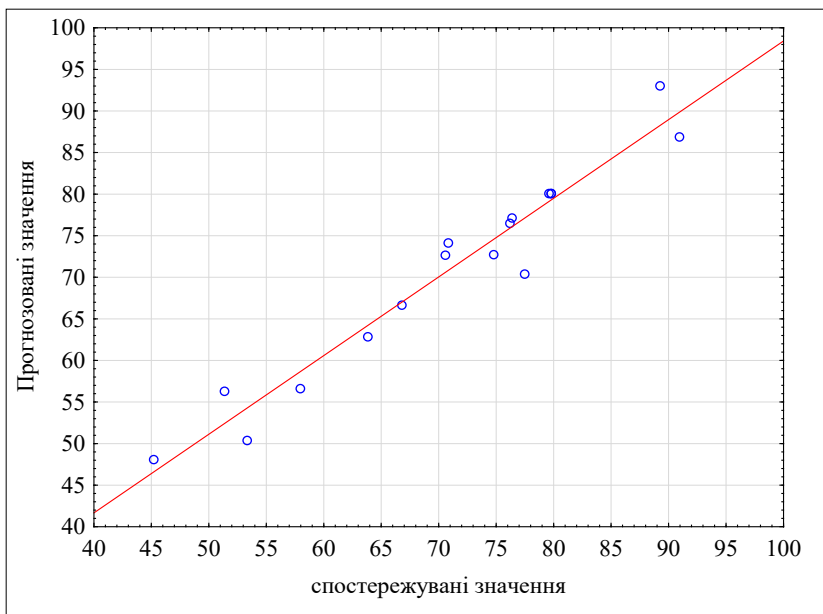


Рис. 1. Значення, передбачені моделлю, порівняно з отриманими експериментально

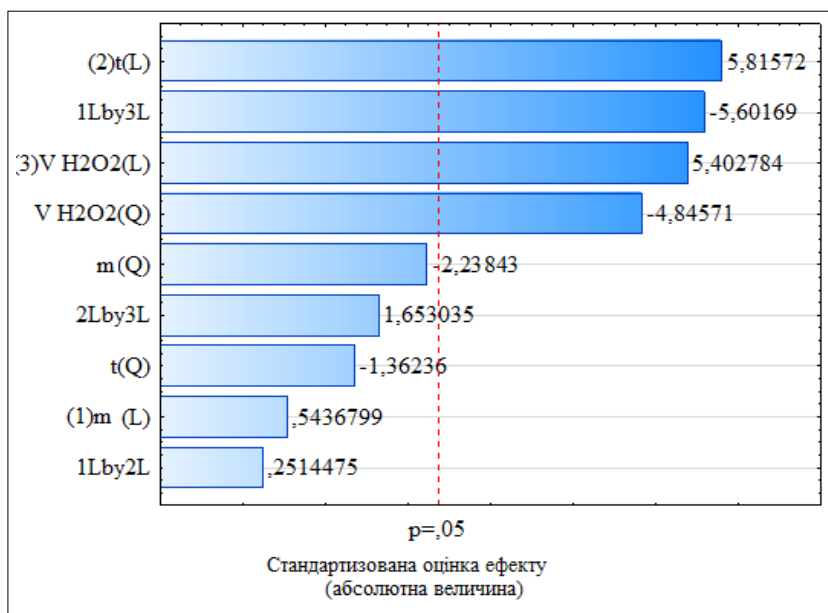


Рис. 2. Діаграма Парето

Коефіцієнт при змінній x_2 не тільки має найвище значення з всіх ефектів (7,18), але є також приблизно в 10,71 раза більшим, ніж x_1 . Коефіцієнти при парних взаємодіях факторів x_1x_2 (0,405) і x_2x_3 (2,66) мають, відповідно, значення, що в 17,8 і в 2,7 раза поступаються за відношенням коефіцієнту при x_2 .

На рис. 1 показано співвідношення між значеннями функції відгуку, визначеними за математичною моделлю та експериментально.

Залишки, отримані за квадратичною моделлю, випадковим чином розподіляються навколо експериментальних значень. Графік на рис. 1 є типовим для моделі, яка добре описує експериментальні дані.

Значущість факторів, що оцінювали за допомогою аналізу діаграми Парето, показана на рис. 2. Результати дисперсійного аналізу для всіх факторів наведено в таблиці 3. На рис. 2 у вигляді гістограми представлені коефіцієнти при впливових факторах, через які проходить червона вертикальна лінія ($p = 0,05$), що визначає значущість коефіцієнта і, відповідно, вплив у системі, який є як позитивним так і негативним. Рівень значущості коефіцієнтів у порядку зменшення має вигляд: $x_2 > x_3 > x_1$.

Позитивні значення коефіцієнтів при x_2 , x_3 та x_1 вказують на те, що зі збільшенням часу обробки, об'єму перекису водню та маси каталізатора значення функції відгуку також збільшуються. Протилежний вплив справляють доданки при x_1^2 , x_2^2 , x_3^2 , x_1x_3 , що вказує на наявність екстремуму функції.

Значення, що вважаються оптимальними, були вибрані з урахуванням впливу кожного фактора на ступінь деградації 4-НФ, як показано на рис. 3–5. Високий ступінь розкладання 4-НФ (близько 90%) відповідає кодованим значенням часу обробки, що наближаються

до 1,0 та більше. Причому ступінь розкладання практично не залежить від $m_{\text{кат}}$. Крайові значення концентрації фотокатализатора відповідають низьким значенням ступеня перетворення. Оптимальне значення відповідає точці з координатами (0;1) (рис. 3)

Зелені напівкола в нижній площині графіка $S = f(t, m_{\text{ад}})$ на рис. 3 показують області, де $S = 46\text{--}66\%$, що відповідають від'ємним значенням фактора x_2 .

Аналізуючи залежність ступеню перетворення від маси катализатора та об'єму перекису водню, можна зазначити, що низькі значення ступеня розкладання 0–12% відповідають низьким концентраціям як перекису водню, так і катализатора. Ступінь деградації близько 91% збігається з координатами точок на діагоналі квадрату. Тобто функція S чітко зростає лише тоді, коли один із двох факторів позитивний, а другий негативний.

Залежності, що показані на рис. 3–5 (зокрема області, що позначені помаранчево-червоними колами), вказують, що високий ступінь деградації 4-НФ відповідає експериментальним умовам:

- концентрації H_2O_2 0,75 мл / на 100 мл розчину та катализатора 1 г / 100 мл розчину NiFe_2O_4 ;
- час обробки УФ-випромінюванням необхідно підтримувати на рівні, близькому до його максимального значення 60 хвилин.

Висновки. Представлені результати показують, що ферит нікелю є ефективним катализатором розкладу 4-НФ під дією УФ-випромінювання.

Використання методу планування експерименту з варіюванням факторів (концентрація H_2O_2 , концентрація NiFe_2O_4 , час обробки) дало змогу визначити, які саме змінні найбільш впливові в процесі деградації 4-НФ. Підвищення часу обробки призвело до збільшення ступеня деградації 4-НФ. Вплив концентрації перекису водню та катализатора має екстремальний характер. Встановлена така значимість факторів: $t_{\text{об}} > V_{\text{H}_2\text{O}_2} > m_{\text{кат}}$

Крім того, дисперсійний аналіз показав узгодженість між експериментальними даними та теоретично визначеними, тобто отримана математична модель адекватна.

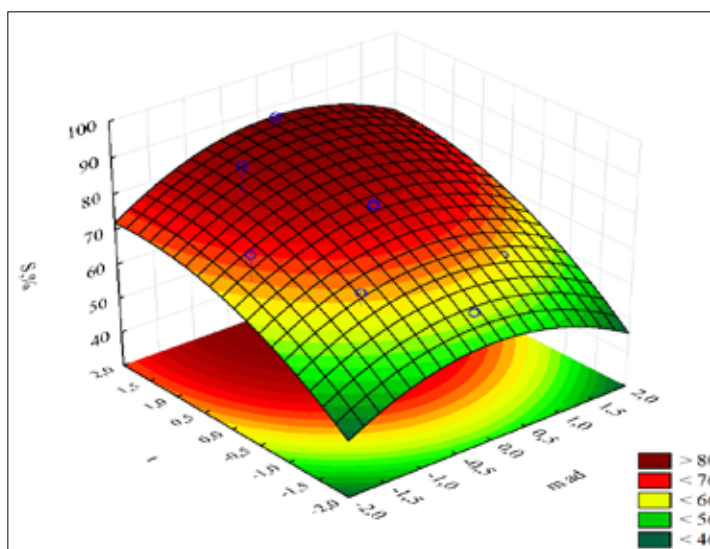


Рис. 3. Залежність ступеня деградації 4-НФ від часу обробки та маси катализатора

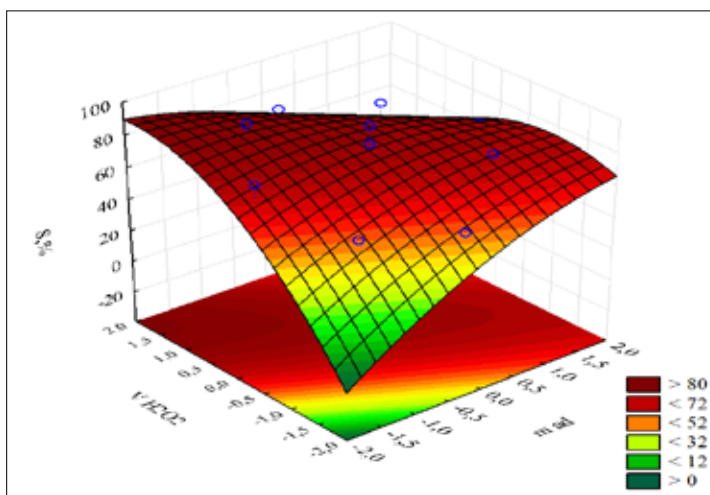


Рис. 4. Залежність ступеня деградації 4-НФ від об'єму перекису водню та маси катализатора

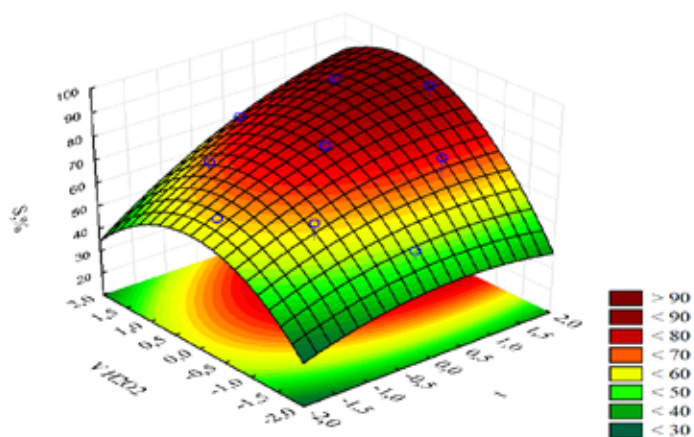


Рис. 5. Залежність ступеня деградації 4-НФ від об'єму перекису водню та часу обробки

Список літератури:

1. Wen Y., Schoups G., Van De Giesen N. Organic pollution of rivers: Combined threats of urbanization, livestock farming and global climate change. *Scientific reports*. 2017. 7. P. 43289.
2. Lin C. et al. Contamination levels and potential sources of organic pollution in an Asian river. *Water Science and Technology*. 2017. 76, 9, P. 2434–2444.
3. Sun J. et al. Organic contamination and remediation in the agricultural soils of China: A critical review. *Science of the Total Environment*. 2018. 615. P. 724–740.
4. Shakir E., Zahraw Z., Al-Obaidy A.H.M.J. Environmental and health risks associated with reuse of wastewater for irrigation. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2017. 26, 1, P. 95–102.
5. Assaad A., Pontvianne S., Pons M.N. Assessment of organic pollution of an industrial river by synchronous fluorescence and UV–vis spectroscopy: the Fensch River (NE France). *Environmental monitoring and assessment*. 2017. 189, 5, P. 229.
6. Saxena G., Bharagava R. N. Organic and Inorganic Pollutants in Industrial Wastes: Ecotoxicological Effects, Health Hazards, and Bioremediation Approaches. *Environmental pollutants and their bioremediation approaches*, CRC Press, 2017. P. 23–56.
7. Hu H. et al. Structural and mechanistic understanding of an active and durable graphene carbocatalyst for reduction of 4-nitrophenol at room temperature. *Nano research*. 2015. 8. 12. P. 3992–4006.
8. Sahu K., Singh J., Mohapatra S. Catalytic reduction of 4-nitrophenol and photocatalytic degradation of organic pollutants in water by copper oxide nanosheets. *Optical Materials*, 2019. 93. P. 58–69.
9. Dang T.T. et al. Nano-Catalysts in Ozone-Based Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*. 2020. P. 1–13.
10. Egerton T.A. et al. The effect of UV absorption on the photocatalytic oxidation of 2-nitrophenol and 4-nitrophenol. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2005. 35. 7-8, P. 799–813.
11. Wei S. et al. Molecularly imprinted tio₂/wo₃-coated magnetic nanocomposite for photocatalytic degradation of 4-nitrophenol under visible light. *Australian Journal of Chemistry*. 2016. 69. 6, P. 638–644.
12. Xiong Z. et al. Degradation of p-nitrophenol (PNP) in aqueous solution by a micro-size Fe₀/O₃ process (mFe₀/O₃): Optimization, kinetic, performance and mechanism. *Chemical Engineering Journal*. 2016. 302, P. 137–145.
13. Peng F. et al. Kinetics and mechanisms of enhanced degradation of ibuprofen by piezo-catalytic activation of persulfate. *Chemical Engineering Journal*. 2020. 392. P. 123818.
14. Zhou Z.G. et al. Degradation of organic pollutants by peroxymonosulfate activated by MnO₂ with different crystalline structures: Catalytic performances and mechanisms, *Chemical Engineering Journal*. 2019. 374, P. 170–180.
15. Zhang H. et al. Heterogeneous activation of hydrogen peroxide by cysteine intercalated layered double hydroxide for degradation of organic pollutants: Performance and mechanism. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019. 543, P. 183–191.
16. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. Москва : Химия, 1985. 448 с.

Frolova L.A. OPTIMIZATION OF CONDITIONS FOR THE PHOTOCATALYTIC OXIDATION OF 4-NITROPHENOL

The development of industrial technologies and agricultural activities has led to the release of organic compounds, which is a potential threat to aquatic ecosystems and human health. These include pollutants such as pesticides, chlorination and combustion products of natural fuels, applied means and means of hygiene protection. To increase the efficiency of traditional methods of treatment of polluted wastewater using advanced oxidation processes that provide powerful destruction of environmental pollutants due to the formation of active radicals. Among them, the Fenton process is promising due to the high degree of degradation of persistent pollutants.

In addition, the scaling of chemical technologies - from laboratory research to industrial production is a difficult task and requires determining the optimal conditions for the process, a deep knowledge of the mechanism of reactions occurring in the system. This is necessary for the design and technological development of the main devices and determine the optimal conditions for their operation.

The process of decomposition of 4-nitrophenol in the presence of a ferrite catalyst is considered in the article. The experiments were performed using a reactor equipped with a UV emitter. The concentration of 4-nitrophenol was determined using a UV 5800 PC spectrophotometer. The statistical model was developed using the software package STATISTICA 10 and was based on the main reactions that occurred under the action of UV radiation in the presence of a ferrite catalyst. The calculated concentrations and degree of decomposition of 4-nitrophenol were confirmed by experimental results. A statistical model is obtained that is adequate. Using the method of central compositional planning of the experiment, the optimal process parameters were also determined, namely the concentration of the photocatalyst, hydrogen peroxide and processing time.

Key words: ferrite, experiment planning, organic pollutants, catalyst.

УДК 666.948: 666.972.112
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/27>

Шишкин А.А.

Криворожский национальный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИЦЕЛЛООБРАЗУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ СМЕСЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ РЕАКЦИОННОГО ПОРОШКОВОГО БЕТОНА

За певних умов збільшення швидкості гідратації в'язучої речовини сприяє збільшенню міцності бетону при стиску. Це стосується і реактивних порошкових бетонів. Дослідження, спрямовані на подальше вдосконалення і розробку технології бетону на основі портландцементу з використанням вищезазначених поверхнево-активних речовин, актуальні. Використання сполук двох або кількох поверхнево-активних речовин може дати змогу змінити або розширити якісні показники або властивості реакційного порошкового бетону. Вивчено вплив різного виду поверхнево-активних речовин, здатних утворювати міцели, і їх сумішей на швидкість утворення і кінцеве значення міцності на стиск портландцементних порошкових бетонів. Особливістю дослідження було вивчення одночасного впливу суміші поверхнево-активних речовин, які утворюють міцели, які відрізняються своєю взаємодією з водою, зокрема олеата натрію і стеарата кальцію, на зміну міцності бетону. Встановлено, що міцелярні розчини зазначених речовин змінюють характер формування міцності портландцементних реактивних порошкових бетонів. Швидкість формування міцності в початковій періоді збільшується завдяки міцелярному каталізу гідратації портландцементу, а їх підвищена міцність на стиск зберігається на більш пізніх стадіях зміцнення. Міцність портландцементних реактивних порошкових бетонів із використанням суміші поверхнево-активних речовин, здатних утворювати міцели, сягає 190% міцності таких бетонів без добавок. Було доведено, що міцелярний катализ можна використовувати для керування процесом твердіння суміші портландцементу з водою, що призводить до підвищення міцності отриманого штучного каменю. За рахунок цього скорочується час досягнення розрахункової міцності бетону, а абсолютна величина міцності на стиск таких бетонів у віці 28 днів збільшується.

Ключові слова: портландцемент, олеат натрію, стеарат кальцію, міцелярний катализ, міцність бетону, порошковий бетон, міцели, поверхнево-активні речовини.

Постановка проблеми. С каждым годом увеличиваются объемы строительства с применением монолитного бетона, к которому предъявляют много требований, основной из которых является высокая скорость формирования прочности, а также в зависимости от вида и условий эксплуатации – высокий предел прочности. Основным видом вяжущих веществ, применяемых в технологии монолитного строительства, является портландцемент. Современные научные труды в области бетоноведения базируются на применении суперпластифицированных портландцементов и смесей портландцементов с различными реакционно-активными порошками, в результате чего получают так называемые реакционные порошковые бетоны (RPC), обладающие высокой прочностью при сжатии.

Анализ последних исследований и публикаций. В качестве порошков, используемых для производства реакционно-порошковых бетонов, обычно применяют микрокремнезем, метакрилин, золу унос ТЭС, горные породы. В резуль-

тате применения реакционно-активных порошков и супер- или гиперпластификаторов удалось получить бетоны с прочностью при сжатии от 100 до 200 МПа и прочностью при растяжении 25–50 МПа [1; 2].

Следует отметить, что такие бетоны разработаны и исследованы при использовании в качестве основного вяжущего вещества портландцемента. В то же время существует большая группа вяжущих веществ, которые не содержат минералов, аналогичных минералам портландцемента. Основой таких вяжущих веществ является тонкомолотый гранулированный доменный шлак, который смешивают с водным раствором щелочного компонента (шлакощелочные бетоны) [3]. В состав таких бетонов рекомендуется [4] вводить реакционно-активные порошки, в частности содержащие ионы переходных химических элементов. Указанные бетоны имеют другую природу и механизм гидратации, чем цементы, а прочность таких бетонов достигает 100 МПа при скорости твердения, превышающей скорость твердения дисперсных

систем на основе портландцементов. Однако данные бетоны обладают повышенной деформативностью, что сдерживает их применение. Современное состояние развития строительства требует дальнейшего улучшения свойств бетонов на основе традиционных вяжущих веществ, в том числе и портландцемента, путем модификации их структуры.

Установлено, что повышение прочности бетона происходит при одновременном введении в его состав минерального комплекса, содержащего железо и полиспирты [5].

Использование сочетаний двух или нескольких поверхностно-активных веществ (далее – ПАВ) может дать возможность изменить или расширить качественные показатели или свойства реакционного порошкового бетона. Неадитивное изменение того или иного показателя часто относят за счет синергизма или, наоборот, антагонизма между молекулами ПАВ. Примером синергизма, обусловленного наличием взаимодействия, может служить система «коллоидное поверхностно-активное вещество – высший спирт – вода». Добавки высших жирных спиртов снижают критическую концентрацию мицеллообразования (ККМ) коллоидного поверхностно-активного вещества, поверхностное натяжение, повышают вязкость адсорбционных слоев коллоидного поверхностно-активного вещества и, как следствие, увеличивают стабильность дисперсий. Причиной этого служит образования водородной связи между гидроксилом спирта и карбоксильной группой коллоидной поверхностно-активного вещества.

Исследования показывают, что при добавлении определенных количеств спирта к воде наблюдается стабилизация раствора, которая определяется в основном ассоциацией частиц, а также переходом менее упорядоченных структур в более упорядоченные. Так как жидкая вода состоит из областей определенного строения, называемых кластерами, при добавлении спирта сначала заполняются пустоты между кластерами, что приводит к их стабилизации, а затем молекулы спирта начинают конкурировать за водородные связи внутри кластеров. При этом гидрофильные группы спиртов могут замещать молекулы воды в локальных образованиях. Особенно легко в структуру воды внедряются небольшие по размеру молекулы спирта, которые, попадая в локальные молекулярные образования, сохраняют пространственное расположение молекул воды. Это подтверждает тот факт, что при добавлении спирта к воде наблюдается уменьше-

ние межслойных расстояний по сравнению с теми же значениями для воды. С ростом алкильного радикала происходит постепенное увеличение межслойных расстояний, что доказывает разрушительное воздействие более объемных молекул спирта, которое сопровождается существенными перестройками пространственного расположения молекул в локальных образованиях воды.

Спирты упорядочивают водную структуру, что облегчает перемещение протонов и ионов гидроксила по сетке водородных связей (эстафетный механизм электропроводности). В присутствии спирта, через гидрофобные взаимодействия, вода уже частично структурирована.

Введение в систему «портландцемент – вода» полиспиртов (например, глицерина или этиленгликоля) в начальные сроки гидратации практически не меняет кинетику растворения силикатов и мало отражается на составе жидкой фазы. Но в дальнейшем происходит поглощение полиспиртами ионов Ca^{2+} из жидкой фазы с образованием глицератов кальция. То есть полиспирты в рассматриваемой системе в более поздние сроки выполняют роль пуццолановой добавки.

Благодаря экранирующему действию недиссоциированных полярных групп спирта уменьшаются силы электрического отталкивания между одноименно заряженными полярными группами ПАВ, т. е. уменьшается количество МПАВ в системе при сохранении величины эффекта их присутствия.

Автором с сотрудниками получены реакционные порошковые бетоны, содержащие в качестве коллоидных поверхностно-активных веществ олеат натрия или его смесь с полиспиртом [6; 7]. Повышение качества бетона в данном случае происходит из-за повышенной степени структурирования воды наночастицами – димерами коллоидных поверхностно-активных веществ и молекулами полиспирта.

Однако полиспирты не являются отходом производства, поэтому имеют достаточно высокую стоимость, что ограничивает их применение.

Попытки повысить прочность бетона заменой олеата натрия на стеарат кальция [8; 9] не привели к успеху.

В тоже время вопрос совместного использования нескольких видов ПАВ, в том числе и коллоидных, до настоящего времени не рассмотрен достаточно в научной литературе, а такое их использование может привести к достаточно эффективным решениям, способствующим дальнейшему увеличению прочности бетона.

Постановка задания. Целью работы является определение влияния смеси мицеллообразующих ПАВ (МПАВ) на скорость формирования прочности реакционного порошкового бетона и ее величину. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: определить влияние поверхностно-активных веществ, образующих мицеллы, на величину прочности при сжатии реакционного порошкового бетона; определить влияние поверхностно-активных веществ, образующих мицеллы, на скорость формирования прочности при сжатии реакционного порошкового бетона.

Изложение основного материала исследований. Для изготовления бетона использовали стандартный портландцемент М400 производства ПрАО «Хайдельберг цемент» (г. Кривой Рог, Украина), в качестве мелкого заполнителя – отходы обогащения железных руд Южного горно-обогатительного комбината (г. Кривой Рог, Украина), которые имеют размер частиц от 0,001 до 0,63 мм. В качестве поверхностно-активных веществ, образующих мицеллы (МПАВ), применяли олеат натрия (Simagchem Corp., Китай) и стеарат кальция (M.L.A. Индия). Олеат натрия и стеарат кальция растворяли в воде до требуемой, согласно плану эксперимента, концентрации. Водный раствор олеата натрия, смеси олеата натрия и стеарата кальция или смеси олеата натрия и глицерина в количестве, рассчитанном по плану эксперимента, добавляли в емкость с отдозированным количеством воды. Изготовление и испытания образцов бетона осуществляли по стандартным методикам.

В процессе выполненных экспериментов установлено, что прочность цементного камня без добавок составила: в возрасте 3 суток – 12,7 МПа, 7 дней – 27,1 МПа, 28 дней – 43,3 МПа. Эти величины прочности приняты за 100% для определенного возраста бетона. Проведенные исследования показали (табл. 1–3), что применение смеси коллоидных МПАВ для получения бетона приводит к увеличению прочности последнего в любом возрасте его твердения в рамках эксперимента (от 3 до 28 суток).

Кинетика изменения прочности исследуемого бетона в зависимости от вида и содержания поверхностно-активных веществ определялась на протяжении 90 суток (рис. 1).

Через 28 суток твердения бетона на основе бездобавочного портландцемента составляет 43,3 МПа, в то время как прочность бетона, модифицированного структурированной олеатом натрия водой, достигает 52 МПа, а структурированной смесью олеата натрия и стеарата кальция

Таблица 1

Влияние смеси ПАВ на прочность при сжатии РС в возрасте 3 суток

Дополнительное ПАВ		Относительная прочность бетона, %, при концентрации раствора олеата натрия			
вид	содержание, %	0	10 ⁻³ М	10 ⁻⁴ М	10 ⁻⁵ М
-	-	100	165	176	170
глицерин	0,1	102	134	144	136
глицерин	0,2	105	143	153	142
глицерин	0,3	107	140	147	136
стеарат кальция	10 ⁻³ М	105	170	190	186
стеарат кальция	10 ⁻⁴ М	110	199	202	198
стеарат кальция	10 ⁻⁵ М	115	188	198	186

Таблица 2

Влияние смеси ПАВ на прочность при сжатии РС в возрасте 7 суток

Дополнительное ПАВ		Относительная прочность бетона, %, при концентрации раствора олеата натрия			
вид	содержание, %	0	10 ⁻³ М	10 ⁻⁴ М	10 ⁻⁵ М
-	-	100	168	179	174
глицерин	0,1	106	144	164	156
глицерин	0,2	115	153	173	162
глицерин	0,3	121	160	157	146
стеарат кальция	10 ⁻³ М	108	178	199	196
стеарат кальция	10 ⁻⁴ М	112	204	209	205
стеарат кальция	10 ⁻⁵ М	118	193	198	186

Таблица 3

Влияние смеси ПАВ на прочность при сжатии РС в возрасте 28 суток

Дополнительное ПАВ		Относительная прочность бетона, %, при концентрации раствора олеата натрия			
вид	содержание, %	0	10 ⁻³ М	10 ⁻⁴ М	10 ⁻⁵ М
-	-	100	125	126	120
глицерин	0,1	102	128	128	126
глицерин	0,2	105	133	133	132
глицерин	0,3	107	130	127	126
стеарат кальция	10 ⁻³ М	109	140	145	146
стеарат кальция	10 ⁻⁴ М	113	149	153	168
стеарат кальция	10 ⁻⁵ М	118	148	148	156

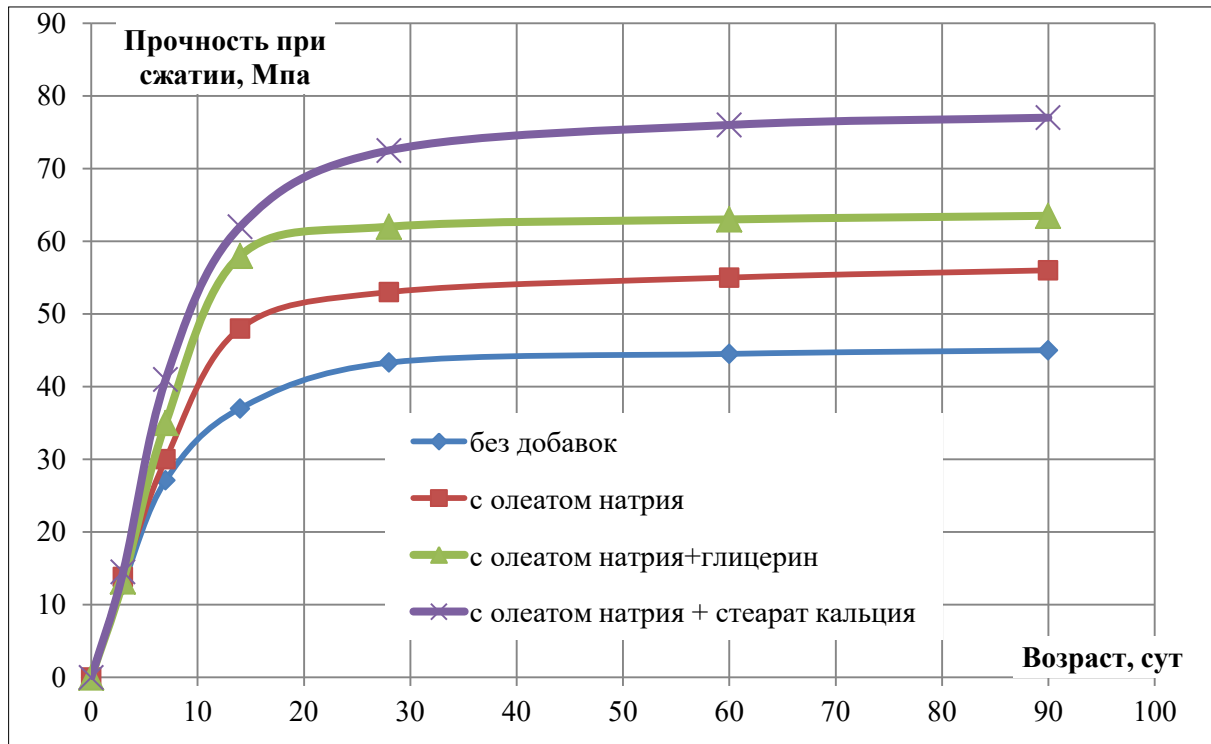


Рис. 1. Изменение прочности бетона во времени (концентрация растворов коллоидных поверхностно-активных веществ составляет $10^{-5}M$, содержание глицерина – 0,2%)

превышает 72 МПа. Через 3 суток твердения показатель удельной прочности наномодифицированного цементного камня ($f_{ck.cube3}/f_{ck.cube28}$) составляет 0,78, а через 7 суток ($f_{ck.cube7}/f_{ck.cube28}$) – 0,95.

Так, до трех суток дисперсные системы набирают прочность со скоростью:

- контрольная (бездобавочная) – 4,2 МПа/сут;
- содержащая олеат натрия – 4,6 МПа/сут.;
- содержащая смесь олеата натрия и глицерина – 4,4 МПа / сут.;
- содержащая смесь олеата натрия и стеарата кальция – 4,8 МПа/сут.

Результаты проведенных исследований показали, что определенные гидрофобные ПАВ (в частности, олеат натрия) обеспечивают увеличение прочности цементного камня. Это может быть объяснено тем, что олеат натрия относится к коллоидным ПАВ (МПАВ) и имеет линейную структуру углеводородного радикала.

Другие использованные ПАВ, которые имеют линейную структуру углеводородного радикала (стеарат кальция и глицерин), также обеспечивают значительное увеличение прочности цементного камня, но меньше, чем олеат натрия. Это явление можно объяснить различием в длине углеводородного радикала примененных МПАВ.

В возрасте 28 суток значительно уменьшается влияние МПАВ на прочность цементного

камня. То есть к этому времени реакции гидратации практически заканчиваются, как у обычного цемента, так и у цемента, который твердеет с водой, структурированной МПАВ. Очевидно, прочность цементного камня, который создан в результате затвердевания дисперсной системы «портландцемент – димеры МПАВ – вода», «показывает» прочность, которую может приобрести цементный камень без добавок в больший срок твердения.

На основании выполненных исследований определена однозначно тенденция повышения прочности при твердении дисперсной системы «портландцемент – вода – димеры МПАВ».

Как было показано выше, наиболее существенный эффект модификации цементного камня димерами МПАВ наблюдается при концентрации последних в воде затвердения в достаточно узком интервале.

Результаты опытов показали, добавление в реакционный порошок бетон мицеллообразующих ПАВ или их смесей приводит к увеличению прочности бетона. В общем случае концентрация водного раствора МПАВ или смеси МПАВ в реакционном порошковом бетоне, которая обеспечивает получение максимальной прочности бетона при сжатии, составляет от $10^{-4}M$ до $10^{-5}M$. Изменение прочности бетона во времени

увеличивается при введении МПАВ. Преимуществом результатов проведенных исследований является определенная возможность значительного (до 200%) увеличения прочности порошкового бетона на основе портландцемента. Однако существуют и определенные ограничения в применении результатов этого исследования. Так, необходимо контролировать сроки схватывания бетона, которые при применении определенных видов щелочного компонента могут быть

довольно малыми. В дальнейшем для расширения области применения исследованных бетонов целесообразно изучить влияние мицеллярного катализа на деформативные свойства.

Выводы. Введение в состав реакционного порошкового бетона МПАВ или их смесей обеспечивает повышение прочности бетона на сжатие, которая достигает 160% от прочности бетона аналогичного состава, полученного без применения МПАВ.

Список литературы:

1. Фаликман В.Р. Новые эффективные высокофункциональные бетоны. *Бетон и железобетон*. 2011. № 2. С. 78–84.
2. Erdem, T.K., Kirca O. Use of binary and ternary blends in high strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2008. 22, 7. P. 1477–1483. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.026.
3. Кривенко П.В. Роль технологических факторов в формировании структуры и свойств шлакощелочных бетонов. *Вісник ОДАБА*. 2015. № 57. С. 38–45.
4. Шишкин А.А. Щелочные реакционные порошковые бетоны. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 2(17). С. 56–65.
5. Shishkin A., Shishkina A., Vatin N. Low-shrinkage alcohol cement concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. 633–634. P. 917–921. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.633-634.917.
6. Shishkina A., Shishkin A. Research into effect of complex nanomodifiers on the strength of fine-grained concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 2/6 (92). P. 29–33.
7. Шишкина А.А., Шишкин А.А. Влияние коллоидных поверхностно-активных веществ на прочность мелкозернистых бетонов. *Наука та будівництво*. 2016. № 1(7). С. 10–13.
8. Калашников В.И., Махамбетова К.Н., Шитова И.Ю., Самошина Е.Н., Петухов А.В. Гигрометрические свойства цементно-песчаных растворов, модифицированных современными гидрофобизаторами. *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1-1. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18783> (дата обращения: 07.07.2020).
9. Калашников В.И., Махамбетова К.Н., Троянов И.Ю., Петровский Д.А. Исследование влияния катиона металла стеаратов и дозировки их на водопоглощение и прочность модифицированного цементного композита. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2009. № 12. С. 14–15. URL: <https://tucont.ru/efd/412658> (дата обращения: 07.07.2020).

Shyshkin A.A. RESEARCH OF THE INFLUENCE OF MICELLO-FORMING SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES AND THEIR MIXTURES ON THE STRENGTH OF REACTIVE POWDER CONCRETE

Under certain conditions, an increase in the speed of binder hydration helps to increase the compressive strength of concrete. This is especially true for reactive powder concrete. Considering the specific influence of the surfactants that form micelles, research is relevant to further improve and develop concrete technology based on Portland cement using the aforementioned surfactants. The effect of various types of surfactants capable of forming micelles and their mixtures on the rate of formation and the final value of the compressive strength of Portland cement powder concretes was studied. A feature of the study was the study of the simultaneous effect of a mixture of surfactants that form micelles, which differ in their interaction with water, in particular sodium oleate and calcium stearate, on the change in concrete strength. It was found that these micellar solutions change the nature of the strength formation of Portland cement reactive powder concrete. The rate of formation of strength in the initial periods increases due to micellar catalysis of hydration of Portland cement, and their increased compressive strength remains at later stages of hardening. The strength of Portland cement reactive powder concrete using a mixture of surfactants capable of forming micelles, reaches 190% of the strength of such concrete without additives. It has been proven that micellar catalysis can be used to control the curing process of a mixture of Portland cement and water, and to give strength to the resulting artificial stone. Due to this, the time to reach the estimated concrete strength is reduced, and the absolute value of the compressive strength of such concrete at the age of 28 days is increased.

Key words: Portland cement, sodium oleate, calcium stearate, micellar catalysis, concrete strength, powder concrete, micelles, surfactants.

Шишкіна А.А.

Криворожский национальный университет

ПОРИСТЫЕ РЕАКЦИОННЫЕ ПОРОШКОВЫЕ БЕТОНЫ

Навколишнє середовище здійснює температурний вплив на будівельні конструкції як промислових, так і цивільних будівель і споруд, змінюючи їх внутрішній температурний режим. Однією з найбільш значущих статей, які визначають вартість експлуатації будівель і споруд, є величина витрат на підтримання в них необхідного температурного режиму. Наукова гіпотеза цієї роботи полягає в тому, що для управління процесами структуроутворення пористих бетонів необхідне введення до їх складу мінерально-органічної композиції, мінеральна частина якої представлена сполуками заліза, а органічна – колоїдними гідрофобними поверхнево-активними речовинами. Метою досліджень є отримання пористого реакційно-порошкового бетону з підвищеною міцністю і зниженим водопоглинанням шляхом модифікації його складу комплексною добавкою. У роботі застосовано стандартні методи досліджень. Експериментами встановлено вплив комплексної добавки на міцність пористого реакційного порошкового бетону, об'ємне водопоглинання досліджуваних бетонів і їх водопоглинання методом капілярного підсосу для бетонів, приготованих без використання комплексної добавки і з використанням добавки. Досліджено зміну в часі маси бетону з добавкою і без неї. Внаслідок цього було встановлено, що одночасне введення в пористі реакційні порошкові бетони мінерального комплексу, що містить залізо і колоїдні поверхнево-активні речовини, призводить до підвищення міцності при стиску і зниження водопоглинання зазначених бетонів. Показано, що вміст мінерального комплексу (порошку), що містить залізо, й органічного компонента – колоїдних поверхнево-активних речовин у пористому реакційному порошковому бетоні має екстремальний характер, тобто є їх вміст, який забезпечує найбільшу міцність таких бетонів і їх найменше водопоглинання.

Ключові слова: реакційний порошковий бетон, міцність, колоїдні поверхнево-активні речовини.

Постановка проблеми. Окружающая среда оказывает температурное влияние на строительные конструкции как промышленных, так и гражданских зданий и сооружений, изменяя их внутренний температурный режим. Одной из наиболее значимых статей, которые определяют стоимость эксплуатации зданий и сооружений, является величина затрат на поддержание в них требуемого температурного режима. Эффективными материалами, позволяющими снизить влияние тепловых воздействий окружающей среды на температурный режим внутренних помещений здания за счет низкой теплопроводности, являются легкие и пористые бетоны. В настоящее время пористые бетоны широко применяются для производства наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений. Однако указанные бетоны обладают целым рядом недостатков, таких как повышенные набухание, усадка и водопоглощение, а также недостаточно высокая прочность при сжатии, что ограничивает их применение. Использование высокопрочных пористых бетонов делает возможным возведение зданий и сооружений, обладающих высокими теплотехническими характеристиками, обеспечивающими

требуемые показатели внутреннего температурного режима внутри.

Анализ последних исследований и публикаций. В основе современной технологии бетона любого вида, как плотного, так и пористого, лежит получение цементного камня высокого качества. Качество же цементного камня формируется за счет высокой дисперсности исходных компонентов и новообразований и малой дефектности структуры.

На основе высококачественного цементного камня могут создаваться бетоны самого различного качества путем введения в структуру материала дополнительных составляющих и ее модификации [1–6]. В частности, при получении пенобетонов основными компонентами, которыми насыщается структура бетона, являются воздушные поры [7–9]. Повышение пористости бетона приводит к снижению его плотности и, как следствие, его теплопроводности, но обуславливают снижение его прочности (в первую очередь, при сжатии), что ограничивает область его применения. Очевидно, что основным путем повышения прочности пористых бетонов является повышение прочности их межпоровых перегородок,

что достигается применением высокопрочных бетонов. Наиболее приемлемыми в данном случае являются так называемые реакционные порошковые бетоны – Reactive powder concretes (RPC). Эти бетоны получают на основе смеси вяжущих веществ различного типа [10–13], реакционного порошка (микронаполнителя), в качестве которого предложено применять отходы обогащения железных руд, микрокремнезем, золу-унос, известняк, другие реакционно-активные вещества, пластификатор [3; 11–15]. В случае создания пористости бетона путем применения пен – пенобетона, наличие пенообразователя, который представляет собой поверхностно-активное вещество (ПАВ), приводит к тому, что часть этого ПАВ остается в межпоровых перегородках и, адсорбируясь на поверхности частиц вяжущего, замедляет реакции его гидратации вплоть до их полной остановки. Это приводит к тому, что остается значительное количество негидратированного вяжущего вещества, снижается прочность межпоровых перегородок и, как следствие, пенобетона.

На основе анализа результатов исследований в области флотации [16] и исследований школы академика П.А. Ребиндера [17] получены пенобетоны повышенной прочности [18]. Однако из-за значительного расхода органического компонента минерально-органической системы – полиспирта эти бетоны обладают достаточно высокой стоимостью, что снижает область их применения.

Установленный эффект влияния высокомолекулярных гидрофобных поверхностно-активных веществ на прочность цементного бетона [18] послужил основой научной гипотезы этой работы, которая заключается в следующем: для управления процессами структурообразования пористых RPC, независимо от метода создания пористой структуры, необходимо ввести в их состав минерально-органическую композицию, минеральная часть которой представлена соединениями железа, а органическая – коллоидными гидрофобными поверхностно-активными веществами. Эта композиция будет модифицировать структуру продуктов гидратации вяжущих веществ, способствуя повышению скорости гидратации и достижению высокой прочности затвердевшей системы. Этот вид бетонов практически полностью подпадает под классификацию как Reactive powder concretes (RPC), содержащих поры, т. е. пористые Reactive powder concretes (pRPC).

Постановка задания. Целью настоящей работы является получение высокопрочных пористых RPC и определение степени влияния

минерально-органической добавки на основе минерального комплекса, содержащего железо и коллоидные гидрофобные поверхностно-активные вещества (МПАВ), на прочность при сжатии, пористость и водопоглощение этих бетонов.

Изложение основного материала исследований. Исследования производили в соответствии со стандартными методиками. Определение прочности при сжатии производили на универсальной машине УММ-100 испытанием стандартных образцов (образцы-кубы с размером сторон 150 мм и образцы-балочки 40x40x160 мм). Для изготовления образцов использовали стандартный портландцемент М400 производства ПАО «Хайдельберг цемент» (г. Кривой Рог). В качестве железосодержащего компонента использовали оксид железа и тонкодисперсную часть отходов обогащения железных руд Новокриворожского горно-обогатительного комплекса ПАО «Миталлстил Кривой Рог». После классификации отходы обогащения железных руд по своему гранулометрическому составу соответствуют крупному песку (модуль крупности 2,3), тонкодисперсная часть отходов обогащения железных руд имела удельную поверхность 260 м²/кг. В качестве заполнителя применяли речной песок. В качестве коллоидного гидрофобного ПАВ применяли олеат натрия (Simagchem Corp., Китай), в качестве пенообразователя использовали пенообразователь – ПО-2, а в качестве газообразователя – алюминиевую пудру.

Для исключения влияния на результаты исследований состава бетона он был принят постоянным (на 1 дм³):

цемент – 450 г;
заполнитель – 150 г;
вода – 250 г.

Для получения пенобетона добавляли пенообразователь в количестве 0,18% от массы цемента, для получения газобетона – алюминиевую пудру в количестве 0,22% от массы цемента. В результате получены пористые бетоны:

пенобетон: плотность 554 кг/м³, прочность при сжатии 3,6 МПа;

газобетон: плотность 550 кг/м³, прочность при сжатии 3,9 МПа.

В процессе экспериментов в составе бетона менялось содержание железосодержащего компонента и коллоидного ПАВ – олеата натрия. Железосодержащий компонент вводился в сухом виде путем смешивания с цементом и заполнителем, олеат натрия вводился водным раствором различной концентрации в предварительно отмерянную

для замеса дозу воды. Результаты исследования влияния комплексной добавки на прочность пористого RPC (табл. 1 и 2) показали, что оптимальным является содержание железосодержащего компонента 0,22% от массы цемента и коллоидных ПАВ при концентрации их в растворе $10^{-4}M$.

Таблица 1

Влияние комплексной добавки на прочность при сжатии пористого RPC

Содержание оксида железа, %	Относительная прочность бетона, %, при концентрации раствора МПАВ			
	0	$10^{-3}M$	$10^{-4}M$	$10^{-5}M$
0	100	165/160	176/180	170/176
0,22	110	187/189	188/192	182/188
0,44	115	180/188	184/188	167/166

Примечания: 1. Прочность: в числителе – пенобетона, в знаменателе – газобетона

Таблица 2

Влияние комплексной добавки на прочность при сжатии пористого RPC

Содержание тонкодисперсной части отходов обогащения железных руд, %	Относительная прочность бетона, %, при концентрации раствора МПАВ			
	0	$10^{-3}M$	$10^{-4}M$	$10^{-5}M$
0	100	168/166	176/174	170/179
0,22	110	187/189	188/190	182/190
0,44	115	180/188	184/187	167/168

Примечания: 1. Прочность: в числителе – пенобетона, в знаменателе – газобетона

Отличие приведенных результатов от полученных ранее [14; 18] может быть объяснено только лишь отличием примененного органического компонента комплексной добавки. В случае применения полиспирта в качестве органического компонента добавки прочность бетона повышается за счет образования гликолятов кальция, которые, вытесняя пенообразователь, создают упроченный достаточно тонкий слой вокруг пор. В случае применения в качестве органического компонента добавки олеата натрия возникает явление гидрофобной гидратации, которая приводит к структурированию воды, что, в свою очередь, стимулирует все реакции гидратации цемента, а это приводит к повышению прочности стенок пор (межпоровых перегородок).

Как видно из результатов экспериментов, использование тонкодисперсной части отходов обогащения железных руд оказалось более эффективным по сравнению с использованием оксида железа. Очевидно, это связано с тем, что в отходах обогащения

железных руд содержится не только оксид железа, но и другие соединения железа, а также иные вещества. Так как для бетона наиболее опасной является открытая пористость, во второй группе проведенных исследований было изучено изменение данного вида пористости в зависимости от содержания комплексной минерально-органической добавки. Открытую пористость пористого бетона определяли двумя методами: методом объемного водопоглощения и методом капиллярного подсоса. В первом случае образцы бетона высушивали до постоянной массы, взвешивали, на 48 часов погружали в воду и вновь взвешивали. Водопоглощение определяли как отношение разницы в массе образцов, выдержанных в воде и высушенных до постоянной массы, к массе высушенных образцов в процентах. Во втором случае образцы-балочки помещали в емкость с водой в вертикальном положении таким образом, чтобы образцы были погружены в воду на 1 см. В процессе проведения эксперимента (48 часов) в емкости поддерживали постоянный уровень воды. Водопоглощение определяли тем же методом. Как показали результаты экспериментов по первому методу (табл. 3), введение комплексной добавки в исследуемую систему приводит к резкому снижению водопоглощения бетоном.

Таблица 3

Влияние комплексной добавки на водопоглощение пористого RPC (погружение в воду)

Содержание МПАВ, %	0	$10^{-3}M$	$10^{-4}M$	$10^{-5}M$
Водопоглощение, %	92/48	80/32	58/30	62/30

Примечания: 1. Водопоглощение: в числителе – пенобетона; в знаменателе – газобетона. 2. В добавке содержание оксида железа составляет 0,22% от массы цемента. 3. Масса высушенного образца 554 г

Определение водопоглощения пористого RPC вторым методом (методом капиллярного подсоса) также показало, что введение комплексной добавки приводит к значительному уменьшению водопоглощения пористым бетоном (таблица 4).

Таблица 4

Влияние комплексной добавки на водопоглощение пористого RPC (капиллярный подсос)

Высота подъема воды, %	
Без добавки	С добавкой
48/35	21/13

Примечания: 1. Концентрация МПАВ в водном растворе составляет $10^{-4}M$. 2. Высота подъема воды: в числителе – пенобетона; в знаменателе – газобетона

Уменьшение высоты подъема воды по телу бетона можно объяснить только резким уменьшением количества открытых пор и сообщающихся капилляров в объеме пористого RPC. Это обеспечивается введением комплексной добавки, которая состоит из коллоидного ПАВ и железосодержащего вещества, что служит подтверждением научной гипотезы работы. В третьей группе исследований было определено изменение массы образцов-кубов (которые имели объем 1000 см³) начиная с 7-суточного возраста. Как показали результаты следующей группы экспериментов (табл. 5), образцы, изготовленные из пористого бетона (пенобетона) с добавкой, за 28 суток потеряли 18,3% массы, а образцы, изготовленные из пенобетона без добавки, – 16,8 %, т. е. потеря массы образцами после 7 суток твердения практически не зависит от содержания комплексной добавки.

Таблица 5

Изменение массы образцов пенобетона во времени

Возраст, сут.	Масса образца, г	
	Без добавки	С добавкой
0	544	544
7	501	513
28	444	453

Примечания: 1. Расход железосодержащего компонента добавки 0,22% от массы цемента. 2. Олеат натрия ввдился в концентрации водного раствора 10⁻⁴М

Однако следует отметить, что в момент изготовления образцов они имели практически одинаковую массу, были изготовлены с одинаковым расходом компонентов по одинаковой технологии. Их состав отличался только наличием добавки, что не определяет результаты экспериментов. Образцы хранили в климатической камере при температуре 20 °С и относительной влажности 65%.

Таким образом, за первые семь суток твердения образцы, приготовленные на основе дисперсной системы «цемент – вода – пенообразователь», потеряли 22,1% массы. В то же время образцы, приготовленные на основе системы дисперсной системы «цемент – вода – пенообразователь – комплексная добавка», потеряли только 12,3% массы.

Так как образцы изготавливали из одних и тех же материалов, одного и того же состава, потеря массы образцами могла происходить только из-за потери ими влаги. Результаты этой группы экспериментов косвенно подтверждают, что в пористом бетоне, полученном в результате твердения дисперсной системы «цемент – вода – пенообразователь – комплексная добавка», формируется значительно большее количество замкнутых пор по сравнению с бетоном, полученным в результате твердения дисперсной системы «цемент – вода – пенообразователь». Результаты этих исследований используются предприятием «Перспектив СМ» (Украина). В промышленных условиях использование смеси тонкодисперсной части отходов обогащения железных руд и олеата натрия в качестве добавки к пенобетону позволило повысить прочность пенобетона на 45–60% или снизить расход цемента на 50 кг/м³ пенобетона без потери прочности.

Выводы. На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что одновременное введение в пористые реакционные порошковые бетоны (pRPC) минерального комплекса, содержащего железо, и коллоидного поверхностно-активного вещества приводит к повышению прочности при сжатии и снижению водопоглощения указанных бетонов.

2. Содержание минерального железистого комплекса (порошка) и органического компонента в pRPC носит экстремальный характер, т.е. имеется их содержание, обеспечивающее наибольшую прочность таких бетонов и их наименьшее водопоглощение.

Список литературы:

1. Баженов Ю.М. Бетоны: технологии будущего. *Современные стройматериалы*. 2005. Июль-август. С. 50–52.
2. Шишкина А.А. Свойства и технология пенобетона, модифицированного оксидами железа : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Кривой Рог, 2010. 178 с.
3. Шишкин А.А. Специальные бетоны для усиления строительных конструкций эксплуатирующихся в условиях действия агрессивных сред : дис. ... докт. техн. наук : 05.23.05. Кривой Рог, 2003. 336 с.
4. Termkhajornkit P., Nawa T., Nakai M., Saito T. Effect of fly ash on autogenous shrinkage. *Cem. Concr. Res.* 2005. Vol. 35. Issue 3. Pp. 473–482.
5. Yang Y., Sato R., Kawai K. Autogenous shrinkage of high-strength concrete containing silica fume under drying at early ages. *Cem. Concr. Res.* 2005. Vol. 35. Issue 3. Pp. 449–456.
6. Меркин А.П., Траубе П.Р. Непрочное чудо. Москва, 1983. 224 с.
7. Меркин А.П., Кобидзе Т.Е. Особенности структуры и основы технологии получения эффективных пенобетонных материалов. *Строительные материалы*. 1988. № 3. С. 16–18.

8. Шахова Л. Некоторые аспекты исследований структурообразования ячеистых бетонов неавтоклавного твердения. *Строительные материалы*. 2003. № 2. С. 4–7.
9. Юдович Б.Э., Зубехин С.А. Пенобетон: новое в основах технологии. *Техника и технология силикатов*. 2007. Т. I. С. 14–24.
10. Kocaba V., Gallucci E., Scrivener K.L. Methods for determination of degree of reaction of slag in blended cement pastes. *Cement and concrete research*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2012. Vol. 42. Pp. 511–525.
11. Шишкин А.А. Щелочные реакционные порошковые бетоны. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 2 (17). С. 56–65.
12. Poon C.S., Kou S.C., Lam L., Lin Z.S. An innovation method in producing high early strength PFA concrete. *Creating with Concrete: International Conference*. 1999: Proceedings. Dundee (Scotland). 1999. Pp. 131–138.
13. Шишкина А.А. Пористые реакционные порошковые бетоны. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. 7(23). С. 128–135
14. Deschner F., Lothenbach B., Winnefeld F., Neubauer J. Effect of temperature on the hydration of portland cement blended with siliceous fly ash. *Cement and Concrete Research*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2013. Vol. 52. Pp. 169–181.
15. Годэн А.М. Флотация. Москва, 1959. 653 с.
16. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. Москва, 1978. 369 с.
17. Шишкина А.А., Хильченко А.П., Мельниченко Н.П. Пористые бетоны на основе железосодержащих веществ. *Вісник Криворізького національного університету*. 2017. 44. С. 117–122.
18. Shishkin A., Shishkina A. Effect of high molecular vapors on strength Cement systems. *Engineering and Architecture*. 2019. Vol. 7, No. 2. Pp. 96–100.

Shyshkina A.A. POROUS REACTIVE POWDER CONCRETE

On structures of industrial buildings and structures, in particular the mining and metallurgical complex, especially located near thermal devices, has the effect of temperature environment, changing the physical and mechanical properties of the materials from which these structures are made, and, as a consequence, affect their durability. This leads to the need to provide, in the reconstruction of buildings and structures, activities to increase their longevity by reducing the temperature influence of the environment. The purpose of research, the results of which are shown in the work is to obtain a porous Reactive powder concretes with improved strength and reduced shrinkage and water absorption by modifying its integrated additive composition which consists of ironcontaining substance and a polyalcohol. Experiments established the influence of additives on the integrated strength of the porous reactive powder concrete, volumetric water absorption study concrete and water absorption by capillary suction of concrete prepared without the use of complex additives and using supplements. The change in time of mass concrete can be with and without it. Also investigated was the shrinkage of the porous concrete with or without complex additive it. As a result, it was found that the simultaneous introduction to the porous reactive powder concretes (pRPC) mineral complex containing iron polyalcohol and leads to increased compression strength, lower water absorption and shrinkage of said concrete. It is shown that the content of ferrous mineral complex (powder) and an organic component is pRPC extreme nature, i.e. attaching their content, providing the greatest strength of concrete and the least water absorption.

Key words: reactive powder concrete, strength, colloidal surfactants.

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 602.3:579.864:664.843:582.683.2

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/29>

Безусов А.Т.

Одеська національна академія харчових технологій

Палвашова Г.І.

Одеська національна академія харчових технологій

Доценко Н.В.

Одеська національна академія харчових технологій

Афанасьєва Т.М.

Одеська національна академія харчових технологій

ВИКОРИСТАННЯ МОЛОЧНОКИСЛИХ БАКТЕРІЙ У БІОТЕХНОЛОГІЇ КВАШЕНОЇ КАПУСТИ

У роботі проведено аналіз проблем, якими супроводжується виробництво квашеної капусти за традиційною технологією, саме таких як неконтрольований процес ферментації у великих ємностях, неможливість контролю температурного режиму відповідних анаеробних умов, повторна контамінація готового продукту, що не є безпечним для споживачів. До того ж ферментовану капусту необхідно розфасувати у споживчу упаковку. Додаткові операції фасування та час на них спричиняють окиснення капусти киснем повітря, зниження вітаміну С та вторинне обсіменіння з повітря.

Для того щоб невілювати всі негативні моменти, пов'язані з неконтрольованою ферментацією капусти, в роботі запропоновано новий спосіб, який полягає у використанні гомоферментативних молочнокислих бактерій *Lactobacillus plantarum* та ін., які дадуть змогу керувати процесом ферментації капусти та отримати кінцевий продукт високої якості з відповідними органолептичними та фізико-хімічними показниками.

Обґрунтовано використання чистих культур молочнокислих бактерій під час виробництва квашеної капусти та вибір штаму чистих культур гомоферментативних молочнокислих бактерій.

Доведено, що застосування чистих культур у квашенні овочів прискорює процес кислотоутворення і це настільки істотно, що робить бажаним застосування чистих культур як одного з регулятивних чинників.

Якість квашеної капусти в разі закінчення її ферментації за оптимальних температур (21...24 °С) поліпшується, якщо застосовуються чисті культури і коли готовий продукт зберігається за низьких температур – 0...2 °С. Якщо ж капуста зберігається в охолоджуваних приміщеннях, де температура вища 2 °С, то ефект підвищення якості, досягнутий у разі ферментації, втрачається під час зберігання, і застосування чистих культур, зрештою, не дає позитивних результатів.

З огляду на те, що температура ферментації значною мірою впливає на процес бродіння і є основним регулятором розвитку певних груп молочнокислих мікроорганізмів, які визначають певну якість готового продукту, встановлено, що у разі порушення температурного режиму та анаеробних умов ферментації проявляють активність гідролази – ферменти маслянокислих бактерій, що перетворюють цукри капусти на масляну кислоту, CO₂, H₂.

У роботі досліджено вплив тривалості ферментації на зміну вмісту титрованих кислот. Показано, що у разі використання керованого процесу ферментації з внесенням чистих культур молочнокислих бактерій концентрацію солі можна знизити до 0,5...2,0% порівняно з наявним традиційним способом, де вона становить 2...3%, оскільки поживні речовини, які містяться в капусті, доступні молочнокислим бактеріям зразу на першому етапі ферментації, і утворення 1,8% молочної кислоти пригнічує розвиток небажаної мікрофлори, а зниження рН середовища запобігає розвитку патогенних мікроорганізмів.

Оскільки ферментовані продукти є джерелами пробіотичних культур молочнокислих мікроорганізмів, під час процесу ферментації капуста збагачується власними біологічно активними речовинами – вітамінами, ферментами, органічними кислотами й іншими, які в комбінації з пробіотичними мікроорганізмами дають можливість отримати ферментований продукт функціонального та оздоровчого призначення.

На основі експериментальних досліджень доведено, що культивування білоголової капусти чистою культурою молочнокислих бактерій на початку ферментації дає змогу отримати готовий продукт з пробіотичними властивостями та низьким вмістом солі.

Розроблено науково обґрунтовану технологію квашення капусти в полімерній мілкій тарі з вакуумуванням. У розробці технологічної схеми квашення капусти в ємностях до 1 дм³ для інтенсифікації соковиділення запропоновано шатковану капусту піддавати короточасній обробці парою $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 60 \dots 90\text{ с}$. Доведено експериментально, що попередня термічна обробка призведе до зниження патогенної мікрофлори свіжої капусти та до збільшення терміну зберігання готового продукту.

Визначено органолептичні, фізико-хімічні та мікробіологічні показники якості готового продукту. Мікробіологічні дослідження показали, що у готовому продукті, отриманому за удосконаленою технологією, розвиваються молочнокислі бактерії та дріжджі, небажану мікрофлору у вигляді плісенеї не виявлено, а у готовому продукті, отриманому за традиційною технологією, були виявлені плісені. Встановлено, що кількість молочнокислих бактерій у продукті, виготовленому за удосконаленою технологією, забезпечують накопичення необхідної кількості молочної кислоти від 0,7 до 1,8%. Визначено, що у квашеній капусті за традиційною технологією виявлено КУО – 2×10^6 молочнокислих бактерій у 1 г, у квашеній капусті з внесенням штамів чистих молочнокислих бактерій КУО становить 4×10^9 .

Запропоновано фасування готової квашеної капусти в полімерну мілку тару ємністю до 1 дм³ з вакуумуванням до створення тиску 300 Па, що дасть змогу вилучити залишки повітря чи інших газів під час пакування тари з капустою та як подовжити термін зберігання готового продукту, так і запобігти окисненню біологічно активних речовин.

Ключові слова: гомоферментативні молочнокислі бактерії, чиста культура, квашена капуста, пробіотичні продукти, полімерна тара, вакуумування.

Постановка проблеми. Виробництво лактоферментованих плодів та овочів є традиційним способом зберігання сировини в міжсезонний період.

Квашена капуста користується попитом і посідає важливе місце в раціоні людини. Виробництво квашеної капусти засноване на спонтанних процесах бродіння як результату життєдіяльності молочнокислих мікроорганізмів, для яких необхідно створити певні умови – температурний режим, анаеробні умови, додавання солі [3, с. 8].

У разі масового виробництва квашеної капусти у великих ємностях можливий високий відсоток втрат готового продукту, оскільки капуста взаємодіє з навколишнім середовищем, можливе обсіменіння небажаною мікрофлорою, псування, гниття, потемніння та порожевіння готового продукту. Оскільки процес проводять у великих ємностях, на перших стадіях псування можна не помітити і, як результат, уся ємність з капустою буде зіпсованою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчаючи вплив дошників та залізобетонних ємностей на якість квашеної капусти, М.В. Єрохіна, Н.П. Орлов, Н.А. Богатирчук та І.Ю. Кутліна дійшли таких висновків, що тара великої місткості значно знижує якість готової продукції. Науково обґрунтовано і практично доведено, що в таких

ємностях неможливо забезпечити оптимальний температурний режим ферментації (15...24 °С) та зберігання (0...2 °С). У разі вивантаження квашеної капусти з дошників та цементованих ємностей вона окислюється та темніє, що знижує її біологічну цінність та погіршує товарний вигляд. Крім того, для розфасовки додатково використовують велику кількість бочок як інвентарну тару. Вивантаження капусти з дошників проводиться в антисанітарних та шкідливих для людини умовах, з великими затратами ручної праці.

Для квашення капусти також використовуються дерев'яні бочки, але цей вид тари також має свої недоліки: бочки повинні бути виготовлені лише з декількох видів деревини, така тара недешева, бочки розбухають, забираючи частину розсолу [3, с. 18].

Ці недоліки можна попередити у разі проведення ферментації капусти у дрібній тарі з використанням чистих культур молочнокислих бактерій з використанням вакууму.

Метою роботи є наукове обґрунтування розробки технології виробництва квашеної капусти у дрібній полімерній харчовій тарі з використанням чистих культур гомоферментативних молочнокислих бактерій з використанням вакуумування.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- вивчити стадії ферментації капусти;
- дослідити вплив температурного режиму на процес ферментації капусти;
- розробити технологію виробництва квашеної капусти у дрібній упаковці з використанням вакуумування;
- провести порівняльний аналіз традиційних способів ферментації капусти з удосконаленим методом.

Об'єкт досліджень: покращення якості квашеної капусти з використанням молочнокислих бактерій та дрібної поліетиленової вакуумної упаковки.

Предмет досліджень: квашена капуста, виготовлена за традиційною технологією, квашена капуста, виготовлена у дрібній вакуумній упаковці.

Методи досліджень: загальноприйняті та спеціальні – хімічні, фізико-хімічні, біохімічні, мікробіологічні, математичні та ін.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час ферментації капусти відбувається спонтанне бродіння, тому завданням виробника є забезпечення всіх умови для розвитку молочнокислих бактерій, які своєю життєдіяльністю будуть пригнічувати розвиток плісень, бактерій колі-групи та маслянокислих бактерій, що руйнують або пригнічують молочну кислоту та спричиняють псування готового продукту. Проаналізувавши традиційну технологію, можна констатувати, що капуста, яка ферментується у великих ємностях, в яких важко контролювати температурний режим та анаеробні умови і яка контактує з навколишнім середовищем, піддається додатковому обсіменінню, що не є безпечним для споживачів. До того ж ферментовану капусту необхідно розфасувати у споживчу упаковку. Додаткові операції фасування та час на них спричиняють окиснення капусти киснем повітря, зниження вітаміну С та вторинне обсіменіння з повітря.

Для того щоб невілювати всі негативні моменти, пов'язані з неконтрольованою ферментацією капусти, нами запропоновано новий спосіб, який полягає у використанні гомоферментативних молочнокислих бактерій, які дадуть змогу управляти процесом ферментації капусти та отримати кінцевий продукт високої якості з відповідними органолептичними та фізико-хімічними показниками.

З одного боку, загальний напрям мікробіологічних процесів у разі квашення капусти чистими культурами і звичайним способом, по суті, однаковий. Відмінність полягає лише в швидкості про-

ходження основних процесів – під час квашення чистими культурами швидше накопичується молочна кислота.

Результати досліджень залежать від багатьох факторів: ступеня обсіменіння епіфітною мікрофлорою сировини, умов ферментації капусти із застосуванням чистих культур, господарсько-ботанічних сортів сировини та інших.

Застосування чистих культур під час квашення овочів прискорює процес кислотоутворення і це настільки істотно, що робить бажаним застосування чистих культур як одного з регулятивних чинників.

Під час квашення капусти застосовують чисту культуру газоутворюючого виду *V. brassica fermentati* у суміші з чистою культурою дріжджів.

Якість квашеної капусти в разі закінчення її ферментації за оптимальних температур (21...24 °С) поліпшується, якщо застосовуються чисті культури і якщо готовий продукт зберігається за низьких температур. Якщо ж капуста зберігається в охолоджуваних приміщеннях, то ефект підвищення якості, досягнутий у разі ферментації, втрачається під час зберігання і застосування чистих культур, зрештою, не дає позитивних результатів.

Проведені мікробіологічні дослідження показали, що у готовому продукті, отриманому за удосконаленою технологією, розвиваються молочнокислі бактерії та дріжджі, небажану мікрофлору у вигляді плісень не виявлено, а у готовому продукті, отриманому за традиційною технологією, були виявлені плісені. Кількість молочнокислих бактерій у продукті, виготовленому за удосконаленою технологією, забезпечує накопичення необхідної кількості молочної кислоти від 0,7 до 1,8%. Так, у квашеній капусті за традиційною технологією виявлено КУО – 2×10^6 молочнокислих бактерій у 1 г, у квашеній капусті з внесенням штамів чистих молочнокислих бактерій КУО становить 4×10^9 .

У процесі спонтанного бродіння капусти поряд з молочнокислими бактеріями беруть участь й інші мікроорганізми – дріжджі, масляно- та оцтовокислі бактерії, бактерії групи колі. Із них найбільш активно діють *V. brassicae acidii*, *V. brassicae fermentati*, *Sacch. Brassicae fermentati*, які забезпечують високу якість квашеної капусти [12, с. 114].

Мікроорганізми капусти характеризуються великою кількістю бацил, дріжджів, грибів молочнокислих бактерій. Миття капусти зменшує загальну кількість мікроорганізмів в 2 рази, тому капусту перед квашенням не мють, а тільки знімають покривне листя.

Квашена капуста поступово ферментується бактеріями різних видів. У процес ферментації спочатку вступають *Leuconostoc mesenteroides*, потім гетероферментативні бактерії *Lactobacillus brevis* та гомоферментативні *Lactobacillus plantarum* [15, с. 148].

Вуглекислота, що накопичується у перший період бродіння, через 2..3 доби утворюється майже винятково у результаті життєдіяльності *Leuconostoc mesenteroides*, які теж надають запах капусті.

Через 4..6 діб бродіння кокові форми змінюються на гомоферментативні молочнокислі палички (*L. plantarum*), які накопичують 1,5...2% кислоти. *L. plantarum* як субстрат використовують маніт, який утворюється під дією гетероферментативних бактерій *Lactobacillus brevis*, та надає капусті гіркового смаку [15 с. 153; 17 с. 85; 18, с. 346].

Оскільки в сировині присутня епіфітна мікрофлора, яка може негативно вплинути на перший етап

природної ферментації капусти, нами запропоновано проводити короткочасну теплову обробку шаткованої капусти парою впродовж 60..90 с (рис. 1). Після такої обробки закваску чистої культури рівномірно розбризкують на шатковану капусту, яка містить не менше 4,0% розчинних сухих речовин, з яких на першому етапі ферментації піддається 1,8% з утворенням 1,8% молочної кислоти. Така концентрація кислоти пригнічує ріст бактерій.

У разі порушення температурного режиму та анаеробних умов ферментації проявляють активність гідролази – ферменти маслянокислих бактерій, що перетворюють цукри капусти на масляну кислоту, CO_2 , H_2 .

Пектинові речовини під дією пектолізу ферментів із нерозчинної форми переходять у розчинну, що призводить до втрати хрумкої консистенції капусти [6, с. 10]. Їх активність можна зменшити зниженням рН внаслідок утворення молочної кислоти молочнокислими бактеріями.

Температура ферментації значною мірою впливає на процес бродіння і є основним регулятором розвитку певних груп молочнокислих мікроорганізмів, які визначають певну якість готового продукту.

Для стимуляції процесу бродіння в традиційних технологіях використовують $NaCl$ у кількості 2...3%, це призводить до стимуляції плазмолізу клітини і вилучення більшої кількості клітинного соку.

У разі використання керованого процесу ферментації з внесенням чистих культур молочнокислих бактерій концентрацію солі можна знизити до 0,5...2,0%, оскільки поживні речовини, які містяться в капусті, доступні молочнокислим бактеріям зразу на першому етапі ферментації, і утворення 1,8% молочної кислоти пригнічує розвиток небажаної мікрофлори, а зниження рН середовища запобігає розвитку патогенних мікроорганізмів.

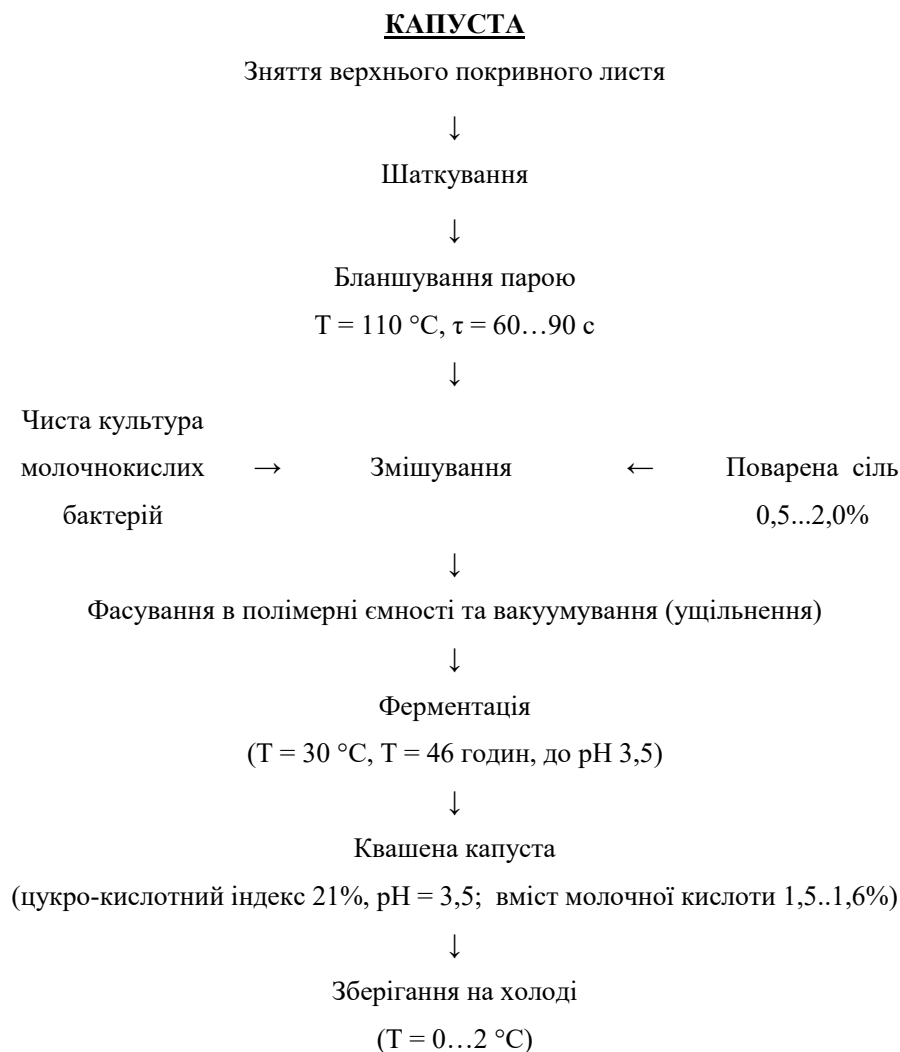


Рис. 1. Технологічна схема квашення капусти з використанням молочнокислих бактерій

У розробці технологічної схеми квашення капусти (рис. 1) в ємностях до 1 дм³ для інтенсифікації соковиділення запропоновано шатковану капусту піддавати короткочасній обробці паром $T = 110^{\circ}\text{C}$, $\tau = 60 \dots 90$ с. Попередня термічна обробка призведе до зниження патогенної мікрофлори свіжої капусти та до збільшення терміну зберігання готового продукту.

Далі оброблену капусту змішували із закваскою чистих гомоферментативних молочнокислих бактерій та повареною сіллю, фасували у поліетиленову мілку тару. Пакети з капустою витримували на стелажах протягом 3 діб за температури 22°C для ферментації.

Після триденної ферментації за рахунок плазмолізу і виділення клітинного соку зменшується об'єм продукту, тому нами запропоновано вакуумування пакетів з капустою до створення тиску 300 Па, це дасть змогу вилучити залишки повітря чи інших газів під час пакування тари з капустою.

Зміни хімічного складу капусти під час ферментації представлено в таблиці 1.

Процес молочнокислого бродіння контролювали за зміною масової частки титрованих кислот у перерахунку на молочну кислоту (рис. 2) та зміною активної кислотності (рН) (рис. 3).

У процесі молочнокислого бродіння гетероферментативними молочнокислими бактеріями *Leuconostoc mesenteroides*, *Lactobacillus brevis*, *L. permentum*, *L. viridescens*, *Bifidobacterium* утворюється, окрім молочної кислоти, етиловий спирт, CO_2 .

Висновки. На підставі теоретичних, аналітичних та експериментальних досліджень розроблена технологія квашеної капусти у дрібній вакуумній упаковці з використанням чистих культур молочнокислих бактерій.

Науково обґрунтовано, що за допомогою удосконаленої технології виробництва квашеної капусти можна уникнути проблем виробництва лактоферментованої продукції, а саме порожевіння, гниття, потемніння, мацерації тканин.

Доведено, що у разі використання керованого процесу ферментації з внесенням чистих культур молочнокислих бактерій концентрацію солі можна

знижити до 0,5...2,0%, оскільки поживні речовини, які містяться в капусті, доступні молочнокислим бактеріям зразу на першому етапі ферментації і утворення 1,8% молочної кислоти пригнічує розвиток небажаної мікрофлори, а зниження рН середовища запобігає розвитку патогенних мікроорганізмів.

Таблиця 1

Зміни хімічного складу капусти під час ферментації

Показники	Капуста, %	
	до ферментації	після ферментації
Масова частка: цукрів	4,6	1,8
пектину	0,2	1,8
клітковини	0,6	0,8
білків	1,7	0,8
золи	0,8	1,4

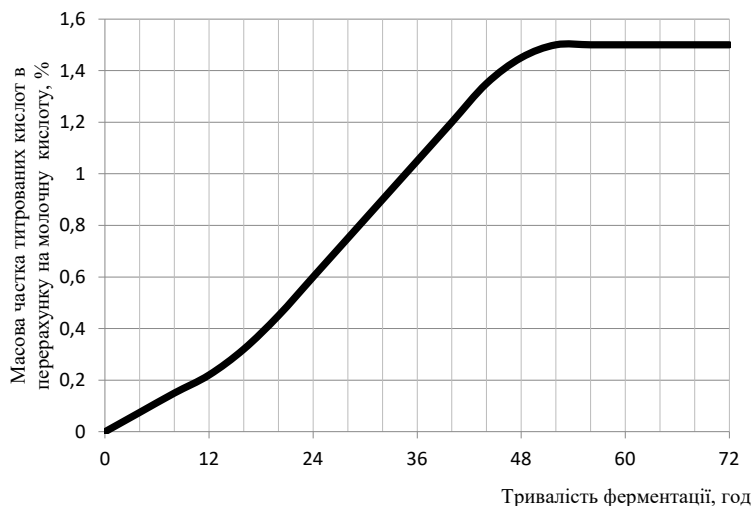


Рис. 2. Вплив тривалості ферментації на масову частку титрованих кислот

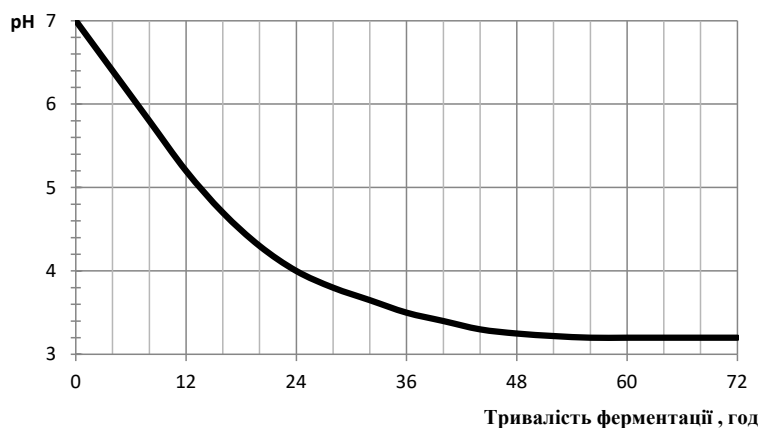


Рис. 3. Зміна рН середовища під час ферментації капусти

Мікробіологічні дослідження показали, що у квашеній капусті, процес ферментації якої проходив у дрібній вакуумній тарі, не відбувається обмінення з навколишнього середовища та не має розвитку плісень та маслянокислих мікроорганізмів.

Культивування білоголової капусти чистою культурою молочнокислих бактерій на початку

ферментації дає змогу отримати готовий продукт з пробіотичними властивостями та низьким вмістом солі.

Перспективами подальших досліджень є розроблення нормативної документації на технологію виробництва квашеної капусти у дрібній вакуумній упаковці; проведення промислової апробації розробленої технології.

Список літератури:

1. Pederson C.S. Sauerkraut. *Advances in Food Researches*, V. 10, Academic Press, New York and London, 1960. 237 p.
2. Fleming H.P. Considerations for the Controlled Fermentation and Storage of Sauerkraut. 1987. Pp. 26–32.
3. Орлов Н.П. Производство, хранение и реализация солено-квашеных овощей и плодов : учебник. Киев : Друк, 1989. 190 с.
4. Покровський А.А. Химический состав пищевых продуктов. Справочные таблицы. Москва. 1979. 279 с.
5. Pederson C.S., Kelly C.D. Accuracy of certain methods in sauerkraut. *Food Research*, Academic Press, New York, 1960. 234 p.
6. Українець А.І. Особливості структури пектину, виділеного з білоголової капусти / А.І. Українець, І.О. Крапивницька, Т.Я. Харітон, Н.Г. Харітон. *Харчова промисловість*. 2011. Вип. 10–11. С. 28–31.
7. Капрельянц Л.В. Біотехнологія у виробництві харчових продуктів. *Харчова та перероб. пром-сть*. 1992. № 8. С. 20.
8. Колешко О.И. Микробиология. Минск : Высшая школа, 1994. 280 с.
9. Weiser H.H. *Practical food microbiology and technology*. Westport : The AVI Publ. Corp., 1962. 350 p.
10. Мюллер Г. Микробиология пищевых продуктов растительного происхождения / Г. Мюллер, П. Литу, Г. Люнх. Пер. с нем. Москва : Пищевая пром-сть, 1977. 342 с.
11. Егорова Н.С. Промышленная микробиология. Москва : Высшая школа, 1989. 686 с.
12. Квасников Е.Л. Молочнокислые бактерии и пути их использования / Е.Л. Квасников, О.А. Нестеренко. Москва : Наука, 1975. 384 с.
13. Флауменбаум Б.Л. Технологія консервування плодів, овочів, м'яса і риби / За ред. Б.Л. Флауменбаума. Київ : Вища шк., 1995. 301 с.
14. Флауменбаум Б.Л. Фізико-хімічні і біологічні основи консервного виробництва / Б.Л. Флауменбаум, А.Т. Безусов, В.М. Сторожук, Г.П. Хомич. Одеса : Друк, 2006. 400 с.
15. Hutkins R.W. *Microbiology and technology of fermented foods*. 1st edition. IFT Press Blackwell Publishing, 2006. 473 p.
16. Абдрахманова Р.Н. Стартовые культуры микроорганизмов в технологии производства мясопродуктов / Р.Н. Абдрахманова, Т.Н. Зайцева. *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2012. № 1(30). С. 71–73
17. Джей Дж.М. Современная пищевая микробиология / Дж.М. Джей, М.Дж. Лёсснер, Д.А. Гольден. 7-е изд.; пер. с англ. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017. 886 с.
18. Емцев В.Т. Микробиология : учебник для бакалавров / В.Т. Емцев, Е.Т. Мишустин. 8-е изд., испр. и доп. Москва : Юрайт, 2012. 445 с.
19. ДСТУ 3583:2015 Сіль кухонна. Загальні технічні умови.
20. ДСТУ 7037:2009 Капуста білоголова свіжа. Технічні умови.

Bezusov A.T., Palvashova H.I., Dotsenko N.V., Afanasieva T.M.

USE OF LACTIC ACID BACTERIA IN THE PRODUCTION OF SAUERKRAUT

The paper analyzes the problems that accompany the production of sauerkraut by traditional technology, such as uncontrolled fermentation process in large containers, the inability to control the temperature of the relevant anaerobic conditions, re-contamination of the finished product, which is not safe for consumers. In addition, fermented cabbage must be packaged in consumer packaging. Additional packing operations and time on them cause oxidation of cabbage with air oxygen, reduction of vitamin C and secondary contamination from the air.

*In order to avoid all the negative aspects associated with uncontrolled fermentation of cabbage, a new method is proposed, which consists in the use of homofermentative lactic acid bacteria *Lactobacillus**

plantarum, etc., which will control the fermentation process of cabbage and get the final high quality product with appropriate organoleptic and physico-chemical parameters.

The use of pure cultures of lactic acid bacteria in the production of sauerkraut and the choice of the strain of pure cultures of homofermentative lactic acid bacteria are substantiated.

It is proved that the use of pure crops in the fermentation of vegetables accelerates the process of acid formation and this is so significant that makes it desirable to use pure crops as one of the regulatory factors.

The quality of sauerkraut at the end of its fermentation at optimal temperatures (21... 24 °C) improves if pure cultures are used and when the finished product is stored at low temperatures 0... 2 °C. If the cabbage is stored in refrigerated rooms where the temperature is above 2 °C, the effect of quality improvement achieved during fermentation is lost during storage, and the use of pure crops, in the end, does not give positive results.

Given that the fermentation temperature significantly affects the fermentation process and is the main regulator of the development of certain groups of lactic acid microorganisms that determine a certain quality of the finished product, it was found that in violation of temperature and anaerobic fermentation conditions show hydrolase activity – butyric acid bacteria that convert cabbage sugars into butyric acid, CO₂, H₂.

The influence of fermentation duration on the change of titrated acids content is investigated in the work. It is shown that when using a controlled fermentation process with the introduction of pure cultures of lactic acid bacteria, the salt concentration can be reduced to 0.5...2.0% compared to the existing traditional method, where it is 2...3%, because the nutrients contained in cabbage is available to lactic acid bacteria immediately at the first stage of fermentation and the formation of 1.8% lactic acid inhibits the development of unwanted microflora, and lowering the pH of the environment prevents the development of pathogenic microorganisms.

As fermented products are sources of probiotic cultures of lactic acid microorganisms, during the fermentation process cabbage is enriched with its own biologically active substances – vitamins, enzymes, organic acids and others, which in combination with probiotic microorganisms make it possible to obtain a fermented product for functional and health purposes.

Based on experimental studies, it has been proven that the cultivation of white cabbage by pure culture of lactic acid bacteria at the beginning of fermentation allows to obtain a finished product with probiotic properties and low salt content.

Scientifically substantiated technology of cabbage fermentation in polymer small container with vacuum has been developed. When developing the technological scheme of cabbage fermentation in containers up to 1 dm³ for intensification of juicing, it is proposed to subject shredded cabbage to short-term steam treatment $T = 110\text{ °C}$, $\tau = 60\text{...}90\text{ s}$. It is proved experimentally that preliminary heat treatment will lead to a decrease in the pathogenic microflora of fresh cabbage and to an increase in the shelf life of the finished product.

Organoleptic, physicochemical and microbiological indicators of the quality of the finished product are determined. Microbiological studies have shown that lactic acid bacteria and yeast develop in the finished product obtained by advanced technology, undesirable microflora in the form of molds was not detected, and molds were detected in the finished product obtained by traditional technology. It is established that the number of lactic acid bacteria in the product made by advanced technology provides the accumulation of the required amount of lactic acid from 0,7 to 1,8%. It was determined that in sauerkraut by traditional technology found CFU – 2×10^6 lactic acid bacteria per 1 g, in sauerkraut with the introduction of strains of pure lactic acid bacteria CFU is 4×10^9 .

It is proposed to pack the finished sauerkraut in a polymer shallow container with a capacity of up to 1 dm³ with vacuum to create a pressure of 300 PA, which will allow remove residues of air or other gases during packaging of cabbage and extend both the shelf life of the finished product and prevent the oxidation of biologically active substances.

Key words: *homofermentative lactic acid bacteria, pure culture, sauerkraut, probiotic products, polymer packaging, vacuuming.*

Воєвода Н.В.

Херсонський державний аграрно-економічний університет

Легутенко А.С.

Херсонський державний аграрно-економічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ІКРИ ОЗДОРОВЧОГО СПРЯМУВАННЯ З ГАРБУЗОМ

Стаття присвячена важливому питанню розширення асортименту консервної продукції оздоровчого спрямування в умовах ТОВ «Плодоовочевий комбінат «Херсон» (м. Херсон). У зв'язку з високою харчовою цінністю та позитивним впливом на шлунково-кишковий тракт людини наведена етапність виробництва овочевої ікри з модифікованим складом. Він базується на таких компонентах, як баклажани, гарбуз та чорнослив, які відомі високим вмістом нутрієнтів та зазначені у рецептурі. Таким чином, для сегменту споживачів, що мають захворювання шлунково-кишкового тракту та печінки, стає можливим споживання закусочних консервів. Для їх збереження пропонується замінити класичний процес обжарювання компонентів рецептури згідно з ДСТУ 3797-98 «Консерви. Ікра овочева. Технічні умови» на бланшування, що дає змогу не тільки позбавитись природної гіркоти баклажан, а й зменшити енергетичну цінність готової продукції. Опис технологічного процесу виробництва включає наведені параметри переробки продукції на різних етапах вироблення консервів. Як результат досліджень стаття містить узагальнену технологічну схему виробництва овочевої ікри оздоровчого спрямування в умовах ТОВ «Плодоовочевий комбінат «Херсон» (м. Херсон). При цьому зазначено, що некондиційна сировина та відходи виробництва транспортуються за територію цеху в спеціальних контейнерах, які передаються іншим юридичним особам для подальшої переробки, тому виключений негативний вплив на навколишнє природне середовище внаслідок нераціональної їх утилізації.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розрахунком харчової цінності, визначення етапності організації забезпечення та контролю якості консервів, що включає виділення контрольних точок у відповідності до системи аналізу ризиків, небезпечних чинників і контролю критичних точок НАССР, а також виробництвом пробної партії у виробничих умовах.

Ключові слова: закусочні консерви, овочева ікра, оздоровче харчування, технологічна схема, модифікований склад, технологічні параметри.

Постановка проблеми. Овочеві закусочні консерви відіграють велику роль у харчуванні людини, проте полікомпонентна система рецептурного складу передбачає специфічну підготовку кожного складника, зокрема смаження, для досягнення специфічних органолептичних показників та термічної усадки сировини. Однак ця методика позначається негативно на шлунково-кишковому тракті споживача з урахуванням регулярного споживання, а корисне харчування має стійку тенденцію до збільшення обертів. Тому запропоновані консерви оздоровчого харчування, а саме баклажанної ікри з модифікованим складом [1], є альтернативою класичним консервам. Таким чином, необхідно скласти технологічну схему виробництва такої продукції в умовах ТОВ «Плодоовочевий комбінат «Херсон» (м. Херсон), що забезпечить не тільки розширення асортименту консервів підприємства, а й стабіль-

ний розвиток харчової промисловості та економіки регіону загалом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема покращення харчування спонукала до інноваційних досліджень багатьох учених, зокрема М.Я. Бомба та С.Ю. Колодій оцінювали можливість адаптації калорійних традиційних вітчизняних страв до вимог дієтичного харчування у зв'язку з погіршенням стану здоров'я населення [2]. Відзначимо, що В.С. Іванченков та З.В. Чехович [3] розглядали питання популяризації здорового харчування крізь призму інновацій та стабільного економічного розвитку підприємств Півдня України. Зазначимо, що розробкою овочевої ікри підвищеної харчової цінності, до рецептури якої було введено нетрадиційну сировину – пюре з шипшини, пряно-ароматичну сировину – імбир та рапсову олію, займались Н.В. Дуденко та В.С. Ольховська [4].

Проте її основною сировиною є кабачки, які піддаються термічній обробці шляхом обжарювання. На нашу думку, перспективним напрямом є не тільки модифікація рецептурного складу, а й заміна традиційних технологічних процесів.

Постановка завдання. Мета публікації – скласти технологічну схему виробництва овочевої ікри з баклажанів оздоровчого спрямування з деякими оптимальними технологічними параметрами переробки сировини.

Виклад основного матеріалу дослідження. Продукт оздоровчого харчування – продукт, як правило, з фортифікованим вмістом певних дефіцитних нутрієнтів, що забезпечує його позитивний вплив на здоров'я людини. Склад таких харчових продуктів повинен значною мірою відрізнятися від складу звичайних продуктів подібного роду, якщо такі звичайні харчові продукти існують, але не можуть бути заміниками лікарських засобів [5].

Натепер сегмент ринку з виробництва харчових продуктів постійно збільшується, проте він включає здебільшого кондитерські вироби, готові снеданки та молочні продукти із застосуванням інноваційних компонентів, які рідко включаються до харчового раціону. Розширити цей сегмент можна за рахунок виготовлення у промислових умовах консервів, які до цього часу мали високу калорійність та були шкідливими у разі деяких порушень організму людини [6; 7]. Тому постає необхідність знайти рішення у використанні нетрадиційної сировини у складі рецептури класичних закусочних консервів та зробити їх доступними для всіх бажаючих. Отже, проаналізуємо технологічні операції, які пропонуємо проводити під час виробництва овочевої ікри з гарбузом.

Сировину подають на лінію первинної переробки в порядку надходження її на підприємство з урахуванням якісного стану кожної партії. Для підготовки овочів сировина у контейнерах направляється на конейнероперекидач, який подає їх на виробничу лінію і дає змогу очищати від сторонніх домішок.

Баклажани перед початком переробки сортують, а потім ретельно миють у мийній машині з пристроєм для попередньої мийки і ополіскують під душем у цій же машині. Наступним етапом інспектують сировину і потім знову ополіскують під душем за тиску води 2–3 кгс/см² (200–300 кПа), після чого направляють на нарізання.

Після цього вносимо пропозицію замінити технологічну стадію обжарювання згідно з ДСТУ 3797-98 «Консерви. Ікра овочева. Технічні умови»

[8] на бланшування парою, внаслідок чого збільшиться поживна цінність та зменшиться енергетична цінність продукту. До того ж, окрім позитивного впливу на шлунково-кишковий тракт як комфортного травлення базовими компонентами ікри, він підсилюється включенням у склад чорносливу, який додатково чинить позитивний вплив на органолептичні показники ікри [1]. У технологічному сенсі бланшування дає змогу позбавитись природної гіркоти продукту та виключити появу темних цяточок у готовій продукції (дефект, що виникає у разі підгоряння шкірки під час обжарювання), а після цього баклажани подрібнюють на протиральній машині з отворами решіток діаметром 10 і 3,5 мм.

Плоди гарбуза, призначені для приготування ікри, попередньо сортують. Мета сортування полягає в тому, щоб видалити не придатні для виробництва плоди. Після сортування гарбуз миють. Під час миття гарбуз звільняється від бруду. Після мийки гарбуз ошпарюють, при цьому він розм'якшується за рахунок розпаду протопектину. Під час водяного ошпарювання гарбуз занурюють у киплячу воду на 7–10 хвилин, внаслідок чого знижується і бактеріальна забрудненість гарбузової маси. Потім воду зливають, а гарбуз протирають. Вода, що залишилася, містить розчинні речовини, частково витягнуті з гарбуза, тому вона додається в протерту масу. Ошпарений гарбуз протирають. Для протирання використовують сітки з діаметром отворів 1,5–2,0 мм [9].

Моркву сортують за якістю, відбирають дефектні коріння, калібрують за довжиною та діаметром. Миють коріння в послідовно встановлених мийних машинах: барабанній і уніфікованій до повного видалення всіх забруднень. У разі значних забруднень коренеплодів їх попередньо замочують у ванні з чистою проточною водою. Якість миття систематично контролюється. Коренеплоди повинні бути повністю відмиті від залишків землі та інших забруднень, які є джерелами попадання в продукт спор мікроорганізмів. Після миття у коренеплодів обрізають залишки бадилля з частиною коренеплоду (по лінії зеленої грані) і тонку частину кореневища. Всі корені товщиною менше 5 мм (як основні, так і бокові) повинні бути видалені, видаляють також усі пошкоджені місця. Обрізають коріння на машинах або вручну на конвеєрі. Очищення моркви проводять механічним способом. Очищені коренеплоди піддають ретельному миттю. У разі неповного зняття шкірки проводять доочищення вручну й ополіскування [10].

Чорнослив інспектують, замочують у теплій (40–45 °С) воді впродовж 30 хв., потім промивають у проточній воді до повного видалення піску та інших забруднень. Набухання під час замочування повинне бути у середньому в межах 111–115%, після чого проводять подрібнення.

Вміст нікотинової і пантотенової кислот дає змогу назвати чорнослив хорошим засобом для лікування захворювань шлунково-кишкового тракту. Регулярне вживання сухофрукта сприяє поліпшенню стану у разі підвищеного тонуся судин, слабкості у м'язах, у разі кишкової непрохідності. Що стосується чорносливу, як і інші сухофрукти, він має послаблюючу дію. У невеликих кількостях містить відомі антиоксиданти вітамін Е та аскорбінову кислоту. Вони дають організму силу та енергію, борються з онкологічними захворюваннями та підвищують імунітет.

Послаблююча дія цього сухофрукта зумовлена наявністю в ньому великої кількості калію, який є відмінним засобом для лікування деяких захворювань кишечника. Калій також корисний у разі захворювань серцево-судинної системи. Окрім цього, він містить фосфор, магній і кальцій, а вони корисні для зубів і кісток [11].

Зелень передбачено після приймання сортувати, після чого мити душовим методом. Миту свіжу сировину інспектують за якістю та подрібнюють шляхом нарізання.

Цибуля подається на землевідділювач, після чого потрапляє в машину для комплексної очистки та обрізання шийок та мочок у цибулин. Далі вона направляється на бланшування у киплячій воді у цілому вигляді протягом 3–5 хв. [12].

Рослинну олію проколюють у варочному котлі, яку після охолодження через отвір для зливу збирають у спеціальні ємності.

Томат-пюре протирається на протирочній машині, збирається та обігривається у збірнику; якщо необхідно, то розбавляється там водою і також передається насосом-дозатором у змішувач.

Білі корені після ретельного миття у мийних машинах ретельно очищуються та бланшуються. Після бланшування надходять у змішувач компонентів за рецептурою.

Сіль та прянощі просіюють та проводять магнітну сепарацію.

Компоненти рецептури ретельно змішують у спеціальному апараті з двостінною нагрівальною камерою до повного розчинення солі і цукру

й отримання однорідної маси. Після цього відбувається протирання маси у протирочній машині із ситами, отвори яких мають діаметр 1,2 мм. Зазначимо, що продукт після такого впливу має більш пастоподібну консистенцію. Готову ікру за допомогою шнекового транспортера фасують у тару за температури маси 70–80 °С на автоматичному наповнювачі у склобанки I-82-500. Не допускається розривів між закупорюванням і стерилізацією понад 30 хв. Банки негайно укупорюють на укупорювальній машині, вони потрапляють на накопичувач банок, після чого їх передають на стерилізацію у вертикальних автоклавах. Температура стерилізації продукції становить 120–130 °С. Рецепт ікри з баклажанів та гарбуза наведена у табл. 1.

Таблиця 1

Рецептура запропонованої ікри з баклажанів та гарбуза

Компонент	Норма витрат на 1 кг ікри, г.
Баклажани	687
Гарбуз	630
Морква	55
Білі корені	27
Цибуля свіжа	82
Чорнослив	92
Зелень	5
Сіль	15
Цукор	7
Перець чорний молотий	0,5
Перець запашний молотий	0,5
Томат-пюре із вмістом СР 12%	187
Олія	32

Склотара з цехового складу надходить на обполіскування у теплій воді за 35–40 °С і обробку парою на ополіскувальній машині і шпарці. *Кришки* СКО перед закупорюванням піддають шпарці в ємності з водою, куди подається пар. Підготовлені банки конвеєром подають на фасування.

Некондиційна сировина та відходи виробництва транспортуються за територію цеху в спеціальних контейнерах, які передаються іншим юридичним особам для подальшої переробки.

Як результат складено узагальнену технологічну схему виробництва овочевої ікри з модифікованим складом оздоровчого спрямування (рис. 1).

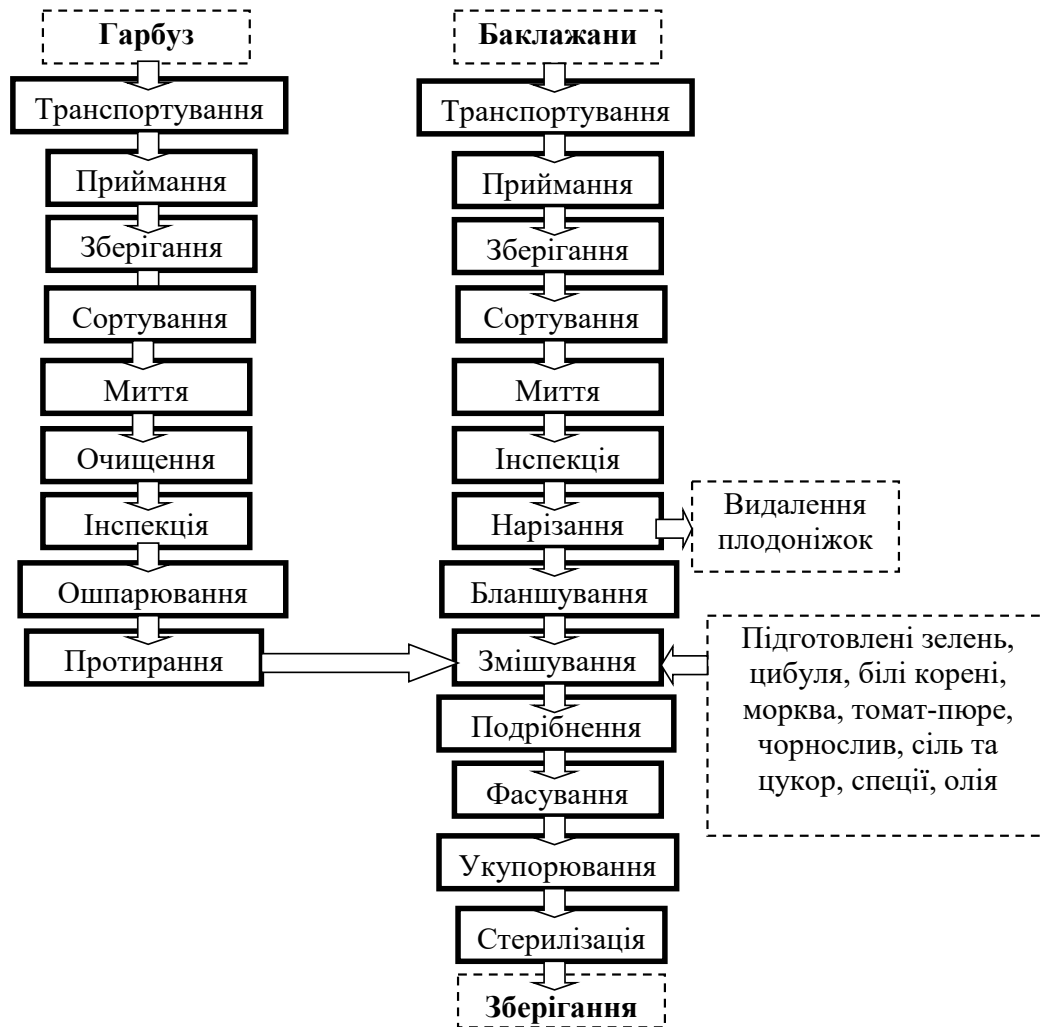


Рис. 1. Технологічна схема виробництва овочевої ікри оздоровчого спрямування

Стандартом передбачається вміст сухих речовин в ікрі з баклажанів – не менше 24%; вміст солі – 1,2–1,6%. Титрована кислотність у розрахунку на яблучну кислоту в ікрі з баклажанів – не більше 0,5% [13].

Таким чином, полікомпонентний склад закусочних консервів дає змогу отримати цікавий за органолептичними показниками продукт, проте варто зазначити, що трудомісткий технологічний процес мусить проводитись без простою, адже саме цей фактор матиме вирішальну роль у разі накопичення патогенної мікрофлори.

Висновки. У результаті проведених досліджень складена узагальнена технологічна схема виробництва закусочних консервів, а саме овочевої ікри модифікованого складу. Зміна класичних компонентів дає змогу отримати новий за органолептичними показниками продукт, який не шкодить здоров'ю споживачів та може

використовуватись у харчуванні осіб, що мають порушення функціонування шлунково-кишкового тракту та печінки. Це припущення базується на обґрунтованій з технологічної точки зору заміні класичного обжарювання сировини у паромасляній печі або печі Крапівіна на бланшування парою та водою. При цьому приємний присмак та післясмак готовій продукції надаватиме чорнослив.

Подальші дослідження пов'язані з розрахунком харчової цінності продукту, визначення етапності організації забезпечення та контролю якості консервів, які висвітлені у загальній схемі хіміко-технологічного та мікробіологічного контролю продукції та включає виділення контрольних точок у відповідності до системи аналізу ризиків, небезпечних чинників і контролю критичних точок НАССР, а також виробництвом пробної партії у виробничих умовах.

Список літератури:

1. Воевода Н.В. Перспективи застосування гарбуза у промисловому виробництві овочевої ікри. *Актуальні проблеми підвищення якості та безпека виробництва й переробки продукції тваринництва* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Дніпро, 14 лютого 2020 р. Дніпро, 2020. С. 338–339.
2. Бомба М.Я., Колодій С.Ю. Адаптація українських національних страв до сучасних вимог харчування. *Новітні тенденції у харчових технологіях та якість і безпечність*. 2015. С. 127.
3. Іванченков В.С., Чехович З.В. Перспективи інноваційного розвитку консервного виробництва в Українському Причорномор'ї. *Економічні інновації*. 2015. № 60 (1). С. 154–171.
4. Дуденко Н.В., Ольховська В.С. Математичне моделювання овочевих консервів із заданими споживчими властивостями. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. 2013. № 1 (977). С. 116–122.
5. Євлаш В.В., Серік М.Л., Горбань В.Г., Мурликіна Н.В. Опорний конспект лекцій з дисципліни «Інноваційні технології дієтичних харчових продуктів» для студентів освітнього ступеня магістр спеціальності 181 «Харчові технології» освітньо-професійної програми. Харків : ХДУХТ. 2019. 79 с. URL: http://elib.hduht.edu.ua/bitstream/123456789/5203/1/2019.1_поз.50.pdf.
6. Мімахіна М., Науменко Н. Інновації у харчових технологіях. *Товари і ринки*. 2015, № 1. С. 189–201.
7. Шкода і користь консервів: на що слід звертати увагу під час покупки. URL: <https://vbusk.com/cikavo/shkoda-i-koryst-konserviv-na-shcho-slid-zvertaty-uvahu-pry-pokuptsi.html> (дата звернення: 30.01.2020).
8. ДСТУ 3797-98. Консерви. Ікра овочева. (Чинний від 2000-01-01). Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2000. 14 с.
9. Использование пюре из тыквы в пищевой промышленности. URL: <https://n-wrc.ru/blog/ispolzovanie-pjure-iz-tykvu-v-pishhevoj-promyshlennosti/> (дата звернення: 20.07.2020).
10. Ікра овочна. Технологічна схема. URL: <http://prodkonslab.ru/technologicheskie-sxemy/ikra-ovoshhnaya.html> (дата звернення: 30.01.2020).
11. Користь та шкода чорносливу для людського організму. URL: <https://www.yizhainfo.pp.ua/korist-ta-shkoda-chornoslivu-dlya-lyudskogo-organizmu/> (дата звернення: 19.07.2020).
12. Особенности отдельных видов овощных консервов. URL: <http://www.comodity.ru/ovoshkonserv/kinds/3.html> (дата звернення: 22.07.2020).
13. Назарова А.И., Фан-Юнг А.Ф. Технология плодоовощных консервов. Москва : Легкая и пищевая промышленность. 1981. 239 с.

Voievoda N.V., Legutenko A.S. OPTIMIZATION OF PRODUCTION TECHNOLOGY OF HEALTH ORIENTATION CAVIAR WITH PUMPKIN

The article is devoted to the important issue of expanding the range of canning products for health purposes in the conditions of Ltd. "Fruit and vegetable factory "Kherson" (Kherson). Due to the high nutritional value and positive impact on the human gastrointestinal tract, the stages of production of vegetable caviar with a modified composition are given. It is based on ingredients such as eggplant, pumpkin and prunes, which are known to be high in nutrients and specified in the recipe. Thus, for the segment of consumers with diseases of the gastrointestinal tract and liver, it becomes possible to consume canned. To preserve them, it is proposed to replace the classic process of frying the components of the recipe in accordance with DSTU 3797-98 "Canned food. Vegetable caviar. Technical conditions" for blanching, which allows not only to get rid of the natural bitterness of eggplant, but also to reduce the energy value of finished products. The description of the technological process of production includes the given parameters of processing of products at different stages of production of canned food. As a result of researches, the article contains the generalized technological scheme of production of vegetable caviar of improving direction in the conditions of Ltd. "Fruit and vegetable factory "Kherson" (Kherson). It is noted that substandard raw materials and production waste are transported outside the shop in special containers, which are transferred to other legal entities for further processing, so the negative impact on the environment due to their irrational disposal is excluded.

Prospects for further research are related to the calculation of nutritional value, determining the stages of organization of quality assurance and quality control, which includes the selection of control points in accordance with the system of risk analysis, hazards and control of critical points HACCP, as well as trial production in production conditions.

Key words: *canned snacks, vegetable caviar, health food, technological scheme, modified composition, technological parameters.*

УДК 664

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/31>**Чижевська Л.А.**

Національний університет харчових технологій

Польовик В.В.

Національний університет харчових технологій

Корецька І.Л.

Національний університет харчових технологій

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СУПІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

У статті проаналізовано попит і стан перших страв та обґрунтовано необхідність розширення асортименту групи перших страв крем-супів шляхом удосконалення традиційної рецептури. Визначено роль правильного харчування – розробка збалансованої страви і дотримання режиму харчування. Проведено аналіз кожного інгредієнта та його технологічний вплив на технологічний процес приготування перших страв. Науково обґрунтовано та доведено позитивний вплив застосування внесених молочних інгредієнтів у рецептури інноваційних крем-супів. Ці компоненти мають суттєвий вплив на фізико-хімічні показники та технологічні системи, беруть участь у забезпеченні загального флєвору страви, і, будучи носієм незамінних амінокислот, мають нутрієнтний склад, що поліпшує загальну користь виробу порівняно з аналогом. Визначення впливу молочної складової частини проводили, використовуючи модельні дослідження. За результатами проведених досліджень встановлено оптимальне співвідношення вхідних інгредієнтів (пошехонський сир, плавлений сир та бринза) в інноваційній технології кре-супів. Розроблена схема виробництва крем-суп із гарбуза з додаванням різних видів сирів. Для максимального збереження корисних властивостей сирів у готовій страві запропоновано деякі види сирів не піддавати термічній обробці. Такий технологічний прийом дає змогу отримати вдосконалену страву підвищеної харчової цінності та забезпечити її збагачення незамінними нутрієнтами. На отримані модельні структури проведено комплексне оцінювання та складено профілограми якості і визначено критерії якості. Наведено результати органолептичних показників, порівняння енергетичної цінності розроблених зразків крем-супу з гарбуза та добової забезпеченості основних нутрієнтів.

Ключові слова: крем-суп, молочний складник, харчова і енергетична цінність, органолептична оцінка.

Постановка проблеми. Серед різних зовнішніх факторів, які впливають на організм людини, харчування є одним із найважливіших. Правильно організоване харчування забезпечує нормальний плин процесів росту й розвитку організму, збереження здоров'я і працездатності людини. Розвиток кулінарної майстерності пов'язаний із традиціями побуту, культури і звичаями населення. Своєрідність української національної кухні виражається в переважному використанні таких продуктів, як свинина, сало, шпик, свинячий топлений жир, олія, пшеничне борошно, гриби, буряки, квасоля, гарбуз [1–4].

Життя людини так влаштоване, що вона відчуває об'єктивну потребу в харчуванні з моменту народження. Адже фундаментальною основою життєдіяльності людини є енергія, джерелом якої є речовини, які надходять з їжею. Відігравати роль правильного харчування їжа сама по собі не може. Правильне

харчування – це збалансована їжа і режим харчування. У природі не існує продуктів, які містили б усе необхідне для людини. Тому тільки комбінація різних продуктів у щоденному раціоні забезпечує організм найбільшою кількістю потрібних речовин, в основному це стосується вітамінів і мікроелементів. Процес їх засвоєння та обміну істотно залежить від присутності інших компонентів. Для того, щоб раціонально використовувати корисні властивості продуктів, необхідно знати їх хімічний склад, спеціальні прийоми технологічної обробки, правильно складати раціон і дотримуватися сприятливого для здоров'я режиму харчування.

Сучасна наука про харчування дійшла висновку, що вкрай необхідними для нормального функціонування нашого організму є перші страви. Вони важливі для раціонального харчування, забезпечують тіло теплом і енергією, допомагають

активізувати обмін речовин і кровообіг. Перші страви мають величезний вплив на відновлення водно-сольового балансу організму, що необхідно для контролю над артеріальним тиском. Суп містить багато мінеральних речовин і вітамінів.

Важливим аспектом оцінки меню є оцінка харчової цінності запропонованих страв. Згідно з рекомендаціями ВООЗ оптимальне співвідношення маси основних нутрієнтів має бути: Б:Ж:В для звичайних умов становить 1:1:4, а співвідношення Са: Mg: P становить 1:0,5:1,5 [2].

Нині більшість науковців погоджуються, що вплив харчування на здоров'я та життєдіяльність людини подвійний. З одного боку, харчування є одним з основних важелів, який, створюючи гармонію організму людини і навколишнього середовища, сприяє певним чином здоров'ю та здатності організму протидіяти впливу несприятливих факторів. З іншого боку, неправильне харчування впливає на розвиток організму, знижує його захисні сили, може бути причиною багатьох хвороб.

Індустрія громадського харчування в Україні нині перебуває на стадії розвитку – зростають як кількість закладів, так і якість обслуговування.

Ефективність діяльності будь-якого підприємства ресторанного господарства залежить від багатьох факторів, що забезпечить високу лояльність споживачів, визначення чітких стратегічних перспектив розвитку діяльності, проведення оптимальної фінансової та маркетингової діяльності. У закладах ресторанного господарства дуже популярні перші страви [5].

Перші страви збуджують апетит, підвищують секрецію залоз органів травлення. Секрецію травних залоз підвищують екстрактивні речовини рідкої основи перших страв (бульйонів, відварів), органічні кислоти (томатів, квашеної капусти, квасів, солоних огірків, сметани та ін.), смакові ароматичні речовини (цибулі, моркви, білого коріння), прянощі та приправи.

Перші страви є важливим джерелом мінеральних і біологічно активних речовин (вітамінів, мікроелементів). Вони містять велику кількість рідини і покривають потребу організму у воді на 15–25% [3].

Своїм походженням супи-пюре зобов'язані французькій кухні, у деяких кулінарних книгах їх такі називають – «французькими» [4].

Пюреподібні супи є однорідною протертою масою з консистенцією густих вершків. Завдяки цьому супи-пюре набули найбільшого поширення в дитячому, дієтичному і лікувальному хар-

чуванні, коли необхідно забезпечити механічне щадіння шлунково-кишкового тракту.

Наукові дослідження у сфері організації раціонального харчування останнім часом призвели до зміни поглядів щодо приготування та подавання різноманітних страв, зумовили підвищення їх спрямованості на збереження харчової цінності та корисності продуктів. Це своєю чергою сприяло інтенсифікації розвитку громадського харчування як невід'ємної частини народного господарства.

Через демографічні особливості, специфіку культури харчування особливим попитом серед нашого населення в закладах громадського харчування користуються гарячі, перші страви з використанням молочного складника, а тому визначення особливостей технологічного процесу їх приготування та подавання видається нині актуальним.

Для розширення асортименту перших страв, зокрема супів-пюре, потрібно додавати до їх складу продукти, які підвищують відсоток засвоюваності, харчову цінність, вітамінів і мінеральних речовин. Нами запропоновано до крем-супу додавати молочний складник, зокрема різні види сиру. Додаючи сир, можна збільшити енергетичну цінність, підвищити вміст білків та жирів і знизити вміст вуглеводів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі аналізу асортименту вивчають рецептури та технології цієї групи страв, а саме різновиди крем-супів.

Перші страви популярні серед населення країни. А особливо відома така група перших страв, як крем-супи, за своєю однорідною, кремopodobною, легкою текстурою, ніжним, легким, молочно-вершковим смаком та ароматом. Окрім того, перші страви збуджують апетит, підвищують секрецію залоз органів травлення, тому їх використовують у лікувальному, дитячому і дієтичному харчуванні [2].

Проаналізувавши останні дослідження і публікацій щодо супів-пюре, а саме «Крем-суп із гарбуза», було зроблено висновки стосовно постійного розширення асортименту такими інгредієнтами, як шрот насіння вівса, імбир, мед, кокосове молоко, використання порошку морської водорості ламінарії, різноманітні добавки рослинного походження [6–8; 10].

З огляду на вищенаведені інформаційні фактори було зроблено висновок, що цей вид страви буде доцільно удосконалити шляхом додавання до крем-супу молочного складника, а саме сичужних видів сирів.

Постановка завдання. Метою статті є науково-практичне обґрунтування та вдосконалення технологій перших страв на рослинній сировині з використанням молочного складника.

Статистичну обробку даних проводили методами дисперсійного та кореляційного аналізів із використанням комп'ютерних програм «MS Office Excel 2010» та President's Young Professionals Program (PYPP) of Liberia -2019. Аналіз профілограм проводили за рекомендаціями І.Л. Корецької [9].

Виклад основного матеріалу дослідження. Найбільш популярні супи-пюре з чинного Збірника рецептур зібрані з технологій протертих супів, відомих у міжнародній кулінарній практиці як «біски», «супи велюте», «супи-креми». Технологія приготування кожного з перерахованих вище видів має особливості.

Супи-пюре готують із різних видів сировини: овочів, бобових, дичини. Піддані тепловій обробці й протерті продукти розводять бульйоном або молоком і заправляють вершковим маслом. Особливістю супів-пюре є те, що вони становлять однорідну масу без густого осаду.

Аналіз літератури, яка висвітлює технологію приготування крем-супів, свідчить, що досліджена можливість використання сичугових сирів для приготування крем-супів у ресторанному господарстві. Вивчення того, яку користь приносять перші страви в харчуванні, та детальний аналіз рецептури, харчової та енергетичної цінності виявили малий вміст білків та великий вміст вуглеводів у страві.

Щоб збалансувати ці показники, ми запропонували збагатити страву молочним складником, використовуючи сичужні сири. Це дасть змогу не

тільки збільшити вміст білків та зменшити вміст вуглеводів, а ще й підвищити енергетичну цінність та збільшити вміст жиру, збагатити страву деякими мінеральними речовинами та вітамінами. Проаналізувавши показники якості сирів (органолептичні, мікробіологічні, фізико-хімічні, хімічний склад та фізіологічні), ми дійшли висновку, що доцільно буде збагатити страву «Крем-суп із гарбуза» за рахунок: бринзи, плавленого сиру «До обіду» та пошехонського сиру.

У процесі розробки нової технології як основну сировину ми використовували мускатний сорт гарбуз, а саме «Хоккайдо». Додавали до рецептури або бринзу, або плавлений, або пошехонський сир зі збереженням маси виходу готової страви на одну порцію. Для досягнення високих органолептичних показників ми, додаючи сири, зменшували, в першу чергу, кількість вершків, грінок пшеничних, а потім молока та гарбуза.

У результаті проведених досліджень: хімічного складу продуктів (поживні речовини, які постають енергією і необхідні поживні речовини), фізико-хімічні показники готової страви, мікробіологічні показники для даної страви та органолептичний контроль якості готової продукції.

Ці компоненти дали змогу поліпшити консистенцію, смак і колір крем-супу, зробити його більш привабливими, ароматним та корисним.

Харчову та енергетичну цінність розраховано для дорослого населення (група II – жінки вікової групи 18–29 років) за стандартною методикою [11]. Розрахунок харчової цінності контрольного зразку та нових технологій приготування страви «Крем-супу із гарбуза» зазначено в таблиці 2.

Таблиця 1

Аналіз рецептурного складу контрольного зразку супу-пюре

Назва продуктів	Кількість сировини на 1000 г (4 порції) продукції, г		Вміст, %	Рецептурні компоненти основні		Роль у технологічному процесі
	Брутто	Нето		За функціональним призначенням	За вмістом	
Молоко	400	400	100	Білковий, джерело казеїну, вітамінів	Основний компонент	Основна сировина, для приготування страви
Гарбуз	571	400	16	Вітамінний	Основний компонент	Основна сировина, для приготування страви
Масло вершкове	20	20	100	Жировий	Додатковий компонент	Надає молочний присмак страві
Вершки	50	50	100	Білковий	Допоміжний компонент	Формування виробу
Грінки пшеничні	10	10	100	Вуглеводний	Смаковий компонент	Надає страві смакові властивості та ситність.

Власна розробка авторів

Таблиця 2

Визначення харчової та енергетичної цінності нових крем-супів (на порцію – 250 г)

Показники	Основні нутрієнти			
	Білки, г	Жири, г	Вуглеводи, г	Енергетична цінність, ккал
Контрольний зразок	10,31	15,66	42,0	346,9
Крем-суп із гарбуза з бринзою	13,07	17,38	37,95	358,7
Крем-суп із гарбуза з плавленим сиром	13,59	17,36	38,45	360,9
Крем-суп із гарбуза з пошехонським сиром	14,69	18,66	37,95	376,7

Власна розробка авторів

Таблиця 3

Визначення співвідношення основних нутрієнтів нових крем-супів

Показники харчової цінності	Контрольний зразок	Крем-суп із гарбуза з бринзою	Крем-суп із гарбуза з плавленим сиром	Крем-суп із гарбуза з пошехонським сиром
Білки, г	1,00	1,00	1,00	1,00
Жири, г	1,518	1,685	1,683	1,809
Вуглеводи, г	4,073	3,680	3,729	3,680

Власна розробка авторів

Отже, порівнюючи вміст основних нутрієнтів страви, ми констатували явне збільшення кількості та збагачення продукції білками, жирами, які вплинули на підвищення енергетичної цінності, та помітили зменшення кількості вуглеводів.

У процесі порівняння перших страв, а конкретніше крем-супу з гарбуза за традиційною рецептурою та крем-супів із додаванням сирів, було встановлено, що рівень вмісту білка збільшився на 26,7% (з бринзою), на 31,8% (з плавленим сиром), на 42,4% (з пошехонським сиром), але відхилення перевищує 3,0%.

Вміст жиру зріс на 11% (з бринзою), 10,9% (з плавленим сиром), 19,2% (з пошехонським сиром), а вмісту вуглеводів у готовій страві зменшився на 9,7% (з бринзою), 8,5% (з плавленим сиром), 9,7% (з пошехонським сиром).

Після аналізу харчової цінності нових страв та традиційної рецептури визначали енергетичну цінність розроблених крем-супів. Помічено загальне підвищення забезпеченості калорійності страви.

Формула збалансованого харчування відображає добову потребу людини в основних харчових речовинах.

Порівнявши дослідні страви, за оптимальним співвідношенням маси білків, жирів і вуглеводів, ми дійшли висновку, що близькою до контрольного зразку є страва з додаванням бринзи. Страви з додаванням плавленого та пошехонського сирів мають незначні відхилення і за жирами (+10,98%...+19,17%) і за вуглеводами (-9,64% ...-9,64%), та отримані показники відрізняються від показників контрольного зразка.

Органолептичне оцінювання нових страв проводили ка кафедрі технології ресторанної і аюр-

ведичної продукції НУХТ, в умовах технологічної лабораторії. Тільки поглянувши на страву, можна помітити, що в рецептуру додана якась нова складова частина. У процесі додавання сирів змінились всі органолептичні показники. За контрольний зразок прийнято традиційну рецептуру першої страви – «Крем-суп із гарбуза» № 166 зі «Збірника рецептур» [11; 12].

Додавання в рецептуру сиру змінює всі органолептичні показники (консистенцію, колір, смак, зовнішній вигляд та запах), а також покращує смакові якості шляхом збільшення ніжності консистенції готового продукту.

Отримані результати свідчать про те, що комплексний органолептичний показник якості розроблених виробів має високе значення.

Як видно з представленої діаграми, що додавання сирів у технологію приготування овочевих крем-супів покращує показники консистенції, колір і сенсорне сприйняття продукту загалом.

Для повного уявлення про біологічну цінність розроблених страв «Крем-суп із гарбуза» розраховували такі показники, як амінокислотний скор [11], та провели обґрунтування вибору лімітуючої амінокислоти, на страву-аналог та розроблені нові страви. Розрахунок амінокислотного скору та порівняльний аналіз отриманих показників біологічної цінності розробленої продукції представлено в табл. 4.

За результатами проведеного аналізу біологічної цінності було встановлено, що досліджувані страви лімітовані за вмістом незамінних амінокислот. При цьому першою і другою лімітованою амінокислотою для всіх страв є триптофан (6,9–13,7%) і треонін (21,8–32,1%).

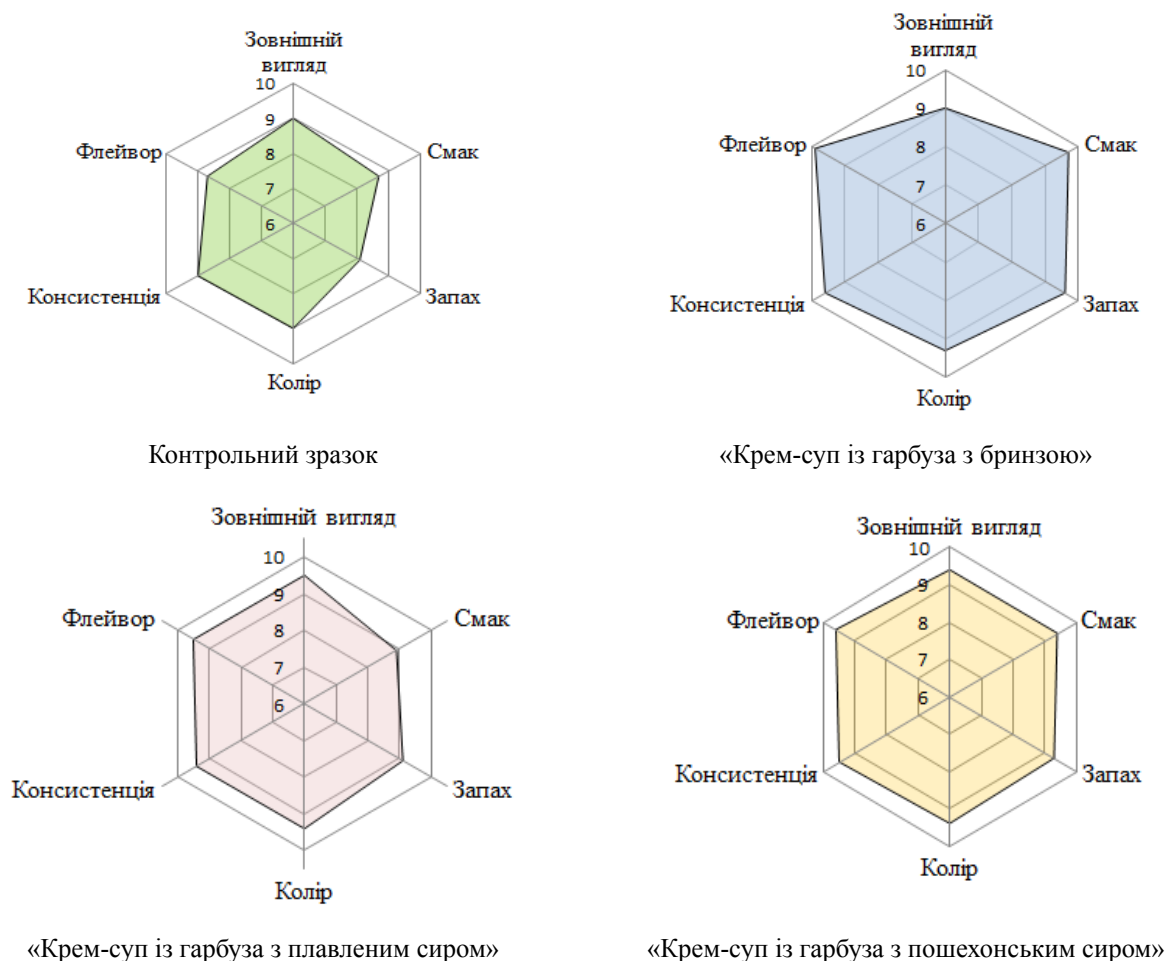


Рис. 1. Оцінка органолептичних показників під час дегустації страви з новими інгредієнтами

Власна розробка авторів

Таблиця 4

Ступінь задоволення добової потреби організму (на прикладі готової страви «Крем-суп із гарбуза з бринзою»)

Харчові речовини	Вміст харчових речовин		Добова потреба	Ступінь задоволення, %
	у 100 г крем-супу	в 1 порції крем-супу, 250 г		
Харчова та енергетична цінність				
Білки, г	5,227	13,067	75	17,42
Жири, г	6,952	17,379	88,9	19,55
Вуглеводи, г	15,181	37,952	350	10,84
Енергетична цінність, ккал	143,48	358,7	2500	14,35
Незамінні амінокислоти, мг				
Ізолейцин	257,8	644,6	550	117,20
Лейцин	419,6	1048,9	770	136,22
Лізин	332	829,9	660	125,74
Треонін	229,2	573	385	148,83
Триптофан	90,4	225,9	192,5	117,35
Валін	289,1	722,7	550	131,40
Метіонін	114,8	286,9	715	40,13
Фенілаланін	264,2	660,4	770	85,77

Харчові речовини	Вміст харчових речовин		Добова потреба	Ступінь задоволення, %
	у 100 г крем-супу	в 1 порції крем-супу, 250 г		
Мінеральні речовини, мг				
Натрій	517,96	1294,9	4000	32,37
Калій	210,81	527,03	4000	13,18
Кальцій	150,81	377,03	1100	34,28
Магній	18,68	46,695	350	13,34
Залізо	0,46	1,147	17	6,75
Фосфор	123,72	309,31	1200	25,78
Вітаміни, мкг				
Вітамін А, мг	0,06	0,1474	1000	0,01
β-каротин	0,6	1,4925	5	29,85
Тіамин (В ₁), мг	0,07	0,1761	1,3	13,55
Рибофлавін (В ₂), мг	0,16	0,406	1,6	25,38
Нікотинова кислота (РР)	0,42	1,0538	16	6,59
Аскорбінова кислота (С)	4,2	10,51	70	15,01

Власна розробка авторів

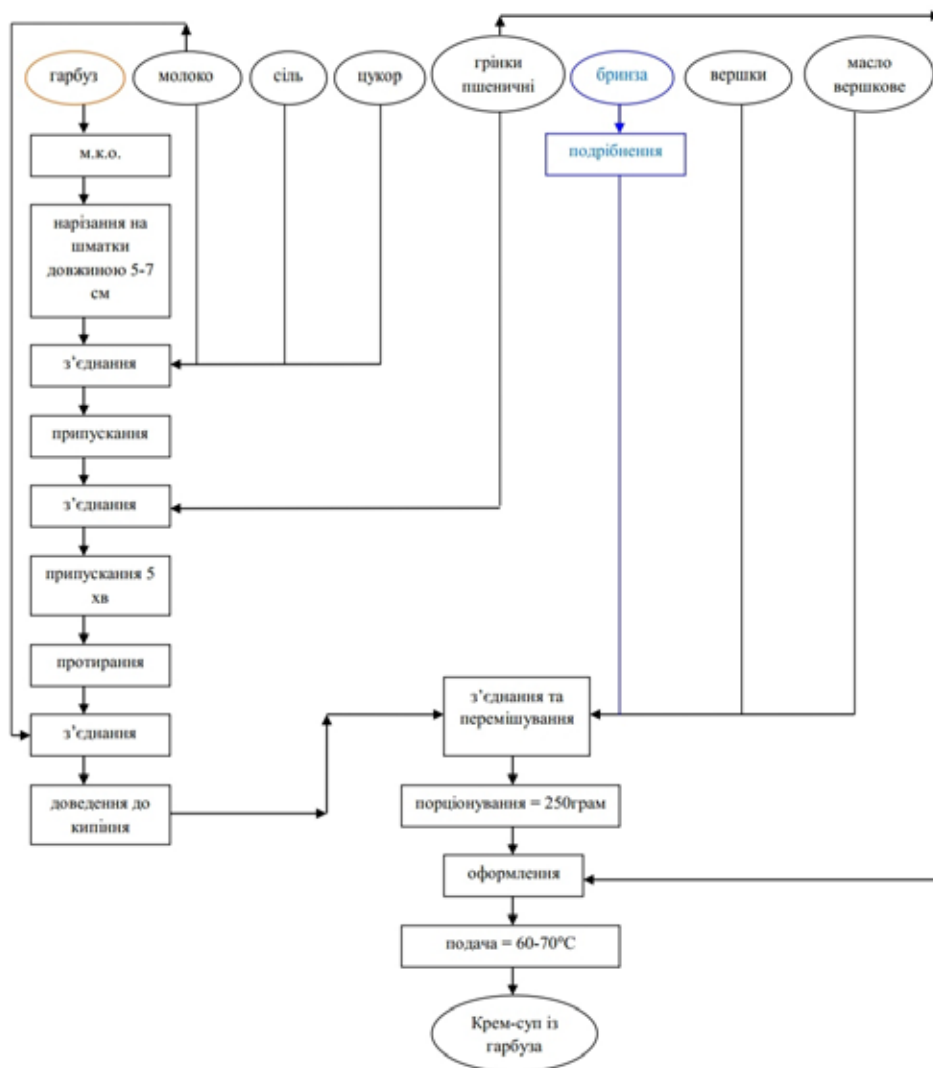


Рисунок 2. Схема технологічного процесу приготування страви «Крем-суп із гарбуза з бринзою»
Власна розробка авторів

Основна маса незамінних амінокислот вданих стравах доводиться на валін (54,4–76,5%), метіонін (44,6–73,7%), лейцин (44,2–61,3%).

За показником біологічної цінності ці страви значно відрізняються, розбіжність перевищує 12–16%.

Враховуючі проведені дослідження, ми розробили технологічні картки і схеми технологічного процесу приготування страв трьох найменувань крем-супу з гарбуза: «Крем-суп із гарбуза з бринзою», «Крем-суп із гарбуза з плавленим сиром», «Крем-суп із гарбуза з пошехонським сиром».

Схема технологічного процесу приготування страв «Крем-суп із гарбуза з бринзою» наведена на рис. 2.

Висновки. У процесі аналізу технології крем-супів було визначено проблемний елемент в рецептурі приготування крем-супу з гарбуза. Вирішенням цієї проблеми виявилось додавання в рецептуру страви молочного складника (різних видів сирів). З метою збагачення крем-супу

з гарбуза білками, жирами як додатковий компонент у приготуванні страви використали бринзу, плавлений сир, пошехонський сир, саме його використання і стало вирішенням проблемного елемента. Завдяки молочному складнику підвищується вміст необхідних організму людини білків, жирів мікро- та макроелементів та вітамінів, амінокислот, поліненасичених жирних кислот, флавоноїдів. Страва збагачується молочними білками та жирами, зростає її енергетична цінність, що дуже добре впливає на обмінні процеси в організмі людини, покращує травлення.

Встановлено, що отриманий продукт має поліпшені органолептичні показники та підвищену біологічну цінність, отже, ці страви можна рекомендувати для вживання людям, які страждають від виразкової хвороби шлунку і дванадцятипалої кишки, гастриту або панкреатиту, якщо перераховані недуги перебувають у стадії загострення.

Показано, що для реалізації запропонованої інновації не потрібне додаткове обладнання.

Список літератури:

1. Перші страви: користь, шкода та протипоказання. *MedFond.com*. URL: <https://medfond.com/korysni-produkty/protipokazi-do-vzhivannya-supiv.html>.
2. Шумило Г.І. Технологія приготування їжі : навчальний посібник. Київ : «Кондор». 2003. 376 с.
3. Технологія приготування їжі з основами товарознавства продовольчих товарів : підручник для проф. техн. навч. закл. / В.С. Доцяк. Частина I. Київ : Наш час, 2014. 400 с.
4. Баранов В.С., Козьміна Е.П. Технология производства продукции общественного питания. Москва : «Экономика», 1981.
5. Антонова В.А. Організація виробництва та обслуговування споживачів в закладах ресторанного господарства / Антонова В.А., Реутова М.А., Стрілець О.А., Чухрасва Л.В., Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. Донецьк, 2008. 320 с.
6. Технологія функціонального крем-супу збагаченого шротом насіння вівса. URL: <https://www.referat911.ru/Tehnologiya/tehnologiya-funkcionalnogo-kremsupu-zbagachenogo-shrotom/98368-1881261-place3.html>. (Дата звернення 20.07.2020 р.)
7. Іваніщева О.А. Дослідження шляхів оптимізації нутрієнтного складу страв з гарбуза. URL: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2019/4/46.pdf> (Дата звернення 20.07.2020 р.)
8. Искусство готовить. Часть 1 / За ред. Подолук О.О. Киев : Глобус, 2003. 270 с.
9. Koretska I, Kuzmin O., Zinchenko T. Sample rating in water-alcohol technology by profile non-linear quality criteria. *Ресторанний і готельний консалтинг. Інновації*. 2020. Том 3, № 1 (червень). С. 12–24. URL: <http://restaurant-hotel.knukim.edu.ua/issue/archive> (Дата звернення 20.07.2020 р.) (DOI: <https://doi.org/10.31866/2616-7468.3.1.2020>)
10. Левінець Ю.Д., Власенко Л.Л. Удосконалення технології приготування супів за рахунок добавки рослинного походження. URL: http://elib.hduht.edu.ua/bitstream/123456789/4652/1/t1_stud.pdf (Дата звернення 15.07.2020 р.)
11. Химический состав Российских пищевых продуктов [Текст] / Под ред. член-корр. МАИ, проф. И.М. Скурихина и академика РАМН, проф. В.А. Тутельяна. Москва, 2002. 220 с.
12. Сборник технических нормативов. Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий для предприятий общественного питания при общеобразовательных школах / под ред. В.Т. Лапшиной. Москва : Изд. Хлебпромформ, 2004. 417 с.
13. Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий для предприятий общественного питания. Москва : Хлебпромформ, 1996. 620 с.

Chyzhevsjka L.A., Polovyk V.V., Koretska I.L. IMPROVING THE TECHNOLOGY OF SOUPS WITH THE USE OF VEGETABLE RAW MATERIALS

The article analyzes the demand and as a first course and the necessity of expanding the range of the first dishes cream soups, by improving traditional recipes. Defines the role of proper nutrition is to develop a balanced meals and adherence to diet. The analysis of each ingredient and its technological impact on the process of preparation of first courses. Scientifically demonstrated the positive impact of the use made of dairy ingredients in innovative recipes cream soups.

These components have a significant influence on the physico-chemical parameters and technological systems. Participate in the General flavor meals, and being a carrier of essential amino acids, carry a nutrient composition which improves the overall efficiency of the product in comparison with analog. To determine the influence of lactic acid was carried out using model experiments. The results of these studies determined the optimal ratio of incoming ingredients ("poshehonsky" cheese, "processed" cheese and goat cheese) in innovative technologies of cream soups. Developed a scheme of production of cream soup of pumpkin with the addition of various types of cheeses. For maximum preservation of the useful properties of cheese in the finished dish offered some kinds of cheese not subjected to heat treatment. This technological method allows to obtain an improved dish of high nutritional value and enrichment of essential nutrients. The obtained model structure underwent a comprehensive evaluation by the profilograms of the quality and defined quality criteria. The results of organoleptic indicators, comparing the energy values of the developed samples of cream of pumpkin soup and the daily supply of the main nutrients.

Key words: cream, dairy component, food and energy value, organoleptic evaluation.

ТРАНСПОРТ

УДК 656.072.4.004.942

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/32>**Жук М.М.**

Національний університет «Львівська політехніка»

Півторак Г.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Гіць І.І.

Національний університет «Львівська політехніка»

Козак М.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

ПРОГНОЗУВАННЯ ВИБОРУ ВИДУ ТРАНСПОРТУ У РАЗІ МІСЬКИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ НА ОСНОВІ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ ДЕРЕВ РІШЕНЬ

Оцінка вибору виду транспорту у разі переміщень є одним з важливих етапів транспортного планування. Під час міських переміщень основний вибір здійснюється між громадським (ГТ) та приватним транспортом (ПТ). Для прогнозування такого вибору застосовуються різні види моделей та способи, одним з яких є побудова дерев рішень. У разі прогнозування розподілу переміщень за видами потрібно враховувати мету поїздки, оскільки вибір користувачів відрізняється залежно від мети переміщення, що підтверджується проведеними дослідженнями. У роботі розглядаються чотири види поїздок: робочі, відпочинкові, з метою покупок та до/з транспортного вузла. Атрибутами користувачів, які враховувалися, є вік, стать, вид зайнятості (працюючі та працюючі студенти для робочих поїздок і працюючі та непрацюючі – для всіх інших) та наявність власного автомобіля. Поїздки характеризувалися за тривалістю, частотою та днем виконання (робочий чи вихідний). Дані для аналізу отримано шляхом проведення інтернет-опитувань у м. Львові. На їх основі побудовано класифікаційні дерева рішень для вибору користувачами виду транспорту (між громадським та приватним) залежно від мети поїздки. Виявлено, що одні і ті ж чинники по-різному впливають на вибір користувача за різної мети переміщення. Якщо наявність власного авто очікувано є найважливішим чинником впливу для вибору між ГТ та ПТ для всіх поїздок, то далі чинники відрізняються. Наприклад, для пересувань з метою відпочинку частота поїздки має найменший вплив на здійснення вибору, а от для поїздок з/до транспортного вузла це наступний після наявності автомобіля чинник впливу. З допомогою отриманих дерев рішень можна на основі даних щодо структури населення та переважаючих точок притягання в районах міста прогнозувати частку користувачів, які добиратимуться певним видом транспорту до місць праці, відпочинку, торгових закладів чи транспортних вузлів.

Ключові слова: міські переміщення, мета переміщення, дерева рішень, вибір виду транспорту, прогнозування.

Постановка проблеми. Вибір населенням способу переміщення в межах міської території суттєво впливає на рівень завантаження міської транспортної мережі, на міську екологічну систему, на сприйняття міста як комфортного для його мешканців та гостей середовища.

Основними способами переміщення в містах є приватний та громадський транспорт. Згідно з дослідженнями міської мобільності, прове-

деними у Львові, 52% містян для переміщень вибирають громадський транспорт, ще 23% – автомобіль, 18% переміщуються пішки і решта припадає на велопереміщення, поїздки у таксі тощо [1]. Розподіл пасажирів між різними видами транспорту відбувається залежно від їх особистих характеристик, вартості переміщення, часу в дорозі, доступності для користувача різних варіантів руху тощо.

Спосіб переміщення навіть для конкретно вибраної особи не є сталою величиною і може змінюватися залежно від зміни різних умов. Одним з важливих чинників впливу тут є мета поїздки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [2] автори використовують для оцінки вибору режиму переміщення випадкові моделі мінімізації смутку (random regret minimization models), які були введені в транспортні дослідження як альтернатива випадковим корисним моделям. Автори провели аналіз вибору типу переміщення на основі мети поїздки. Виявилось, що коли для поїздки важливим чинником є пунктуальність (наприклад, робоча поїздка), то користувачі негативно сприймають навіть невелику різницю в характеристиках різних типів переміщень. А наприклад, у поїздках з метою відпочинку толерантність до різниці в характеристиках є значно вищою. Для перевірки того, чи визначення порогових значень рівня байдужості покращує прогностичну здатність моделі вибору виду транспорту, проведено розрахунки на основі даних опитувань респондентів (Нідерланди). Автори в роботі розглядали три варіанти режиму руху: автомобіль, велосипед та рух пішки. Основою вибору, окрім мети поїздки (робота, навчання, відпочинок, покупки та подорожі), є час переміщення.

У роботі [3] для оцінки вибору режиму руху пасажирями, що очікують на автовокзалі (між громадським та приватним (таксі чи прокат) транспортом), авторами пропонується застосування моделі SEM-Nested Logit, яка використовується для пошуку причинно-наслідкового зв'язку між спостережуваними та прихованими змінними (в авторській моделі це соціально-демографічні характеристики користувача (вік, стать, щомісячний дохід, рівень освіти, наявність власного транспортного засобу), характеристики подорожі (мета поїздки, час у дорозі, частота руху автобуса та показники комфорту). Автори визначили граничні значення показників комфортності, за яких імовірність переходу з приватного на громадський транспорт сягає найбільшого значення.

Недоліками дискретних моделей вибору режиму руху є те, що вони не відображають динамічного процесу поведінки під час подорожей. Адаже на вибір можуть впливати такі чинники, як, наприклад, інформація, отримана вже під час подорожі. Цей недолік може компенсувати теорія еволюційних ігор (Evolutionary Game Theory), яка припускає, що мандрівники коригують свою поведінку під час подорожі, порівнюючи корисність своєї поточної поведінки із середнім значенням корисності всієї системи.

Моделі, основані на цій теорії, використовуються, наприклад, для оцінки вибору режиму переміщення у великих містах під час ранкових пікових періодів [4] чи ймовірності вибору громадського транспорту власниками автомобілів під тиском міської стратегії розвитку громадського транспорту, з одного боку, та зростання заторів – з іншого [5].

Інші дослідники (наприклад, [6]) розширили теорію випадкової корисності на основі розрахунку «порогу байдужості» – коли величина різниці корисності двох варіантів переміщення менша певного значення, користувачі не в змозі її побачити, і тоді вибір здійснюється випадковим чином.

Автори [7] об'єднали ці дві теорії і в своєму дослідженні поєднали концепцію порогу байдужості з теорією еволюційних ігор.

Формулювання цілей статті. Прогнозування на транспорті є обов'язковим елементом транспортного планування. Достовірність отриманих у результаті прогнозування даних впливає на правильність прийняття рішень щодо проектування, функціонування та подальшого розвитку транспортної системи.

Основна ціль дослідження – визначити основні показники, які впливають на вибір користувачами міської транспортної системи виду свого переміщення, та на основі проведених досліджень побудувати дерева рішень вибору виду транспорту для майбутнього прогнозування частки переміщень цими видами транспорту.

Виклад основного матеріалу. Одним з методів аналізу даних та подальшої побудови прогнозних моделей є дерева прийняття рішень, з допомогою яких можна встановити залежність цільової змінної від вхідних змінних.

Дерево рішень складається з «гілок» та «листоків». Листки, які зазвичай зображуються у формі прямокутників, містять атрибути, а гілки – це розгалуження, які відображають альтернативи. Кожна гілка – це можливий результат.

Для побудови оптимального дерева прийняття рішення потрібно на кожному кроці вибирати той показник, який найкраще характеризує цільову функцію. Критерієм такого вибору може бути показник ентропії множини A [8, ст. 43]:

$$H(A, S) = -\sum_{i=1}^s \frac{m_i}{n} \log \frac{m_i}{n}, \quad (1)$$

де S – певна властивість множини, відносно якої розраховується ентропія;

n – кількість елементів у множині A ;

m – кількість елементів, які володіють властивістю S ;

s – кількість можливих значень властивості S .

На основі розрахованих значень ентропії розраховується показник приросту інформації [8, ст. 45]:

$$Gain(A, Q) = H(A, S) - \sum_{i=1}^q \frac{|A_i|}{|A|} H(A_i, S), \quad (2)$$

де A_i – множина елементів A , в якій атрибут Q , який може мати q можливих значень, має значення i .

Щоб уникнути неточності результату через те, що атрибути мають неоднакову кількість значень, розраховується величина поправки показника приросту інформації [8, ст. 49]:

$$SplitInfo(A, Q) = - \sum_{i=1}^q \frac{|A_i|}{|A|} \log_2 \frac{|A_i|}{|A|} \quad (3)$$

$$GainRatio(A, Q) = \frac{Gain(A, Q)}{SplitInfo(A, Q)} \quad (4)$$

На кожному кроці побудови дерева рішень потрібно вибирати той атрибут, для якого скоригований приріст інформації найбільший.

На основі проведених опитувань користувачів транспортної системи Львова отримано статистичну інформацію щодо вибору ними способу свого пересування у разі виконання переміщень. Результати досліджень показали, що ймовірність вибору громадського транспорту залежить від мети поїздки: для робочих поїздки та поїздки з/до транспортного вузла громадський транспорт вибрали 71% користувачів, для відпочинкових – 48%, а для поїздки з метою покупок – 53%. Параметрами, які враховувалися, є соціально-демо-

графічні характеристики користувача (вік, стать, зайнятість та наявність власного автомобіля) та характеристики поїздки (тривалість поїздки і час або частота її виконання).

Щодо загальної структури вибірки, то вона складається з 48% чоловіків та 52% жінок. 47% опитаних молодші 21 року, решта – старші (мінімальний вік опитаних – 17 років, максимальний – 56 років), 26% мають власний автомобіль. Працюючих – 49%, ще 12% – одночасно і працюючі, і студенти.

Щодо характеристик поїздки, то вони відрізняються залежно від мети поїздки. За частотою поїздки було поділено на дві групи: ті, які відбуваються кілька разів на місяць, і ті, які відбуваються раз на кілька місяців. Кілька разів на місяць здійснюються 58% відпочинкових поїздки та 42% поїздки з/до транспортного вузла. Щодо дня тижня, то в робочі дні (понеділок–п’ятниця) відбувається 33% поїздки з метою покупок, 48% поїздки до/з транспортного вузла та 23% відпочинкових поїздки. Розподіл поїздки за тривалістю подано на рис. 1.

Початкова ентропія для ситуації вибору користувачем громадського транспорту становитиме:

- під час робочих поїздки: $H(A, GT) = 0,875$;
- під час відпочинкових поїздки: $H(A, GT) = 0,998$;
- під час поїздки з метою покупок: $H(A, GT) = 0,998$;
- під час поїздки з/до транспортного вузла: $H(A, GT) = 0,869$.

Результати розрахунків приростів інформації з подальшим коригуванням для всіх атрибутів, які розглядаються, подано в таблиці 1.

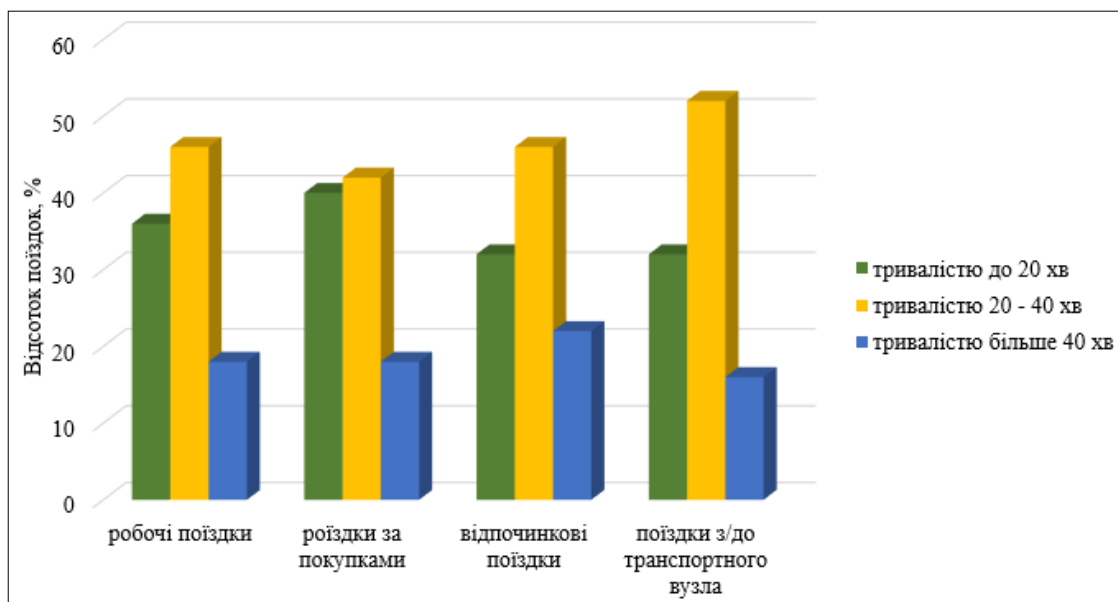


Рис. 1. Розподіл поїздки за тривалістю залежно від мети переміщення

**Розрахунок приростів інформації для атрибутів у разі прогнозування вибору
для поїздки громадського транспорту**

Атрибут Q	$Gain(A, Q)$	$SplitInfo(A, Q)$	$GainRatio(A, Q)$	Атрибути впливу, впорядковані в порядку спадання їх значимості
Робочі поїздки				
Вік	0,110	1,0	0,110	Наявність авто
Стать	0,055	0,982	0,056	Вік
Зайнятість	0,111	0,999	0,110	Зайнятість
Наявність авто	0,703	1,204	0,584	Стать
Тривалість поїздки	0,014	1,490	0,009	Тривалість поїздки
Відпочинкові поїздки				
Вік	0,085	0,998	0,085	Наявність авто
Стать	0,018	0,998	0,018	Зайнятість
Зайнятість	0,121	0,983	0,124	Вік
Наявність авто	0,601	0,998	0,602	Тривалість поїздки
Тривалість поїздки	0,051	1,523	0,034	Стать
Частота поїздки	0,012	0,983	0,012	Частота поїздки
Поїздки з метою покупок				
Вік	0,038	0,999	0,038	Зайнятість
Стать	0,028	0,998	0,028	Вік
Зайнятість	0,063	0,973	0,065	Тривалість поїздки
День тижня	0,016	0,918	0,017	Стать
Тривалість поїздки	0,050	1,494	0,033	День тижня
Поїздки до/з транспортного вузла				
Вік	0,095	1,0	0,095	Наявність авто
Стать	0,0003	0,999	0,0003	Частота поїздки
Зайнятість	0,022	0,981	0,023	Вік
Наявність авто	0,321	0,823	0,390	Зайнятість
Тривалість поїздки	0,021	1,443	0,014	Тривалість поїздки
Частота поїздки	0,096	0,984	0,097	День тижня
День тижня	0,002	0,999	0,002	Стать

На основі отриманих даних будуються дерева рішень для вибору виду транспорту – громадського або приватного (рис. 2).

Знаючи характеристики користувача, з допомогою отриманих дерев рішень можна спрогнозувати, який вид транспорту він вибере у разі поїздки з тією чи іншою метою.

Висновки. Основні висновки проведеного дослідження.

1. Визначено, що залежно від мети поїздки атрибути мають різний вплив на вибір виду транспорту у разі міських переміщень: зокрема, для робочих поїздок найбільший вплив на здійснення вибору має наявність авто та вік користувача, а найменший – тривалість поїздки; для відпочинкових найважливішими атрибутами є наявність авто та зайнятість, а найменш важливим – частота

поїздки; для поїздок з метою покупок найбільший вплив на вибір виду транспорту має зайнятість та вік, а найменший – день тижня; і для поїздок з/до транспортного вузла найзначимішими атрибутами є наявність авто та частота поїздки, а найменш значимим – стать користувача.

2. Для прогнозування вибору виду транспорту пропонується метод побудови дерева рішень, який є відносно простим у використанні та досить ефективним [9, ст. 442].

3. З допомогою отриманих дерев рішень можна на основі даних щодо структури населення та переважаючих точок притягання в районах міста прогнозувати частку користувачів, які добиратимуться певним видом транспорту до місць праці, відпочинку, торгових закладів чи транспортних вузлів.

1 – вибір користувачем громадського транспорту
0 – вибір користувачем приватного автотранспорту

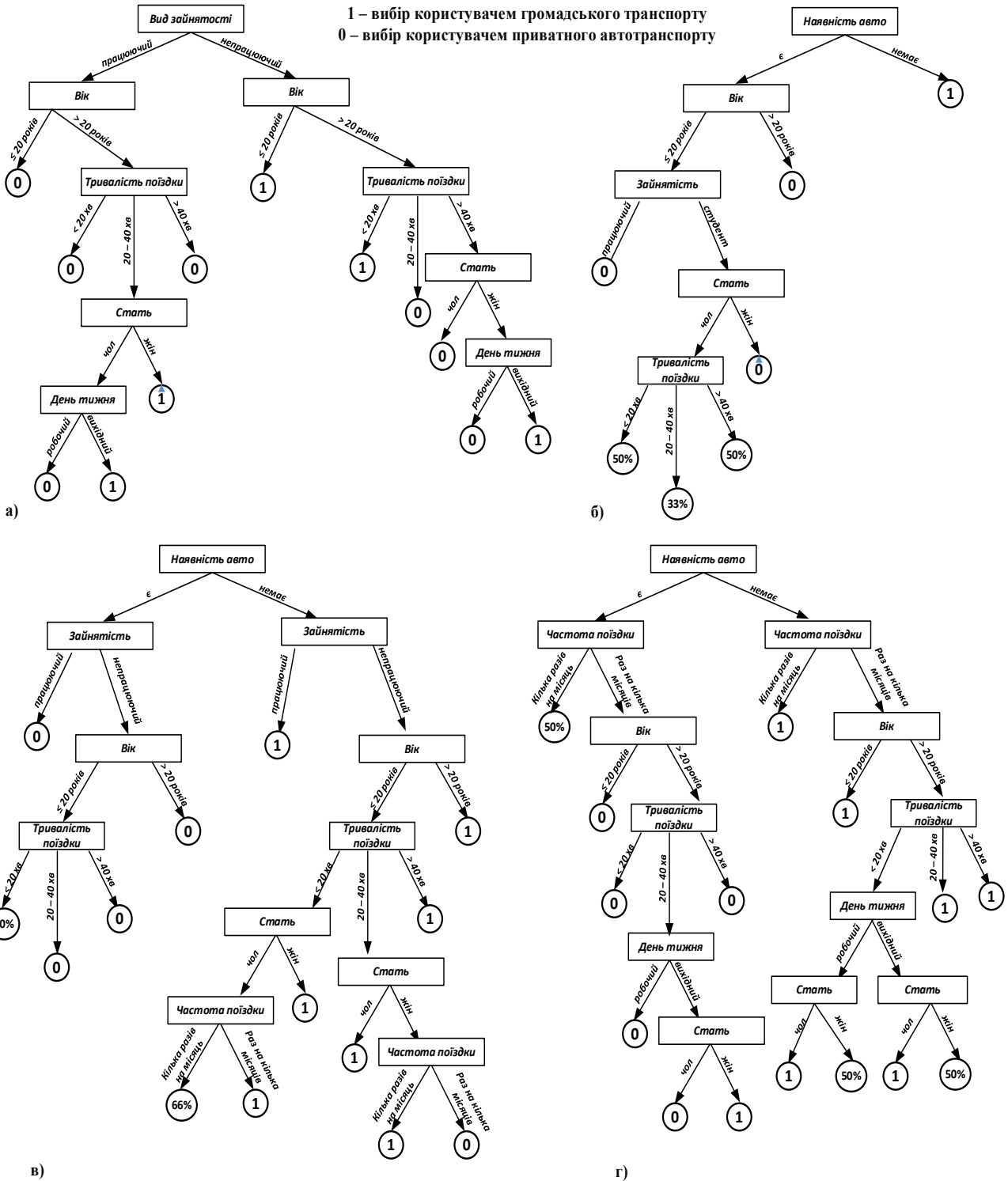


Рис. 2. Древа рішень для прогнозування вибору користувачем транспортних послуг виду транспорту: а) пересування з метою покупок; б) пересування з робочою метою; в) пересування з метою відпочинку; г) пересування до/з транспортного вузла

Список літератури:

1. Веб-сторінка «Мобільність Львова». URL: <https://mobilitylviv.com/>.
2. Sunghoon Jang, Soora Rasouli, Harry Timmermans. Tolerance and Indifference Bands in Regret–Rejoice Choice Models: Extension to Market Segmentation in the Context of Mode Choice Behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2018. Volume 2672, Issue 47. P. 23–34. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0361198118787629>.
3. Yan Han, Wanying Li, Shanshan Wei and Tiantian Zhang. Research on Passenger’s Travel Mode Choice Behavior Waiting at Bus Station Based on SEM-Logit Integration Model. *Sustainability*. 2018. Volume 10(6), 1996. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/6/1996/html#B45-sustainability-10-01996>.
4. Chaoqun Wu, Yulong Pei, and Jingpeng Gao. Evolution Game Model of Travel Mode Choice in Metropolitan. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015. Volume 2015, Article ID 638972, 11 pages. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ddns/2015/638972/>.
5. Huawei Gong and Wenzhou Jin. Analysis of Urban Car Owners Commute Mode Choice Based on Evolutionary Game Model. *Journal of Control Science and Engineering*. 2015. Volume 2015, Article ID 291363, 5 pages. URL: <https://www.hindawi.com/journals/jcse/2015/291363/>.
6. Wang W., Wang D.Z.W., Sun H.J. and Wu J.J. Public transit service operation strategy under indifference thresholds-based bi-modal equilibrium. *Journal of Advanced Transportation*. 2016. Volume 50, No. 6. Pp. 1124–1138. URL: <https://doi.org/10.1002/atr.1393><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/atr.1393>.
7. Xinjie Zhang, Hongzhi Gao. Research on Travel Mode Choice Behaviors Based on Evolutionary Game Model Considering the Indifference Threshold. *IEEE Access*. 2019. Volume 7. Pp. 174083–174091. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8918435/references#references>.
8. Марченко О.О., Россада Т.В. Актуальні проблеми Data Mining : навчальний посібник для студентів факультету комп’ютерних наук та кібернетики. Київ, 2017. 150 с.
9. Ситник В.Ф., Ситник Н.В. Деревя рішень у системах дейтамайнінгу. *Формування ринкової економіки* : зб. наук. пр. Київ. нац. екон. ун-т ім. В. Гетьмана. Київ, 2006. Вип. 16. С. 442–454.

Zhuk M.M., Pivtorak H.V., Gits I.I., Kozak M.M. FORECASTING THE MODE CHOICE OF TRANSPORT FOR URBAN MOVEMENTS USING CLASSIFICATION DECISION TREES

Evaluation of the mode choice of transport when moving is one of the important stages of transport planning. For urban transport, the main means of transport is public (PuT) and private transport (PrT). Different types of models and methods are used to forecasting this choice, one of which is the construction of decision trees. When forecasting the distribution of movements by type, you need to consider the trip purpose, because the choice of users differs depending on the movement’s purpose. This is confirmed by research. The paper considers four types of trips: work, leisure, shopping and to/from the transport hub. The following user attributes were taken into account: age, gender, type of employment (working and working students for work trips and working and non-working – for everyone else) and the availability of their own car. Trips are characterized by duration, frequency and day of performance (working or weekend). Data for analysis were obtained by conducting online surveys in Lviv city. Based on them, classification decision trees are built for users to choose the type of transport (between public and private) depending on the purpose of the trip. It was found that the same factors affect the user’s choice in different ways of transportation. Having your own car is expected to be the most important influencing factor for choosing between PuT and PrT for all trips. The influence of other factors is different. For example, for leisure travel, the frequency of travel has the least influence on the choice, but for travel to/from the transport hub is the next impact factor after the presence of a car. With the help of the obtained decision trees, it is possible to predict the share of users who will choose by a certain type of transport to places of work, rest, shopping or transport hubs on the basis of data on population structure and prevailing points of attraction in the city districts. With the help of the obtained decision trees, it is possible to predict the share of users who will choose by a certain type of transport to places of work, rest, shopping center or transport hubs on the basis of data on population structure and prevailing points of attraction in the city zones.

Key words: urban movements, trip purpose, decision trees, mode choice, forecasting.

УДК 504

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/33>**Кірсанова В.В.**

Дунайський інститут

Національного університету «Одеська морська академія»

Биковець Н.П.

Дунайський інститут

Національного університету «Одеська морська академія»

Чумаченко М.Н.

Дунайський інститут

Національного університету «Одеська морська академія»

Бражник І.Д.

Національний університет «Одеська морська академія»

НАФТОШЛАМ СУДНОПЛАВСТВА ЯК ЕЛЕМЕНТ БІОДЕГРАДАЦІЇ НАФТОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ СВІТОВОГО ОКЕАНУ

Забруднення Світового океану нафтою і нафтовими продуктами є небезпечним екологічним явищем. Розливи нафти реєструються під час видобутку нафти на шельфі та її переробки, під час експлуатації водного транспорту. Частина нафтових забруднень потрапляє в морське середовище з промисловими і комунальними стоками, а також зі стоками річок. Нафтові вуглеводні токсичні для всіх живих організмів і мають негативний вплив на трофічні зв'язки і колообіг речовин. Негативно впливають на біорізноманіття екосистем Світового океану, завдають їм великої шкоди. Вказали на перспективність біоремедіації морського середовища в процесі біодеструкції нафти за допомогою вуглеводноокислюючих мікроорганізмів. Аналізували особливості їх штамів. Бактерії, що містять плазміди біодеградації, володіють розширеним спектром утилізованих вуглеводнів нафти. Звернули увагу на необхідність створення консорціумів штамів вуглеводноокислюючих мікроорганізмів, до складу яких входять вуглеводноокислюючі мікроорганізми і мікроорганізми, які синтезують біосурфактанти. На морських судах накопичується нафтовий шлам у результаті сепарації нафтовмісних вод. У процесі його зберігання можливе культивування біомаси вуглеводноокислюючих мікроорганізмів, а також можливий синтез біосурфактантів. З цією метою необхідно розробити конструкцію суднової нафтошлямової установки, яка працює на основі біодеструкції нафти вуглеводноокислюючих мікроорганізмів. При цьому необхідно звернути увагу на хімічний склад шламу, який складається із залишків палива. Також необхідно розробити технологію синтезу біомаси вуглеводноокислюючих мікроорганізмів у виробничих масштабах. Під час інтродукції мікробіоти до нафтошлямової установки обов'язково враховується гранична допустима концентрація шламу. Технологічний процес повинен забезпечити оптимальну кислотність середовища. Необхідно враховувати абсолютну аеробність мікроорганізмів, що окислюють вуглець. Отриману біомасу мікробіоти можна використовувати для біоремедіації Світового океану. У танках, в яких накопичується нафтовий шлам, також можливе розмноження мікроорганізмів, які синтезують біосурфактанти.

Ключові слова: нафта, нафтове забруднення, вуглеводноокислюючі мікроорганізми, нафтошлам, біосурфактанти.

Постановка проблеми. Забруднення Світового океану нафтою і нафтовими продуктами є небезпечною екологічною проблемою. Під час експлуатації водного транспорту і видобутку нафти на шельфі та її переробки реєструються розливи нафти й розливи нафтового палива, викликані пошкодженнями та аваріями. Частина нафтових забруднень потрапляє у морське сере-

довище з промисловими і комунальними стоками, а також зі стоками річок [1].

Нафтові вуглеводні є токсичними для всіх живих організмів, оскільки завдають їм великої шкоди, а також призводять до загибелі. Проведені численні дослідження, присвячені вивченню рівню забруднення морської води вуглеводнями, а також біодеградації нафти і нафтопродуктів

за допомогою мікроорганізмів, що окислюють вуглець у забрудненому морському середовищі. Вивчено ступінь токсичності різних фракцій нафти і токсичність нафтових продуктів. Визначено лімітуючі фактори для різних видів мікроорганізмів, що окислюють вуглець. Однак екологічна проблема нафтового забруднення залишається актуальною і не є розв'язаною [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нафта складається із суміші насичених вуглеводнів з різною молекулярною масою і додатково включає поліциклічні ароматичні вуглеводні, такі як нафталін, антрацен і фенантрен. Всі вони легші за воду, тож у разі потрапляння на її поверхню утворюють тонку плівку на великій площі. В результаті порушується газообмін між атмосферою і гідросферою. Від задухи гине планктон, зосереджений у верхніх шарах гідросфери. Токсична дія вуглеводнів може призвести до летального результату, якщо її рівень перевищує граничні концентрації. Нафтові вуглеводні в печінці риби, у результаті їх активації ферментами, перетворюються на більш токсичні і реактивні продукти. Метаболіти поліциклічних ароматичних вуглеводнів й аліфатичних вуглеводнів є канцерогенними. Вуглеводні, що входять до складу нафти, спричиняють кардіотоксичний вплив, що надалі впливає на фізичну форму і виживання. Виявлено дію нафти на сенсорну функцію і поведінку у разі дуже низьких концентрацій впливу.

Океанські розливи нафти стали основною екологічною проблемою у 1960-х роках, головним чином, у результаті інтенсифікації розвідки і видобутку нафти на континентальних шельфах і використання супертанкерів, здатних перевозити більше 500000 тонн нафти. В історії розвитку судноплавства зареєстровані численні великі аварії нафтоналивних танкерів, які призвели до розливу сотень тонн нафти. Наприклад, у 1967 році танкер *Torrey Canyon* сів на мілину при вході в Ла-Манш і скинув 120000 тонн сирої нафти в море [3]. У березні 1989 року нафтоналивний танкер *Exxon Valdez* сів на мілину в протоці Принца Вільямса і пролив майже 49000 тонн сирої нафти, утворивши нафтову пляму площею 28 тисяч квадратних кілометрів. Було забруднено нафтою близько двох тисяч кілометрів берегової лінії [4].

Вражаючи розливи нафти з розбитих або пошкоджених супертанкерів у наш час рідкісні через суворі вимоги до конструкції судна та екологічні норми експлуатації суден. В активному стані перебувають понад п'ятсот тисяч суден. Основним джерелом енергії для них є важкі фракції нафти.

Одну третину від загальної кількості судів становлять нафтоналивні танкери. Морськими шляхами перевозяться 90% видобутої у світі нафти. Також небезпеку являють берегові забруднення і забруднення річкових стоків, які також містять нафтові домішки. В результаті щорічно повідомляється про тисячі незначних і декілька великих розливів нафти, пов'язаних з розвантаженням свердловин і роботами на танкерах, причому загальна кількість нафти, яка щорічно випускається у світові океани, перевищує один мільйон метричних тонн. У поєднанні з природним просочуванням з дна океану ці джерела додають нафту до світових водних шляхів зі швидкістю 3,5–6 мільйонів метричних тонн на рік [5].

Нафта, потрапляючи до морського середовища, утворює тонку плівку на великій площі. Процес її розтікання залежить від її хімічного складу, а також від погодних умов навколишнього середовища. Найбільша концентрація нафти зосереджена на глибині до двох метрів, а на поверхні залишається плівка. У разі емульгування нафта піддається біохімічному і фотохімічному розпаду. Біорозпад нафти відбувається під впливом вуглеводноокислюючих мікроорганізмів. В океані було знайдено близько 200 видів бактерій, дріжджів і цвілевих грибів, здатних окисляти сполуки нафти. Встановлено, що всі вуглеводні, що присутні в нафті, схильні до біохімічного та фотохімічного розпаду. Фотохімічний розпад нафти здійснюється під впливом ультрафіолетового сонячного випромінювання. Більш інтенсивно окислюються легкі фракції нафти (бензин, гас). Важкі фракції розкладаються дуже повільно. Поступово їх в'язкість підвищується, зважені у воді частинки об'єднуються у більш великі фракції і утворюють темні грудочки, схожі на загуслий мазут. Їх називають «нафтовими агрегатами». Темні грудочки мазуту падають на дно, а іноді морські хвилі викидають їх у прибережну зону. Температура води є лімітуючим фактором під час розпаду нафти у морі. За температури 40 °C біорозпад нафти припиняється. За більш високої температури обсяг біорозпаду не перевищує 1–10 мг/м³ на добу. В середньому мікроорганізми розкладають близько 25–30% розливої нафти. Однак процес біорозпаду нафти у морській воді здійснюється повільно. Для повного розкладання тисяч тонн нафти потрібен тривалий період. Під час ліквідації розливів нафти ніколи повністю не можна покладатися тільки на біорозпад. Процес фотохімічного окислення відбувається за участю сонячного світла і за наявності оксигена.

Швидкість фотохімічного окислення не перевищує 10–50% швидкості біохімічного. За відсутності світла фотохімічне окислення здійснюється дуже повільно. Інтенсивність світла різко знижується відповідно до глибини. Окислення нафтопродуктів спостерігається на поверхні морського середовища. Прискорення процесів біорозпаду нафти у Світовому океані стає можливим за умови культивування вуглеводноокислюючих мікроорганізмів у лабораторних умовах з подальшою їх інтродукцією в екосистеми Світового океану [6].

Мета статті – визначення ключових напрямів досліджень вуглеводноокислюючих мікроорганізмів, що окислюють вуглець, з метою прискорення біорозпаду нафти в Світовому океані. Аналіз можливості культивування мікроорганізмів, що окислюють вуглець та синтезують біосурфактанти в нафтовому шламі морських суден визначив можливість інтродукції отриманої культури – мікробіоти, що окислює вуглець з метою ремедіації нафтового забруднення Світового океану.

Виклад основного матеріалу. Під час ліквідації наслідків розливу нафти і нафтопродуктів очищення водних об'єктів є одним з найбільш складних і трудомістких завдань. Забруднення нафтою і нафтопродуктами пов'язане з динамічністю водного середовища і складністю процесів трансформації вуглеводнів у ній. Служби з боротьби з розливами нафти і нафтопродуктів використовують такі методи: механічні, термічні, фізико-хімічні та біологічні [7]. Під час ліквідації розливів у гідросфері найбільш поширеним є механічний спосіб збору нафти. Однак така технологія не вирішує проблему повністю і після збору на поверхні залишається більше 30% нафти [8]. Термічний метод заснований на випалюванні нафти. Він застосовується у разі товщини шару не менше 3 мм і безпосередньо відразу після забруднення до утворення емульсії з водою. Фізико-хімічні методи ліквідації розливів нафти базуються на використанні реагентів-диспергентів і сорбентів. Диспергуючі засоби руйнують суцільну нафтову плівку і прискорюють процес дифузії нафти у водну товщу, відновлюють водо-, газо-, енергообмін з атмосферою, тим самим приводячи до посилення біодеградації. Однак більшість препаратів не здатна диспергувати дуже в'язкі нафтопродукти та стійкі емульсії. До того ж як диспергент використовуються різні ПАВ, більшість з яких є високотоксичними сполуками, і їх негативний вплив на морські організми іноді буває більш істотним, ніж вплив самої нафти [7]. Більшість застосовуваних на практиці технологій механічної та фізико-хімічної очистки

води від нафти і нафтопродуктів багатостадійні, трудомісткі, пов'язані з великими матеріальними витратами і не забезпечують повне видалення забруднювача з поверхні, не кажучи вже про вуглеводні, розчинені або емульговані у воді [8]. Провідне місце у процесі самоочищення гідросфери належить до біологічних факторів, серед яких вирішальну роль відіграють нафтоокислюючі мікроорганізми. В результаті їх життєдіяльності нафта трансформується у нові органічні сполуки. Відбувається накопичення нової органічної речовини і подальше включення її до колообігу вуглецю в гідросфері. Вуглеводні, що потрапляють у водні екосистеми, є джерелами вуглецю й енергії для вуглеводноокислюючих мікроорганізмів, тим самим сприяючи збільшенню їх чисельності за наявності сприятливих умов для зростання і розвитку. Своєю чергою мікроорганізми, використовувані для ліквідації нафтових розливів на воді, є їжею для планктону та інших організмів, що підтримує таким чином певні трофічні зв'язки. Серед вуглеводноокислюючих мікроорганізмів, які мешкають у морському середовищі, виявлені представники понад двадцяти родів бактерій, ціанобактерій, грибів та водоростей [9]. З донних відкладень озер, розташованих на території Сургутського, Нижньовартівського і Нефтеюганського районів Ханті-Мансійського автономного округу та Югри виділені 6 штамів р. *Streptomyces*, які мали високу деструктивну здатність (50–90%) стосовно нафти у концентраціях від 1 до 5% за температури 40°C [10]. Отримано дані про те, що бактерії р. *Alcanivorax* грають провідну роль у деградації лінійних вуглеводнів у забруднених сировою нафтою водних середовищах [11]. Цей висновок підтверджений у роботі Мапелло [12], де показано, що, крім бактерій *Oleispira antarctica*, основними мікроорганізмами, які здійснюють розкладання в морській воді н-алканів, є *Alcanivorax borkumensis* і *Alcanivorax dieselolei*. Досліджено біодеградацію вуглеводнів у морській воді за температури 50 °C у малих розмірах крапель нафти (9–11 мкм). Представники рр. *Colwellia*, *Oleispira* і род. *Oceanospirillaceae* трансформували н-алкани (C5–C36) більш ніж на 95% за 31 день, завдяки бактерії рр. *Cycloclasticus*, *Marinobacter* і род. *Alteromonadaceae* і *Flavobacteriaceae* зазнали деструкції ароматичні вуглеводні (включаючи ПАВ) більш ніж на 95% через 64 дні [13]. Мапелло у співавторстві [12] вказує, що деградація у морському середовищі ПАВ відбувається за допомогою *Cycloclasticus pugetii* і *Marinobacter hydrocarbonoclasticus*. Останні також окисляють

лінійні алкани. Мікроорганізми *Oceanisphaera litoralis*, *Pseudoalteromonas citrea*, *P. elyakovii*, виділені з морської води біля узбережжя о. Сахалін, розкладають бензинові фракції, нафту і моторне масло. Штам *P. citrea* виявився найбільш активним деструктором важких масляних фракцій [14]. Запропоновано спосіб очищення морської води від нафти й нафтопродуктів з використанням симбіозу водоростей та мікроорганізмів, що окислюють вуглець, використовуючи фільтр, що являє систему з'єднаних між собою синтетичних канатів, засаджених водоростями і заселених нафтоокислюючими мікроорганізмами [15]. Відомо, що у разі застосування асоціацій мікроорганізмів біодеградація нафти відбувається більш ефективно і у стисліші терміни, ніж у разі використання індивідуальних бактерій [16]. Важливим критерієм відбору мікроорганізмів для складання консорціуму була наявність катаболічних плазмідом. Бактерії, що містять плазмиди біодеградації, мають низку переваг у складі біопрепаратів для біоремедіації. Перш за все плазмідомісткі штами володіють розширеним спектром утилізованих вуглеводнів нафти. Водночас інтродукція мікроорганізмів – ефективних деструкторів нафти може значно збільшити деградативний потенціал аборигенної мікрофлори, позаяк у разі взаємодії бактерій у навколишньому середовищі відбувається обмін генетичною інформацією. Розроблено ефективну асоціацію плазмідомістких мікроорганізмів-деструкторів вуглеводнів нафти «ВіО». Штами утворюють асоціацію, є продуцентами біосурфактантів, що знижують в'язкість нафти та підвищують її біодоступність і здатні до деградації високих концентрацій нафти (до 30%) у широких діапазонах температур (4–42 °C) і рН (4–10) [17].

З метою зменшення забруднення морського середовища нафтою і нафтопродуктами під час експлуатації водного транспорту нафтомісткі води фільтруються і відокремлюються від нафти. Нафтовий шлам, що утворився, зазвичай становить до 2% від загальної кількості використаного палива. Для зберігання нафтового шламу на судні призначені спеціальні ємності – танки. Шлам накопичується в танках з подальшим його спалюванням в інсинераторі або здачею в порту з подальшою утилізацією. Якщо припустити, що судно в середньому за рік спалює близько 20000 тонн палива, то на судні в середньому за рік накопичується 4000 тонн нафтового шламу. У Світовому океані в активному стані знаходяться в середньому 550000 суден. На них за рік утворю-

ється понад два мільярди тонн шламу, який вимагає утилізації. У результаті його спалювання викидається в атмосферу понад шість мільярдів тонн діоксиду карбону. На наш погляд, можлива реконструкція танків для зберігання шламу з метою розмноження в них вуглеводноокислюючої мікробіоти. Звичайні танки повинні бути замінені або доповнені нафтошлямовими установками, в яких передбачена нейтралізація шламу культурою вуглеводноокислюючих мікроорганізмів. При цьому необхідно звернути увагу на хімічний склад шламу, який складається із залишків палива. У зв'язку з вимогами щодо зменшення концентрації сульфору багатосуднові компанії використовують низькосіркове дизельне паливо. До палива, яке використовують в інертсистемах, у парових котлах і за наявності скрубєрів, не висунуто вимог щодо обмеження максимально допустимої концентрації сульфору в паливі. У таких випадках використовується мазут. Мазут є сумішшю великої кількості різних компонентів, серед яких є деякі органічні сполуки, нафтові смоли, карб, вуглеводні з молекулярною масою 400–1000 г/моль. Під час розробки суднової нафтошлямової установки необхідно враховувати різноманітність хімічного складу шламу. У разі інтродукції мікробіоти до нафтошлямової установки обов'язково враховується максимально допустима концентрація шламу. Технологічний процес повинен забезпечити оптимальну кислотність середовища. Необхідно враховувати абсолютну аеробність мікроорганізмів, що окислюють вуглець. Отриману біомасу мікробіоти можна використовувати для біоремедіації Світового океану. У танках, в яких накопичується нафтовий шлам, також можливе розмноження мікроорганізмів, які синтезують біосурфактанти. Основною причиною, яка ускладнює мікробіологічне розкладання нафтопродуктів, є гідрофобність молекул вуглеводнів, що призводить як до їх сорбції на різних поверхнях і переходу в біологічно важкодоступну форму, так і до неможливості ефективного контакту з мікробними клітинами, що мають, як правило, гідрофільну зовнішню оболонку. Усунути цю перешкоду здатні біосурфактанти – різноманітні поверхнево-активні речовини, що синтезуються мікроорганізмами. Механізм їх дії пов'язаний з процесами десорбції органічних забруднювачів та їх переведенням у водну фазу і, як наслідок, підвищенням їх біодоступності для мікроорганізмів, а також з модифікацією зовнішньої поверхні бактерій шляхом гідрофобізації для забезпечення кращого контакту з молекулами

вуглеводнів [18]. Загальноприйнята точка зору на роль ПАР полягає в зростанні мікроорганізмів на вуглеводнях. Гідрофобні молекули акумулюються на вуглеводно-водній, повітряно-водній поверхнях, повітряній частині рослин з їх гідрофобним шаром воску, хітиновому скелеті членистоногих, вугіллі, дьогті, ґрунті, донних відкладеннях, що є привабливим джерелом харчування поверхнево-активних бактерій. Мікробіоти стають ідеальними молекулами та сприяють збільшенню взаємодії з цими природними поверхнями. У зв'язку з цим багатообіцяючим є використання поверхнево-активних продуцентів для зменшення в'язкості важких масел, видалення сірки з нафти, збільшення лігроїна з бітумінозних сланців та пісків. Можна отримати велику кількість різних продуктів (нуклеїнові кислоти, пігменти, полісахариди, амінокислоти) з дешевої вуглеводневої сировини. Загальна несприятлива обстановка, пов'язана із забрудненням водних ресурсів промисловими і стічними водами, пролитою на землю і воду нафтою, гнітючий стан портів і заток роблять необхідним пошук мікроорганізмів, що ростуть на вуглеводнях. Підвищена чутливість мікроорганізмів до таких субстратів може дозволити виділити біосурфактанти з поліпшеними поверхнево-активними характеристиками і використовувати їх як антизабруднювачі та природні антиадгезиви на поверхнях, схильних до дії води (обростання

днищ судів). Тому важко переоцінити екологічні проблеми, які пов'язані з поверхнево-активними штамами. Безперервне зростання кількості наукових публікацій у галузі мікробної взаємодії з поверхнями підтверджує величезний інтерес до цієї проблеми в таких країнах, як Японія, Німеччина, Франція, США.

Висновки. Нафтове забруднення Світового океану є актуальною екологічною проблемою. Нафта негативно впливає на біорізноманіття екосистем Світового океану. Аналізували можливості біодеградації нафти в морському середовищі за допомогою мікроорганізмів, що окислюють вуглець. Найбільш оптимальний варіант інтродукції мікробіоти, що окислює вуглець, є консорціуми, до складу яких входять мікроорганізми, що окислюють вуглець та мікроорганізми, що синтезують біосурфактанти. На морських судах накопичується нафтовий шлам у результаті сепарації нафтовмісних вод. У процесі його зберігання можливе культивування біомаси мікроорганізмів, що окислюють вуглець, а також може бути синтез біосурфактантів. З цією метою необхідно розробити конструкції нафтошлямової установки, що працюватиме на основі біодеструкції нафти мікроорганізмами, що окислюють вуглець. Також необхідно розробити технологію синтезу біомаси мікроорганізмів, що окислюють вуглець у виробничих масштабах.

Список літератури:

1. Bill Freedman. Oil pollution Environmental Ecology (Second Edition), 1995. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/oil-pollution>.
2. By Ismail M.K. Saadoun Impact of Oil Spills on Marine Life Submitted: October 7th 2014. Reviewed: February 26th 2015. Published: September 2nd 2013. DOI: 10.5772/60455.
3. Торский В.Г., Топалов В.П. МАРИПОЛ 73/78. Одесса : «Астропринт». С. 15–16.
4. Prince William Sound oil spill. URL: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Exxon_Va.
5. Oil Tanker Spill Statistics 2019. URL: <http://www.itopf.org/knowledge-resources/data-statistics/statistics/>.
6. Life Ismail M.K. Saadoun (September 2nd 2015). Impact of Oil Spills on Marine Life, Emerging Pollutants in the Environment – Current and Further Implications, Marcelo L. Larramendy and Sonia Soloneski, IntechOpen, DOI: 10.5772/60455. URL: <https://www.intechopen.com/books/emerging-pollutants-in-the-environment-current-and-further-implications/impact-of-oil-spills-on-marine-life>.
7. Hoang, A.T. A report of oil spill recovery technologies. *International Journal of Applied Engineering Research*. ISSN 0973-4562. Volume 13, Number 7. 2018. Pp. 4915–4928.
8. Долгополова В.Л. Способы очистки морских акваторий от нефтяных загрязнений / В.Л. Долгополова, О.В. Патрушева. *Молодой ученый*. 2016. № 29 (133). С. 229–234. URL: <https://moluch.ru/archive/133/37456/> (дата звернення: 27.07.2020).
9. Гоголева О.А. Каталазная активность углеводородоксиляющих бактерий : дис. ... канд. биол. наук : 03.02.03. Оренбург, 2012. 147 с.
10. Коваленко В.В. Изоляты актиномицетов деструкторов нефтяных углеводородов / В.В. Коваленко, А.И. Фахрутдинов, Т.Д. Ямпольская. *Прорывные научные исследования как двигатель науки* : сб. статей междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 2. Уфа: АЭТЕРНА, 2018. С. 35–39.
11. Santisi S. Biodegradation of crude oil by individual bacterial strains and a mixed bacterial consortium / S. Santisi, S. Cappello, M. Catalfamo et al. *Braz. J. Microbiol.* 2015. V. 46, No. 2. Pp. 377–387.
12. Mapelli F. Biotechnologies for marine oil spill cleanup: indissoluble ties with microorganisms / F. Mapelli, A. Scoma, G. Michoud et al. *Trends Biotechnol.* 2017. V. 35, No. 9. Pp. 860–870.

13. Brakstad O.G. Microbial communities related to biodegradation of dispersed Macondo oil at low seawater temperature with Norwegian coastal seawater / O.G. Brakstad, M. Throne-Holst, R. Netzer et al. *Microbiol. Biotechnol.* 2015. V. 8, No. 6. Pp. 989–998.

14. Струппуль Н.Э. Исследование нефтеокисляющей способности морских микроорганизмов *Pseudoalteromonas citrea*, *Pseudoalteromonas elyakovii* и *Oceanisphaera litoralis* / Н.Э. Струппуль, Е.А. Сигида, Н.Н. Трофименко и др. *Нефтегазовое дело*. 2009. № 2. URL: http://ogbus.ru/authors/Struppul/Struppul_1.pdf.

15. Нетрусов А.М. Способ очистки воды от нефти и нефтепродуктов / А.М. Нетрусов, А.И. Семенов, Е.В. Семенова и др. Патент РФ № 2412913. Заявл. 25.12.2008. Опубл. 27.02.2011. Бюл. № 6.

16. Сидоренко О.Д., Войно Л.И., Павликова Т.А. Влияние нефти на микрофлору почв и подбор ассоциации микроорганизмов, способных к ее деструкции. *Качество и безопасность продовольственного сырья и продуктов питания* : сб. статей 256-й Всероссийской научно-технической конференции-выставки. Москва : Изд-во МГУП, 2002. С.176–178.

17. Ветрова А.А. Сравнительная эффективность деградации нефтепродуктов консорциумом плазмидо-содержащих штаммов-деструкторов и биопрепаратами «МикроБак», «Биоойл» / А.А. Ветрова, А.А. Иванова, А.Е. Филонов и др. *Известия Тульского гос. ун-та. Естеств. науки*. 2013а. Вып. 2, ч. 1. С. 258–272.

18. Mao X. Use of surfactants for the remediation of contaminated soils: a review / X. Mao, R. Jiang, W. Xiao, J.J. Yu. *Hazard. Mater.* 2015. V. 285. Pp. 419–435.

Kirsanova V.V., Bykovets N.P., Chumachenko M.N., Brazhnik I.D. SHIP OIL SLUDGE AS AN ELEMENT OF BIODEGRADATION OF OIL POLLUTION OF THE WORLD OCEAN

The pollution of the oceans with oil and oil products is a dangerous environmental problem. Oil spills are registered during offshore oil production and processing, during the operation of water transport. Part of the oil pollution gets into the marine environment with industrial and municipal wastewaters, as well as with river flows.

Petroleum hydrocarbons are toxic to all living organisms and have a negative effect on trophic connections and the circulation of substances. They have a negative affect the biodiversity of the ecosystems of the World Ocean and cause them great damage. We pointed to the prospects of bioremediation of the marine environment in the process of biodegradation of oil with the help of carbon-oxidizing microorganisms and analyzed the features of their strains. Bacteria containing biodegradation plasmids have an extended spectrum of utilized petroleum hydrocarbons.

We paid attention to the need of creation consortia of strains of carbon-oxidizing microorganisms, which include carbon-oxidizing microorganisms and microorganisms that synthesize biosurfactants. Oil sludge accumulates on ships as a result of the separation of oily waters. In the process of its storage, it is possible to cultivate the biomass of carbon-oxidizing microorganisms, as well as to synthesize biosurfactants.

For this purpose, it is necessary to develop the design of a ship's oil sludge plant which is operating on the basis of oil biodegradation by carbon-oxidizing microorganisms. It is necessary to pay attention to the chemical composition of the sludge, which consists of fuel residues. It is also necessary to develop a technology for the synthesis of biomass of carbon-oxidizing microorganisms in production scales. When introducing microbiota into an oil sludge plant, the maximum permissible concentration of sludge must be taken into account. The technological process must ensure the optimum acidity of the medium. It is necessary to take into account the absolute aerobicity of carbon-oxidizing microorganisms. The obtained biomass of the microbiota can be used for bioremediation of the World Ocean. In tanks in which oil sludge accumulates, it is also possible the reproduction of microorganisms which synthesize biosurfactants.

Key words: oil, oil pollution, hydrocarbon-oxidizing microorganisms, oil sludge, biosurfactants.

Кухтик Н.О.

Національний транспортний університет

УТОЧНЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ АВТОМОБІЛЯ З УРАХУВАННЯМ ПРОГРІВАННЯ ДВИГУНА В ПРОЦЕСІ РУХУ

Робота присвячена можливості математичного моделювання роботи легкового автомобіля у разі невизначеності умов експлуатації. Двигун автомобіля є споживачем палив нафтового походження і джерелом викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище. Параметри середовища суттєво впливають на рівень викидів, особливо після запуску холодного двигуна та в період прогрівання двигуна. Зміна параметрів середовища найчастіше нехтується під час математичного моделювання складної технічної системи, якою є автомобіль з двигуном внутрішнього згорання.

У роботі представлена концепція моделі, яка включає можливість врахування параметрів середовища для визначення рівня забруднення атмосферного повітря шкідливими викидами автомобільного двигуна.

Перехід від натуральних фізичних показників об'єктів моделювання до безрозмірних коефіцієнтів дає змогу універсалізувати моделі і створити віртуальні об'єкти, які замінюють реальні об'єкти. При цьому всі ознаки реальних об'єктів забезпечуються модельованими системами.

Математична модель була розроблена на базі вже наявних моделей, що раніше були створені на кафедрі «Двигуни та теплотехніка» Національного транспортного університету.

Математична модель забезпечує імітацію руху автомобіля з бензиновим двигуном та системою нейтралізації відпрацьованих газів за режимами міської частини Європейського їздового циклу з урахуванням зміни температурного стану двигуна автомобіля в період прогрівання в русі.

Коефіцієнти впливу температурного стану двигуна на кінцеві експлуатаційні показники автомобіля з двигуном внутрішнього згорання і системою нейтралізації зі зворотним зв'язком розраховують за результатами експериментальних випробувань автомобіля за режимами Європейського їздового циклу.

Ключові слова: математична модель, двигун, витрата палива, забруднюючі речовини, навколишнє середовище.

Постановка проблеми. Розрахункові методи досліджень у сучасних умовах виступають пріоритетними у зв'язку зі складністю, а іноді і неможливістю проведення великого обсягу натурних експериментів. Широке використання комп'ютерної техніки для моделювання фізичних об'єктів дає змогу більш точно дослідити проблему і встановити взаємозв'язок між більшим числом факторів, що впливають на результат. Тому створення якісної математичної моделі, що враховує досліджувану проблему, є важливим науковим завданням.

Формулювання цілей статті. Ця стаття присвячена інформуванню наукової спільноти про один зі шляхів вирішення проблеми врахування зміни стану технічного об'єкта, зокрема температурного стану, у разі створення математичних моделей складних технічних систем.

Виклад основного матеріалу дослідження. Математична модель руху транспортного засобу імітує умовний рух у найбільш характерних режимах руху для типової експлуатації легкового автомобіля. Найбільше автомобілів зосереджено та експлуатується у великих

містах, таких як Київ, Харків, Дніпро, Львів, Житомир та інші.

Режими руху автомобіля для великих міст ефективно відображає міська частина Європейського їздового циклу, яка відповідає Правилам СЕК ООН 83-05 [1].

Європейський їздовий цикл складається з двох частин (рис. 1). Тривалість виконання циклу становить 1180 с. Перша частина – це міський їздовий цикл UDC (Urban Driving Cycle) з максимальною швидкістю руху 50 км/год, який включає чотири однакові послідовні фрагменти режимів зміни швидкості, що нагадує умови руху автомобіля по місту. Друга частина циклу – швидкісний заміський цикл EUDC (Extra Urban Driving Cycle) з максимальною швидкістю руху 120 км/год (або 90 км/год для автомобіля з меншою максимальною швидкістю), який відтворює умови руху автомобіля магістрально.

Їздовий цикл повністю відтворює експлуатаційні умови: роботу двигуна автомобіля в режимі мінімальної частоти обертання активного холостого ходу та підвищеної частоти обертання холостого ходу перед початком руху, рух автомобіля

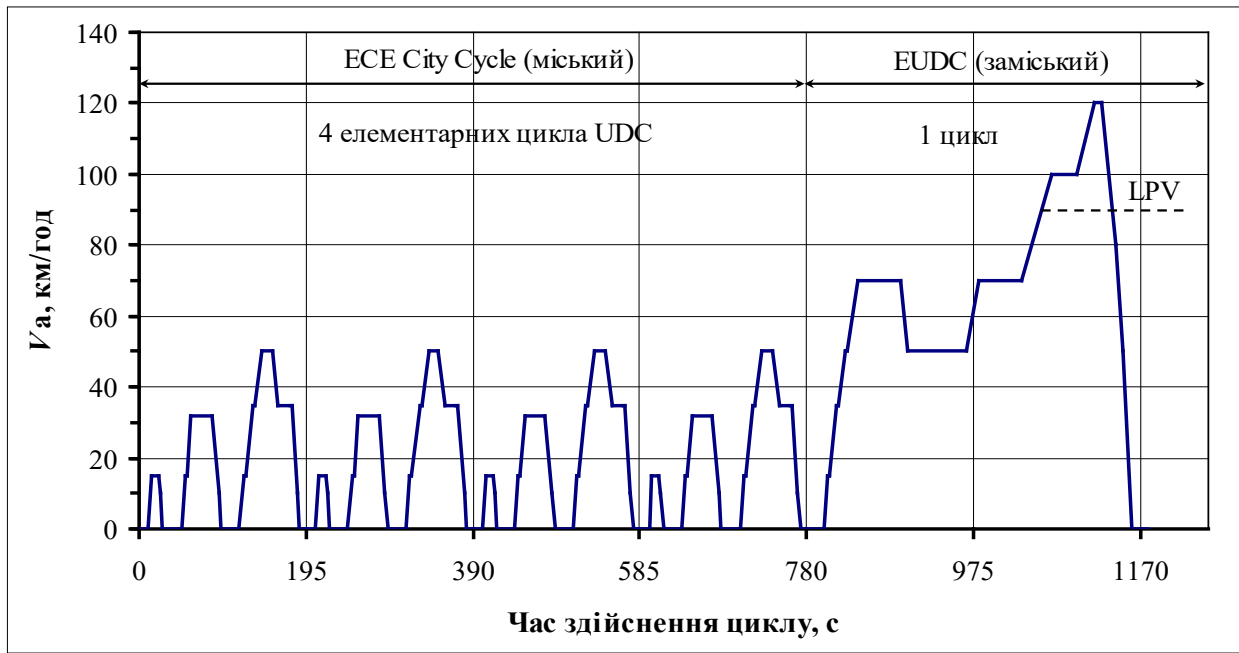


Рис. 1. Новий Європейський їздовий цикл (NEDC)

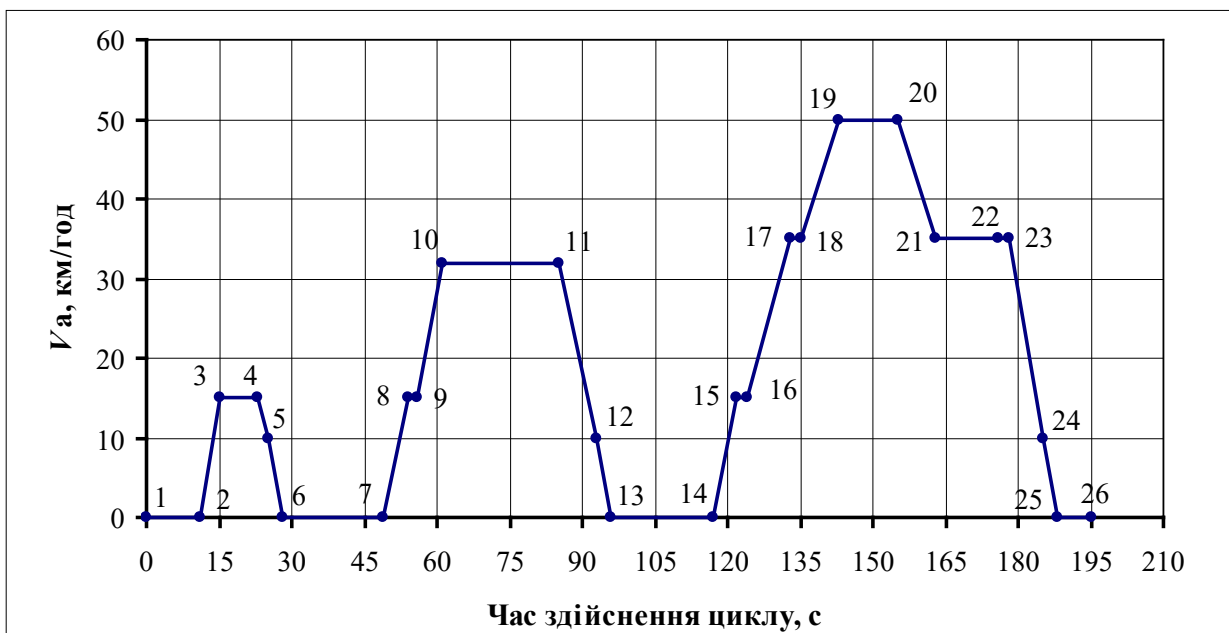


Рис. 2. Фрагмент міської частини Європейського їздового циклу

з місця і розгін до певної швидкості, рух зі сталою швидкістю нетривалий час, перемикання передач з нижчої на вищу або у зворотному порядку, розгін автомобіля від однієї швидкості до іншої, гальмування двигуном для зменшення швидкості, службове гальмування до повної зупинки з використанням робочої гальмівної системи.

Оскільки чотири фрагменти міських режимів є однаковими, розглянемо детально один фрагмент міських режимів руху автомобіля (рис. 2).

Математична модель базується на моделі, створеній на кафедрі «Двигуни та теплотехніка» Національного транспортного університету [2, с. 73]. Математичні залежності дають змогу розрахувати паливну економічність та викиди забруднюючих речовин у разі умовного руху автомобіля у відповідності до режимів Європейського їздового циклу на кожному з етапів проходження певного режиму і загалом за їздовий цикл. Модель характеризує систему, що об'єднує три підсистеми:

автомобіль – дорога – водій. Для визначення впливу температури атмосферного повітря на експлуатаційні показники автомобіля та екологічне навантаження на середовище необхідно врахувати залежність рівня викидів забруднюючих речовин від температурного режиму двигуна та ввести до моделі додаткову підсистему – середовище.

Математична модель руху автомобіля – це система диференціальних рівнянь тягового балансу, якими встановлюються залежність зміни крутного моменту двигуна від умовної швидкості руху автомобіля або його прискорення чи сповільнення. Під час випробування автомобіля на стенді крутний момент двигуна визначається як сума моментів на подолання сил опору коченню на стенді з біговими барабанами, умовного опору повітря, а також сил інерції рухомих мас [3, с. 64].

За роботи двигуна автомобіля в режимі мінімальної частоти обертання холостого ходу на ділянках циклу 1–2, 6–7, 13–14, 25–26 (рис. 2) ефективний крутний момент двигуна M_k дорівнює нулю.

Показники двигуна, а саме годинну витрату палива, годинну витрату повітря, концентрації забруднюючих речовин, визначають як функції $f(n)$, де n – частота обертання колінчастого валу. Залежно від температури t_0 атмосферного повітря витрата палива корегується коефіцієнтом температури K_T .

На інших ділянках фрагменту циклу двигун працює під навантаженням, яке визначається моментом опору руху автомобіля $M_{оп}$.

У визначенні режимів циклу приймається, що рух автомобіля здійснюється на рівній, горизонтальній ділянці дороги і рівняння тягового балансу може бути представлено у скороченому вигляді:

$$M_{оп} = \frac{\left[(m_0 + m_{ван}) \cdot f \cdot g + kF \left(\frac{V_a}{3,6} \right)^2 \right] \cdot r_d}{U_i \cdot U_{гп} \cdot \eta_T},$$

де m_0 – власна маса автомобіля, кг. Для автомобіля Hyundai Getz $m_0 = 1143$ кг [4, с. 153];

V_a – швидкість руху автомобіля, км/год;

$m_{ван}$ – маса вантажу, кг. За умовами випробування легкових автомобілів за режимами Європейського ізового циклу $m_{ван} = 100$ кг [5, с. 2];

f – коефіцієнт опору коченню автомобіля;

kF – фактор обтічності автомобіля, Н·с²/м²;

r_d – динамічний радіус колеса, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$U_i, U_{гп}$ – передаточні числа коробки передач і головної передачі відповідно;

η_T – ККД трансмісії, $\eta_T = 0,88 \dots 0,92$.

Крім цього, треба зазначити, що за руху з постійною швидкістю $M_{оп} - M_{оп} = 0$, а за прискорення чи сповільнення:

$$M_k - M_{оп} = \left(I_d + \frac{1}{\eta_T} \cdot I_{пр} \right) \cdot \frac{d\omega_d}{dt},$$

де I_d – момент інерції двигуна, кг·м²;

$I_{пр}$ – приведений до зчеплення момент інерції рухомих мас автомобіля, кг·м²;

$\frac{d\omega_d}{dt}$ – кутове сповільнення колінчастого валу двигуна, с⁻².

Паливна економічність та екологічні показники автомобіля найбільш повно характеризують транспортний засіб як споживача палива і джерело забруднення навколишнього середовища.

Масові викиди забруднюючих речовин розраховують за концентраціями цих речовин, годинними витратами палива G_n (кг/год), значеннями коефіцієнта надміру повітря α та розрахованими числовими коефіцієнтами, наприклад:

$$G_{CO} = \frac{28 \cdot C_{CO}}{100} \cdot (0,135713 + 0,33242 \cdot \alpha) \cdot G_n \text{ при}$$

$\alpha < 1$.

Коефіцієнти впливу температурного стану двигуна на витрату палива і концентрації забруднюючих речовин (ЗР) у відпрацьованих газах (ВГ) розраховують за результатами експериментальних випробувань. Ці коефіцієнти являють собою відношення поточних витрат палива і концентрацій ЗР у процесі прогрівання двигуна до цих показників у разі випробування автомобіля з прогрітим двигуном залежно від температури охолодної рідини.

Коефіцієнти впливу температурного стану двигуна на витрату палива і концентрації ЗР у ВГ представляють у вигляді залежності від часу виконання ізового циклу та температури охолодної рідини. Поточну витрату палива і концентрації ЗР у ВГ у процесі прогрівання двигуна визначають як добуток коефіцієнтів впливу температурного стану двигуна на значення цих показників під час випробування автомобіля з прогрітим двигуном.

Для визначення впливу підігрівання повітря на впуск в двигун на паливну економічність і викиди ЗР автомобілем, виходячи з температури охолодної рідини на початку випробування і прийнявши закономірність її зміни такою ж як без підігрівання, розраховують відношення коефіцієнтів впливу температурного стану двигуна з підігрівом і без підігріву. Це відношення і визначає очікувану зміну показників роботи двигуна. Надалі визначають поточну витрату палива

і концентрації ЗР у ВГ та витрату палива і викиди ЗР за процес прогрівання двигуна автомобіля до нормального теплового стану. Використовуючи отримані результати, можна досліджувати, як впливає тепловий режим двигуна на початку прогрівання на показники паливної економічності та екологічні показники автомобіля та вплив інших експлуатаційних факторів.

Одним з основних питань у оцінці впливу процесу прогрівання двигуна є визначення впливу цього процесу на витрату палива.

Визначення температури охолодної рідини двигуна в процесі експериментального відтворення Європейського їздового циклу [6, с. 36] автомобілем з непрогрітим двигуном показало, що прогрів завершується за два фрагменти міської частини їздового циклу.

Але при цьому миттєва витрата палива (л/год) змінюється дуже інтенсивно і не дає змоги провести порівняння величин у режимах розгону і сповільнення. У зв'язку з цим для порівняння були застосовані більш статичні режими руху автомобіля зі сталими швидкостями: 15, 32 і 50 км/год і робота двигуна в режимі мінімальної частоти обертання холостого ходу. Ці заміри найбільш достовірні.

Заміряні величини годинної витрати палива ($V_{п}$, л/год) у разі швидкостей 15, 32 і 50 км/год

у різних фрагментах міської частини циклу показані на рис. 3.

Як видно з показаних залежностей, годинна витрата палива у разі всіх швидкостей руху по мірі прогрівання двигуна зменшується, але характер змінювання дещо відрізняється.

У процесі прогрівання двигуна змінюється годинна витрата бензину за роботи двигуна в режимі мінімальної частоти обертання холостого ходу (рис. 4). Як видно з наведених даних, по мірі прогріву годинна витрата палива $V_{п}$ зменшується.

Оскільки тепловий стан двигуна можна оцінити температурою охолодної рідини, доцільно визначити залежність цієї температури від часу проходження автомобілем циклу з використанням надалі залежності витрати бензину від температури і розрахунку коефіцієнтів впливу температурного стану. Залежність температури охолодної рідини від часу проходження автомобілем циклу, отримана в експерименті, показана на рис. 5.

Всі показані залежності описані поліномами, приведеними на рисунках. Ці поліноми можна використати в розрахункових дослідженнях.

Висновки. Уточнено математичну модель руху автомобіля Hyundai Getz за режимами Нового Європейського їздового циклу. Визначено основні залежності для визначення паливної

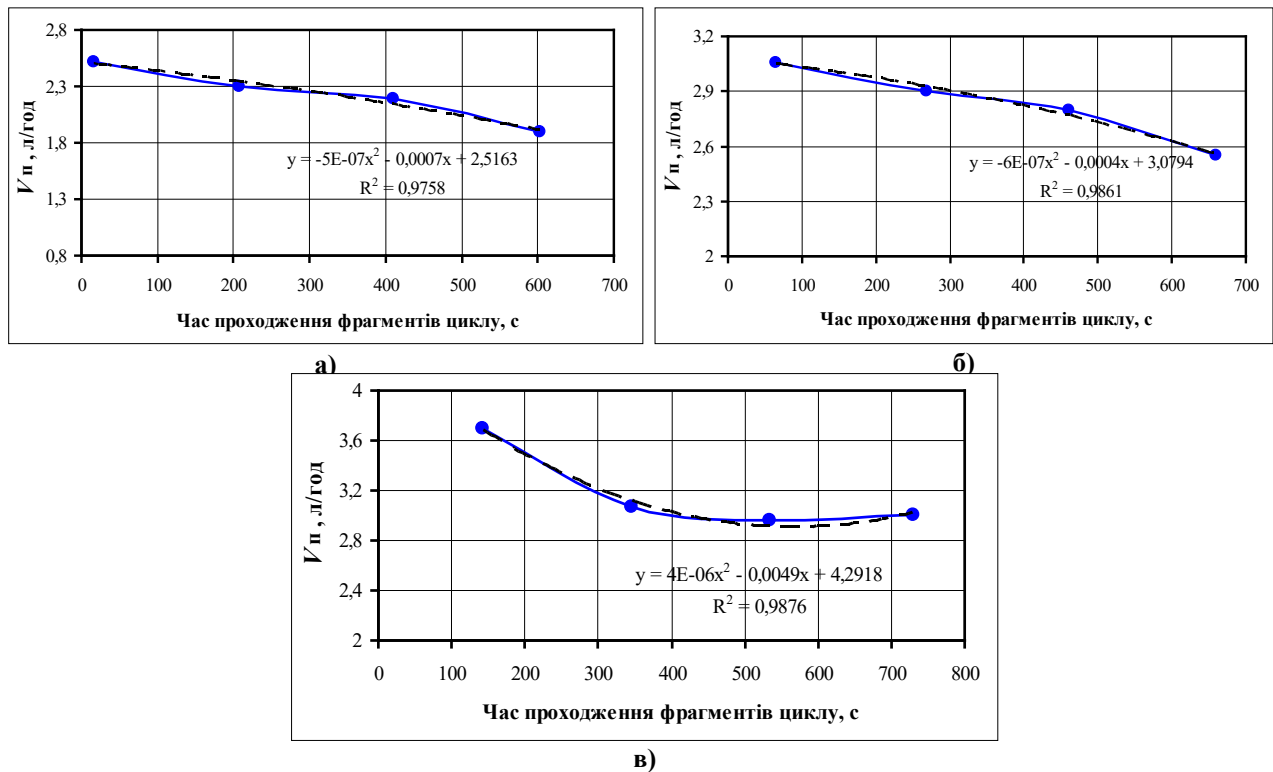


Рис. 3. Зміна годинної витрати палива у разі сталої швидкості руху автомобіля: а) у разі 15 км/год; б) у разі 32 км/год; в) у разі 50 км/год

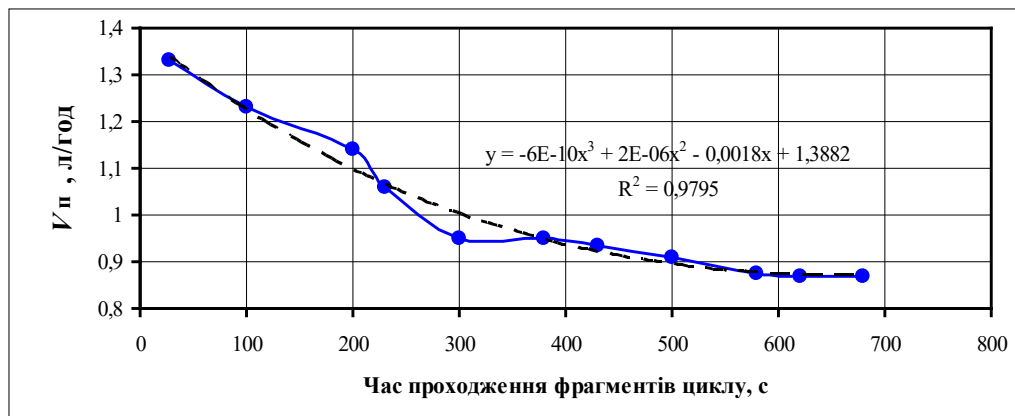


Рис. 4. Зміна витрати палива під час роботи двигуна в режимі холостого ходу за фрагментами міського їздового циклу

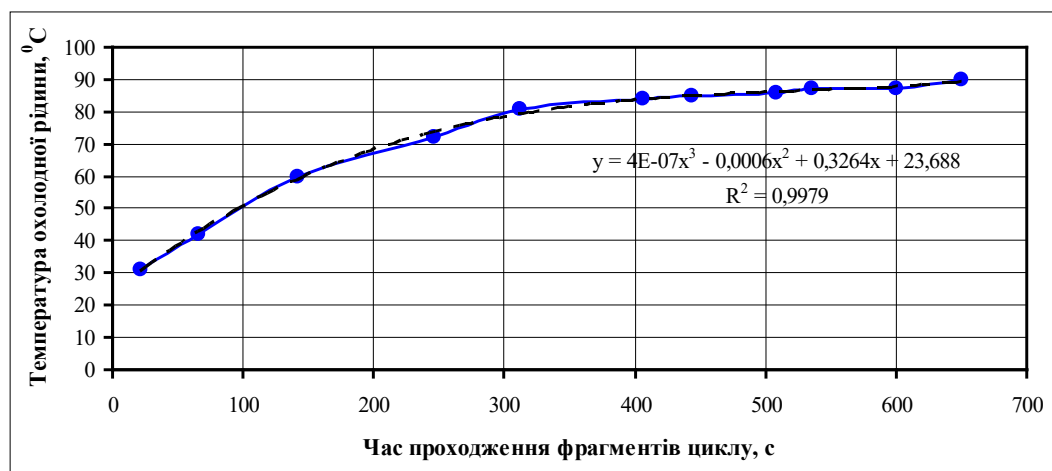


Рис. 5. Зміна температури охолодної рідини у разі проходження міської частини циклу з непрогрітим двигуном

економічності та екологічних показників автомобіля в процесі руху за їздовим циклом. Запропоновано методику врахування температурного стану двигуна автомобіля в математичній моделі. Експериментально встановлені залеж-

ності витрати палива в період прогріву двигуна, які дають змогу встановити коефіцієнти температурного впливу на витрату палива за умовного руху автомобіля міською частиною Європейського їздового циклу.

Список літератури:

1. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження колісних транспортних засобів стосовно викидів забруднювальних речовин залежно від палива, необхідного для двигунів (Правила ЕЭК ООН № 83–05:2005, IDT): ДСТУ UN/ECE R 83–05:09. (Чинний від 2009–10–01). Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 343 с. (Національні стандарти України).
2. Гутаревич Ю. Снижение вредных выбросов и расхода топлива двигателями автомобилей путем оптимизации эксплуатационных факторов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.10, 05.04.02. Киев, 1985. 538 с.
3. Кульбако В.П. Покращення екологічних показників автомобіля в експлуатаційних умовах додавкою біоетанолу до бензину : дис ... канд. техн. наук : 05.22.20. Київ, 2012. 212 с.
4. Кухтик Н.О. Вплив методу прогріву на витрату палива автомобілем з двигуном із системою впорскування бензину. / Кухтик Н.О., Кухтик В.В. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» (за галузями знань «Технічні науки»). Луцьк, 2018. Випуск 62. С. 152–156.
5. Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний: ГОСТ 20306-90. (Чинний від 1992-01-01). Москва : Изд-во стандартов, 1991. 32 с. (Національний стандарт України).

6. Кухтик Н. Порівняння витрати палива та викидів шкідливих речовин непрогрітого та прогрітого двигуна легкового автомобіля за Європейським їздовим циклом. Systemy i środki transportu samochodowego. Badania i technologia silników spalinowych. Wybrane zagadnienia. Monografia. Nr 17. Seria: Transport. Rzeszów. 2019. Pp. 35–41.

Kukhtyk N.O. SPECIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE VEHICLE MOVEMENT TAKING INTO ACCOUNT HEATING OF THE ENGINE IN THE PROCESS OF MOVEMENT

The work is devoted to the possibility of mathematical modeling of the car work in case of uncertainty of operating conditions. The car's engine is a consumer of petroleum fuels and a source of pollutant emissions into the environment. Environmental parameters significantly affect the level of emissions, especially after starting the cold engine and during the engine warm-up period. Changing the parameters of the environment is often neglected in the mathematical modeling of a complex technical system, which is a car with an internal combustion engine.

The work presents the concept of the model, which includes the ability to take into account the parameters of the environment at determining the level of air pollution by harmful emissions from the car engine.

The transition from natural physical parameters of modeling objects to dimensionless coefficients allows to universalize models and create virtual objects which replace real objects. In this case, all features of real objects are provided by simulated systems.

The mathematical model was developed on the basis of existing models that were previously created at the Department of Engines and Heating Engineering of the National Transport University.

The mathematical model provides simulation of the movement of a car with a gasoline engine and a neutralization system of exhaust gases according to the modes of the urban part of the European driving cycle, taking into account changes in temperature of the car engine during warm-up.

The coefficients of influence of the engine temperature state on the final performance indicators of a car with an internal combustion engine and a feedback neutralization system are calculated based on the results of experimental tests of the car according to the modes of the European driving cycle.

Key words: *mathematical model, engine, fuel consumption, pollutants, environment.*

Табуненко В.О.

Харківський національний університет Повітряних сил імені Івана Кожедуба

Марценяк О.П.

Національна академія Національної гвардії України

Кужелович В.І.

Національна академія Національної гвардії України

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАТРУЛЮВАННЯ В ЗОНІ РОЗВЕДЕННЯ ВІЙСЬК ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Шостий рік на сході України триває гібридна війна. Бойові втрати кожен день збільшуються. Розведення військ у зоні проведення бойових дій дасть змогу створити ділянки безпеки для роботи міжнародних гуманітарних організацій, а також провести розмінування території. Для забезпечення виконання розведення військ та безпеки місцевих жителів необхідний контроль дій незаконних збройних формувань із боку Національної гвардії України та Національної поліції. До сих пір немає єдиної методики оцінювання ефективності проведення патрулювання, що спиралася б на об'єктивні показники оцінювання: ймовірність виконання завдань із патрулювання; коефіцієнт оперативності виконання завдань, коефіцієнт ресурсозабезпечення перевезень, які своєю чергою визначаються через коефіцієнт оперативної готовності машин; ймовірність подолання маршруту руху машинами; ймовірність виконання завдання з патрулювання; ймовірність уникнення втрат у процесі протидії диверсійно-розвідувальним групам або порушникам від незаконних збройних формувань. Зі зміною військової обстановки з'являються нові концепції і неординарні погляди на перегляд проведення патрулювання як у мирний час, так і у воєнний період. З огляду на обстановку, що склалася при розведенні військ у зоні бойових дій на сході України, потрібні перегляд традиційного проведення й оцінювання ефективності патрулювання з використанням як різних зразків автомобільної техніки, так і пішого патрулювання, з метою недопущення неефективного витрачання економічних ресурсів. Стає очевидним, що, здійснюючи патрулювання в зоні розведення військ в умовах бойових дій, необхідно проводити планування та оцінювання варіантів технічних рішень для вибору таких із них, що можуть дати максимальний економічний ефект. У роботі запропоновано показник ефективності, який дає змогу оцінити фактичний рівень використання різних марок автомобілів в умовах патрулювання в зоні розведення військ.

Ключові слова: зона розведення військ, автомобільна техніка, показник ефективності патрулювання, ймовірність виконання патрулювання, коефіцієнт ресурсозабезпечення.

Постановка проблеми. Шостий рік на сході України триває гібридна війна. Бойові втрати кожен день збільшуються. Мирні ініціативи президента України припускають розведення військ, які дадуть змогу створити окремі ділянки безпеки для роботи міжнародних гуманітарних та інших організацій, підвищити безпеку місцевого населення, а також провести розмінування території. Українські засоби масової інформації повідомляють, що розведення військ не обмежиться Станицею Луганською, Золотим та Петрівським. На черзі до списку демілітаризованої зони можуть опинитися Широкине, Павлопіль, Піски, Опитне, Світлодарськ, Кримське та інші. Нині лінія розмежування між контрольованою та неконтрольованою територіями на Донбасі має протяжність

410 км. Розведення військ має відбуватися на відстань 1 км дзеркально від лінії розмежування, а представники незаконних збройних формувань також мають відвести свою техніку та бойовиків [1]. У Міністерстві внутрішніх справ пояснили, що навіть за умови можливого відведення Збройних сил України (далі – ЗСУ) в Золотому залишаться українські поліцейські та Нацгвардія, які патрулюватимуть місцевість, як у Станиці Луганській [2]. Керівник поліції, В. Троян, заступник командувача Операції Об'єднаних Сил, заявив, що нині з нашої сторони діють чотири патрулі в Золотому-4 та два патрулі в Катеринівці, крім того, використовуються автопатрулі, які працюють по усьому Золотому, та ще є піші патрулі спільно з Національною гвардією України [3].

Міністерство оборони ЗСУ пояснює, що процес розведення військ реалізується в рамках досягнутих у попередні роки домовленостей, а ЗСУ продовжують стояти на захисті суверенітету держави, дозволяючи дипломатичним шляхом відновити територіальну цілісність України. Законодавством України передбачено право військовослужбовців застосовувати вогневі засоби в разі загрози їхньому життю та здоров'ю. Розведення військ має бути не тільки дзеркальним, але й синхронним, тобто має здійснюватися обома сторонами. Основна умова початку розведення військ – дотримання режиму припинення вогню на окремій заздалегідь зумовленій ділянці місцевості протягом 7 днів. Якщо незаконні збройні формування проігнорують такі домовленості і спробують повернутися на попередні позиції, то українські військовослужбовці будуть діяти адекватно. Тому у процесі відведення військовослужбовців ЗСУ та їх техніки контролювати безпеку мирних жителів та виконання умов розведення військ будуть представники Національної гвардії України (НГУ) і співробітники Національної поліції. Таким чином, Україна не відмовляється від збройного контролю місцевості та населених пунктів. Захід будь-яких сил незаконних збройних формувань або окремих порушників буде попереджатися та прискікатись. При цьому основні місця розташування з районів розведення військ залишаються під контролем ЗСУ.

Основа парку НГУ та національної поліції штатних засобів становить автомобільна техніка (далі – АТ), для перевезення особового складу, озброєння, боєприпасів, спеціальних засобів під час виконання службово-бойових завдань. АТ є основою забезпечення не тільки рухливості підрозділів, а й одним з основних засобів проведення патрулювання під час розведення військ у зоні проведення бойових дій. Зі зміною військової обстановки з'являються нові концепції і неординарні погляди на перегляд проведення патрулювання як у мирний час [4], так і у воєнний період [5]. З огляду на обстановку, що склалася в процесі розведення військ у зоні бойових дій на сході України, потрібні перегляд традиційного проведення і оцінювання ефективності патрулювання як із використанням різних зразків АТ, так і пішого патрулювання, з метою недопущення неефективного витрачання економічних ресурсів. На забезпечення ресурсами частин і їх підрозділів дедалі більше впливає ринкова економіка, внаслідок чого виникають нові проблеми ефективного використання палива. Стає очевидним,

що, здійснюючи патрулювання в зоні розведення військ в умовах бойових дій, необхідно проводити планування та оцінювання варіантів технічних рішень і вибирати ті з них, що дають максимальний економічний ефект. Крім визначення єдиного підходу оцінювання ефективності проведення патрулювання в зоні розведення військ в умовах бойових дій різними способами, які дадуть змогу виявити основні напрями підвищення ефективності використання АТ і сформулювати та обґрунтувати пропозиції і практичні рекомендації в рамках такого оцінювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Визначенням поняття «ефективність» займалося багато вітчизняних та закордонних вчених, серед яких можна назвати В. Андрійчука, П. Друкера, Г. Емерсона, Б. Жнякіна, Ф. Кене, А. Куценко, Т. Котарбинського, С. Мочерного, І. Павленко, В. Петті, С. Покропивного, Д. Рікардо, К. Салигу, Н. Терещенко та багато інших. В роботі [6] В. Петті, Ф. Кене визначають «ефективність» як результативність управління стосовно дій такого суб'єкта управління, як уряд держави. Д. Рікардо вважає, що це економічна категорія, яка визначає співвідношення результату і визначеного виду витрат [7]; В. Андрійчук вважає, що це результативність певної дії, процесу, що вимірюється співвідношенням отриманого результату і витрат, що його спричинили [8]. С. Мочерний [9] визначає ефективність як здатність приносити ефект, результативність процесу, проєктів, які визначаються як відношення ефекту, результату до витрат. Б. Жнякін, В. Краснова [10] визначають її як співвідношення результату (ефекту) з витратами, що викликали цей ефект. Взагалі можна зробити висновок, що більшість вчених пов'язують поняття «ефективність» із «результативністю», та нині немає єдиного підходу до визначення поняття «ефективність».

Аналіз наукової літератури свідчить, що ефективність – це найбільш загальна, визначальна властивість будь-якої цілеспрямованої діяльності, що розкривається через категорію мети й об'єктивно виражається ступенем її досягнення з урахуванням витрат ресурсів і часу [11].

Основою наукових досліджень оцінювання ефективності патрулювання в зоні розведення військ із використанням АТ до виконання завдань є теорія ефективності застосування військової техніки, технічна експлуатація машин, теорія надійності виробів техніки, теорія ймовірностей та математична статистика [12–14]. Основні залежності, що використовуються в процесі визначення рівня

ефективності застосування АТ, наведені в роботах «Автотехнічне забезпечення частин та підрозділів внутрішніх військ МВС України» та «Основи технічного забезпечення. Обґрунтування рішень» [15; 16]. Пропозиції з оцінки показників ефективності застосування та боєготовності сучасних зразків техніки наведені в роботі «Теорія надійності та живучості елементів і систем літальних комплексів» [17]. У роботах «Автотехнічне забезпечення частин та підрозділів внутрішніх військ МВС України» та «Основи технічного забезпечення. Обґрунтування рішень» [15; 16] розроблені аналітичні залежності коефіцієнтів боєготовності озброєння та військової техніки військових формувань від вихідних параметрів технічного забезпечення. У роботах П.П. Чабаненко, А.В. Ковтун і В.О. Табуненко [18; 19] наведено аналіз умов використання моделей ефективності систем; в інших працях виділені особливості визначення показника ефективності військових перевезень колонами АТ [20] та шляхи підвищення ефективності використання АТ військовими підрозділами [21].

Показники ефективності мають забезпечувати: повноту інформації, що міститься в них; однозначність кількісного вираження; чутливість до експлуатаційних факторів; простоту використання і визначення з мінімальними витратами засобів і часу; наочність і ясний фізичний зміст [11; 14].

Постановка завдання. Метою статті є проведення аналізу коефіцієнта ефективності патрулювання в зоні розведення військ із використанням різних марок автомобільної техніки, які уможливають висновки щодо ефективності їх використання та попереднього планування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для обґрунтування та проведення аналізу коефіцієнта ефективності патрулювання в зоні розведення військ із використанням різних способів дій та попереднього планування необхідно задати вихідну обстановку. Припустимо, що:

1) ділянка патрулювання зони розведення військ та забезпечення безпеки місцевих жителів становить 9 км;

2) відстань від пункту постійної дислокації сил НГУ та Національної поліції до ділянки патрулювання становить 10 км;

3) відстань від місця тимчасової дислокації підрозділів ЗСУ до зони розведення військ становить 1 км;

4) затверджена планова витрата коштів на паливо на одну добу $C_{зapl.} = 300$ грн;

5) ціна 1 л ДП на час розрахунків становить близько 21 грн;

6) ціна 1 л бензину А-95 становить близько 22 грн.

Для проведення патрулювання пішими патрулями НГУ та Національної поліції визначено доставку особового складу на ділянку патрулювання, розвезення по маршрутах, збору та доставки назад до пункту постійної дислокації, що проводиться автобусом «БОГДАН А091» (розхід пального на 100 км становить 26,5 л ДП);

Для оцінки ефективності проведення патрулювання визначимо коефіцієнт ефективності патрулювання ($K_{\text{еф.патрул.}}$) пішими патрулями:

$$K_{\text{еф.патрул.}} = P_{\text{патр.}} \cdot K_{\text{опер.}}(t) \cdot K_{\text{рес.заб.}} \quad (1)$$

де $P_{\text{патр.}}$ – ймовірність виконання завдань із патрулювання;

$K_{\text{опер.}}(t)$ – коефіцієнт оперативності виконання завдань із патрулювання;

$K_{\text{рес.заб.}}(C)$ – коефіцієнт ресурсозабезпечення перевезень.

Визначимо ймовірність виконання завдань із патрулювання пішими патрулями:

$$P_{\text{патр.}} = K_{\text{ог}} \cdot P_{\text{марш.}} \cdot P_{\text{вик.завд.}} \cdot P_{\text{прот.}} \quad (2)$$

де $K_{\text{ог}}$ – коефіцієнт оперативної готовності машин;

$P_{\text{марш.}}$ – ймовірність подолання маршруту руху машинами;

$P_{\text{вик.завд.}}$ – ймовірність виконання завдання з патрулювання;

$P_{\text{прот.}}$ – ймовірність уникнення втрат у процесі протидії диверсійно-розвідувальним групам (ДРГ) або порушникам від незаконних збройних формувань.

Коефіцієнт оперативної готовності для автобусів «БОГДАН А091» становить $K_{\text{ог}} = 1$, бо техніка нова. Коефіцієнт ймовірності подолання маршруту руху машиною при доставці особового складу патруля НГУ та національної поліції до ділянки патрулювання становить $P_{\text{марш.}} = 1$. Ймовірність уникнення втрат особового складу в разі нападу ДРГ противника $P_{\text{прот.}} = 0,8$.

Для патрулювання пішими патрулями $P_{\text{вик.завд.}}$ визначимо: кількість особового складу в підрозділах НГУ та Національної поліції, який становить 60 осіб, припустимо, що з них 5 осіб перебуває у відпустці, 6 осіб знаходиться в наряді на пункті постійної дислокації, 3 особи хворі та перебувають у лазареті, в строю лишаються 46 осіб. На проведення патрулювання виділяємо 12 осіб (3 піших патруля по 4 особи в кожному), ділянку в 9 км розбиваємо на 3 маршрути по 3 км, отже, патрулі перебуватимуть у зоні видимості один одного, тоді $P_{\text{вик.завд.}} = 1$. Таким чином:

$$P_{\text{патр.}} = 1 \cdot 1 \cdot 0,8 = 0,8.$$

Визначаємо коефіцієнт оперативності виконання завдань із патрулювання $K_{\text{опер}}(t)$. Вважаємо, що особовий склад патрулів НГУ та Національної поліції вчасно прибув у зону патрулювання та під час патрулювання швидко реагує на можливі порушення, бо знаходиться на невеликій відстані один від одного та може прийти один одному на допомогу, тому $K_{\text{опер}(t)} = 1$.

Визначимо коефіцієнт ресурсозабезпечення перевезень $K_{\text{рес.заб}}(C)$. Затверджена планова витрата коштів на паливо при патрулюванні становить $C_{\text{занл.}} = 300$ грн, витрати для доставки особового складу до місця патрулювання, розвезення усіх патрулів по запланованих маршрутах, збір та доставка усіх після патрулювання в пункт постійної дислокації становитиме 76 км автобусом «БОГДАН А091», що дорівнює $C_{\text{витр.}} = 422$ грн, тому:

$$K_{\text{рес.заб}}(C) = 1 - e^{-\frac{300}{122}} = 0,914,$$

тоді:

$$K_{\text{еф.патрул.}} = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,914 = 0,7312 \approx 0,73.$$

Для проведення патрулювання на броневому автомобілі КрАЗ-Спартан (розхід пального на 100 км становить 23 л ДП) на патрулювання виділяємо один броневий автомобіль (екіпаж 4 особи). Виходячи з формули (1), визначаємо коефіцієнт ефективності патрулювання на автомобілі (К_{еф.патрул.}) КрАЗ-Спартан

Далі за формулою (2) визначимо ймовірність виконання завдань із патрулювання на броневому автомобілі КрАЗ-Спартан, де коефіцієнт оперативної готовності для броневих автомобілів КрАЗ-Спартан ДП становить $K_{\text{ог}} = 1$, бо техніка нова. Ймовірність подолання маршруту броневим автомобілем при патрулюванні становить $P_{\text{марш.}} = 1$. Для патрулювання на броневому автомобілі КрАЗ-Спартан визначимо: протяжність маршруту 9 км, середня швидкість руху під час патрулювання не більше 25 км/год., таким чином броневий автомобіль проїде ділянку патрулювання за $9_{\text{км}} / 25_{\text{км/год}} = 0,4_{\text{год.}} = 24$ хвилини, за цей час може статися прорив ділянки ДРГ противника та сама ДРГ може схватитися або здійснити напад на патруль, тоді з огляду на бронезахист особового складу $P_{\text{вик.завд}} = 0,9$.

Таким чином:

$$P_{\text{патр.}} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,9 = 0,9.$$

Тоді визначаємо коефіцієнт оперативності виконання завдань із патрулювання $K_{\text{опер}}(t)$. Оскільки

автомобіль може бути відсутній на певній ділянці маршруту короткий час, тому $K_{\text{опер}(t)} = 1$.

Припустимо, що під час патрулювання патрульний броневий автомобіль проїде 10 разів із початку до кінця та назад по маршруту патрулювання, що становить 180 км, прибуття до місця патрулювання та повернення до пункту постійної дислокації 20 км, загалом пробіг становить 200 км.

Визначимо коефіцієнт ресурсозабезпечення $K_{\text{рес.заб}}(C)$ при затвердженій плановій витраті коштів на паливо $C_{\text{занл.}} = 300$ грн, а при вказаному пробігу броневих автомобілів «КрАЗ-Спартан» витрачаємо на його заправлення $C_{\text{витр.}} = 966$ грн, тоді:

$$K_{\text{рес.заб}}(C) = 1 - e^{-\frac{300}{666}} = 0,363.$$

Таким чином:

$$K_{\text{еф.патрул.}} = 0,9 \cdot 1 \cdot 0,363 = 0,3267 \approx 0,33.$$

Для проведення патрулювання на легковому автомобілі HYUNDAI TUCSON (розхід пального на 100 км становить 10 л бензину А-95) на патрулювання виділяємо один автомобіль (екіпаж 4-5 осіб). Виходячи з формули (1), визначаємо коефіцієнт ефективності патрулювання на автомобілі (К_{еф.патрул.}) HYUNDAI TUCSON. Використовуючи вираз (2), визначимо ймовірність виконання завдань із патрулювання на автомобілі HYUNDAI TUCSON, де коефіцієнт оперативної готовності для автомобілів HYUNDAI TUCSON становить $K_{\text{ог}} = 1$, бо техніка нова. Ймовірність подолання маршруту під час патрулювання становить $P_{\text{марш.}} = 1$.

Для патрулювання на автомобілі HYUNDAI TUCSON визначимо: протяжність маршруту 9 км, середня швидкість руху під час патрулювання не більше 25 км/год., таким чином автомобіль проїде ділянку патрулювання за 24 хвилини, за цей час може статися прорив ділянки ДРГ противника та сама ДРГ може схватитися або здійснити напад на патруль, тоді з огляду на відсутність бронезахисту особового складу $P_{\text{вик.завд}} = 0,8$. Таким чином:

$$P_{\text{патр.}} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,8 = 0,8.$$

Визначимо коефіцієнт оперативності виконання завдань із патрулювання $K_{\text{опер}}(t)$. Враховуючи протяжність маршруту автомобіль може бути відсутній на будь-якій ділянці за короткий час, тому $K_{\text{опер}(t)} = 1$.

Припустимо, що під час патрулювання автомобіль проїде приблизно 200 км.

Визначимо коефіцієнт ресурсозабезпечення $K_{\text{рес.заб}}(C)$ при затвердженій плановій витраті коштів на паливо, яка становить $C_{\text{занл.}} = 300$ грн, а при вказаному пробігу автомобілів HYUNDAI

TUCSON витрачаємо на його заправлення $C_{витр} = 440$ грн, тоді:

$$K_{рес.заб}(C) = 1 - e^{-\frac{300}{140}} = 0,883.$$

Таким чином:

$$K_{эф.патрул.} = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,883 = 0,7064 \approx 0,7.$$

Для проведення патрулювання на броневому автомобілі «Варта» на базі МАЗ 4 × 4 (розхід пального на 100 км становить 35 л ДП) на патрулювання виділяємо один броневий автомобіль (екіпаж 2+8 осіб). Виходячи з формули (1), визначаємо коефіцієнт ефективності патрулювання на автомобілі ($K_{эф.патрул.}$) «Варта». Використовуючи вираз (2), визначимо ймовірність виконання завдань із патрулювання на броневому автомобілі «Варта», де коефіцієнт оперативної готовності для броневих автомобілів «Варта» становить $K_{ог} = 1$, бо техніка нова. Ймовірність подолання маршруту броневим автомобілем «Варта» при патрулюванні становить $P_{марш.} = 1$. Для патрулювання на броневому автомобілі «Варта» визначимо: протяжність маршруту 9 км, середня швидкість руху під час патрулювання не більше 25 км/год., таким чином броневий автомобіль «Варта» проїде ділянку патрулювання за 24 хвилини, за цей час може статися прорив ділянки ДРГ противника та сама ДРГ може схватитися або здійснити напад на патруль, тоді з огляду на бронезахист особового складу $P_{вик.завд} = 0,9$. Таким чином:

$$P_{патр.} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,9 = 0,9.$$

Визначимо коефіцієнт оперативності виконання завдань із патрулювання $K_{опер}(t)$. З огляду на протяжність маршруту броневий автомобіль може бути відсутній на будь-якій ділянці маршруту короткий час, тому $K_{опер}(t) = 1$.

Припустимо, що при патрулюванні броневий автомобіль «Варта» проїде приблизно 200 км.

Визначимо коефіцієнт ресурсозабезпечення $K_{рес.заб}(C)$ при затвердженій плановій витраті коштів на паливо $C_{затв.} = 300$ грн, а при вказаному

пробігу броневих автомобілів «Варта» витрачаємо на його заправлення $C_{витр} = 1470$ грн, тоді:

$$K_{рес.заб}(C) = 1 - e^{-\frac{300}{1170}} = 0,226.$$

Таким чином:

$$K_{эф.патрул.} = 0,9 \cdot 1 \cdot 0,226 = 0,2034 \approx 0,2.$$

Висновки. Проведений аналіз коефіцієнта ефективності патрулювання в зоні розведення військ із використанням різних марок автомобільної техніки дає змогу зробити висновки в теоретичному і практичному планах.

1. Сучасна економічна ситуація в країні висуває вимоги підвищити ефективність використання АТ. Для цього необхідно ввести єдину методику оцінки очікуваної ефективності використання АТ у процесі проведення патрулювання в зоні розведення військ в умовах бойових дій, який дасть змогу визначити вплив на неї окремих показників і намітити шляхи забезпечення її високого рівня.

2. Запропонований показник коефіцієнта ефективності патрулювання на автомобілях дає змогу оцінити фактичний рівень використання різних марок АТ і способів патрулювання в зоні розведення військ при бойових діях.

3. При прийнятті $K_{рес.заб}(C) = 1$ проведені розрахунки уможливають висновки про те, що найбільша ефективність проведення патрулювання на автомобілі HYUNDAI TUCSON з коефіцієнтом $K_{эф.патрул.} = 0,7$, піші патрулі показали ефективність патрулювання з коефіцієнтом $K_{эф.патрул.} = 0,73$. Патрулювання броневим автомобілем КраЗ-Спартан із коефіцієнтом $K_{эф.патрул.} = 0,33$, броневим автомобілем «Варта» на базі МАЗ 4х4 з коефіцієнтом $K_{эф.патрул.} \approx 0,2$ – це найнижчий показник ефективності під час патрулювання серед тих, які розглянуті. Таким чином, на ефективність патрулювання впливає багато різних факторів, тому, плануючи патрулювання в зоні розведення військ, необхідно їх враховувати.

Список літератури:

1. Ворона Ю. Уйти или остаться. Поможет ли разведения войск закончить войну на Донбассе. URL: <https://www.pravda.com.ua/rus/articles/2019/10/9/7228491/>.
2. Шрамович В. Коли і як відбудеться розведення військ на Донбасі. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-49964246>
3. Кушнір М. Куди насправді відійшли військові у Золотому і чого вони побоюються – репортаж із зони розведення. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/text-reportazh-iz-rozvedennia-poblyzu-zolotoho/30250819.html>
4. Табуненко В.О., Иванченко О.В., Буряк П.Д., Кужелович В.І. Метод визначення ефективності використання автобронетанкової техніки підрозділами НГУ при охороні громадського порядку в мирний час. *Честь і закон*. 2018. № 4(67). С. 83–88.

5. Табуненко В.О., Марценяк О.П. Метод визначення ефективності використання автомобільної техніки підрозділами НГУ при патрулюванні в умовах воєнного стану. *Системи озброєння і військова техніка*. 2019. № 1(57). С. 136–140.
6. Огляд підходів до визначення економічної сутності поняття «ефективність» / Т.С. Морщенок, О.М. Біляк. Запоріжжя : КПУ, 2014. С. 2.
7. Організаційно-економічний механізм управління ефективністю діяльності підприємств споживчої кооперації України : монографія / А.В. Куценко. Полтава : РВВ ПУСКУ, 2008. 205 с.
8. Андрійчук В.Г. Ефективність діяльності аграрних підприємств: теорія, методика, аналіз. Київ : КНЕУ, 2005. 292 с.
9. Основи підприємницької діяльності / С.В. Мочерний, О.А. Устенко, С.І. Чеботар. Київ : Академія, 2001. 280 с.
10. Економіка підприємства / Б.О. Жнякін, В.В. Краснова. Донецьк : Альфа-Прес, 2005. 159 с.
11. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т. Т. 1. Методология. Организация. Терминология. Москва : Машиностроение, 1986. 224 с.
12. Теория вероятностей и исследование операций в задачах эксплуатации и боевого применения вооружения и военной техники / М.П. Ганин, Н.Г. Кузнецова / Часть 2. Санкт-Петербург : ВМА. 1997. 467 с.
13. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. Москва : Наука, 1973. 368 с.
14. Демидов Б.А., Хмелевская О.А. Методические основы оценивания и прогнозирования уровня качества, сравнительного анализа эффективности применения образцов вооружения и военной техники при управлении их жизненными циклами. *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. 2006. № 7 (19). С. 72–76.
15. Автотехнічне забезпечення частин та підрозділів внутрішніх військ МВС України / К.П. Макаручук, С.А. Соколовський, Г.М. Маренко, В.І. Кужелович, С.М. Мельников, С.Є. Вискребенцев, Р.І. Топчій. Харків : Академія ВВ МВС України, 2012. 235 с.
16. Основи технічного забезпечення. Обґрунтування рішень / Б.О. Дем'янчук, О.В. Малишкін. Одеса : МО України, 2014. 208 с.
17. Теорія надійності та живучості елементів і систем літальних комплексів / В.С. Харченко, А.П. Батуков, І.В. Лисенко. Харків : ХВУ, 1997. 403 с.
18. Чабаненко П.П. Закономірності та особливості оцінювання ефективності систем у бойових діях за ймовірнісними моделями. *Наука і оборона*. 2016. № 4. С. 16–22.
19. Ковтун А.В., Табуненко В.О. Обґрунтування показника ефективності використання автомобільного транспорту при перевезеннях / *Збірник наукових праць НАНГУ*. 2018. № 1(31). С. 80–84.
20. Ковтун А.В., Табуненко В.О., Марценяк А.П. Определение показателя эффективности военных перевозок автомобильными колоннами. *National security and military sciences*. 2017. № 4 (vol. 3). С. 39–47.
21. Шаша І.К., Кудімов С.А. Шляхи підвищення ефективності використання автобронетанкової техніки підрозділами Національної гвардії України. *Збірник наукових праць НАНГУ*. 2017. № 1(29). С. 77–80.

Tabunenko V.O., Martsenyak O.P., Kuzhelovich V.I. ANALYSIS OF PATROL EFFICIENCY IN THE TROUBLE BREEDING ZONE USING VEHICLES

A hybrid war has been going on in eastern Ukraine for six years. Combat losses are increasing every day. The deployment of troops in the combat zone will create security areas for the work of international humanitarian organizations, as well as demining. To ensure the deployment of troops and the safety of local residents, it is necessary to control the actions of illegal armed groups by the National Guard of Ukraine and the National Police. There is still no single methodology for evaluating the effectiveness of patrols, based on objective evaluation indicators, such as the probability of performing patrol tasks; the efficiency of tasks; the coefficient of resource provision of transportation, which in turn is determined by the coefficient of operational readiness of machines; the probability of overcoming the route of movement of cars; the probability that the patrol task will be completed; the probability of avoiding losses in the face of sabotage and reconnaissance groups or violators from illegal armed groups. With the changing military situation, new concepts and extraordinary views on the revision of patrolling both in peacetime and in wartime are emerging. Now, given the situation with the deployment of troops in the war zone in eastern Ukraine, it is necessary to review the traditional conduct and evaluation of patrol effectiveness using different models of vehicles and foot patrols, in order to prevent inefficient use of economic resources. It is becoming clear that when conducting patrols in the area of deployment of troops in combat conditions, it is necessary to plan and evaluate options for technical solutions to select those that can give maximum economic effect. The paper proposes an indicator of efficiency, which allows to assess the actual level of use of different brands of cars in patrol conditions in the breeding area.

Key words: troop breeding zone, automobile equipment, patrol efficiency indicator, patrol probability, resource provisioning factor.

БУДІВНИЦТВО

УДК 691

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/36>**Василишин В.Я.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ – ВАЖЛИВИЙ СКЛАДНИК ДИЗАЙНУ В СУЧАСНОМУ БУДІВНИЦТВІ

У статті розглядаються особливості традиційних і нових будівельних матеріалів та їх роль у розвитку дизайну архітектурно-ландшафтного середовища, зокрема у ландшафтному дизайні. Обґрунтовано, що важливими чинниками, які впливають на формування архітектурно-ландшафтного середовища, є гармонійне поєднання рельєфних, рослинних та інших природних та штучних елементів. Проблема підвищення загального рівня якості будівництва та архітектури безпосередньо пов'язана з поліпшенням якості будівельних матеріалів, виробів і конструкцій, впровадженням широкого асортименту нових ефективних матеріалів, які повною мірою відповідають архітектурно-будівельним вимогам, мінімізацією матеріалів на одиницю корисного будівельного об'єму. Подано класифікацію будівельних матеріалів за походженням, хімічним складом, особливостями технології та за призначенням. Важливим є проектування в розрахунок на довготривалу експлуатацію таких типів і конструктивних рішень будівель, які могли б адаптуватися до зміни стандартів якості житлового середовища і бути відновлювальними, придатними до реконструкції. Узагальнено основні переваги та недоліки природних кам'яних матеріалів, металевих матеріалів, різновидів бетонів (газобетон, пінобетон, прозорий бетон), матеріалів та виробів з деревини, керамічних виробів, матеріалів та виробів зі скла, полімерних матеріалів. Обґрунтовано, що на практиці під час вибору матеріалів для будівництва слід провести баланс між естетичними, екологічними та економічними характеристиками. В процесі вибору будівельного матеріалу доцільно звернути увагу на естетичність, екологічність, енергоефективність, здатність до переробки і повторного використання, здатність до утилізації, легкість у монтажі та обслуговуванні, можливість відновлення джерела постачання матеріалу.

Ключові слова: будівельні матеріали, дизайн, архітектурно-ландшафтне середовище, будівельні вироби та конструкції, архітектурно-будівельні вимоги.

Постановка проблеми. Будівельні матеріали є тією матеріальною основою, яка дозволяє архітектурній формі, запропонованій архітектором і дизайнером, бути реалізованою як об'єкт архітектури. Основна частина об'єктів, які нині будуються, – це житлові будівлі, переважно каркасні, монолітно-каркасні, монолітні чи панельні, різної поверховості та рівня комфортності.

Така різноманітність призводить до значної різнобарвності об'єктів, які споруджуються, вимагає відповідного оздоблення фасадів та інтер'єру, а також конструктивно-оздоблюваних будівельних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми дизайну архітектурно-ландшафтного середовища висвітлювались у багатьох наукових працях вітчизняних і закордонних авторів. Аспектам реалізації архітектурно-ландшафтного середовища в системі матеріальних утворень та впровадження

в архітектуру та дизайн сучасних будівельних матеріалів останнім часом приділяється все більше уваги. Будівельні матеріали посідають важливе місце серед багатьох факторів, що визначають якість сучасного будівництва та архітектурну цінність будівель і споруд. Разом із тим проблеми ефективного використання тих чи інших будівельних матеріалів в архітектурі та особливо в дизайні середовища комплексно не розглядалися.

Постановка завдання. Завдання дослідження – висвітлення особливостей застосування поряд з традиційними нових інноваційних будівельних матеріалів та їх ролі у розвитку архітектурно-ландшафтного середовища.

Виклад основного матеріалу дослідження. Важливими чинниками, які впливають на формування архітектурно-ландшафтного середовища, є гармонійне поєднання рельєфних, рослинних та інших природних та штучних елементів,

таких як декоративні покриття, малі архітектурні форми, геопластика та інші елементи благоустрою та облаштування територій [1; 2]. Крім того, вибір будівельних матеріалів і визначення конструктивної системи, тобто системи взаємодії основних несучих і огорожувальних конструкцій будівлі, тісно пов'язані між собою, оскільки одні й ті самі матеріали мають різну ефективність залежно від того, в якій конструктивній системі ці матеріали є більш оптимальними, якщо система враховує наявність конкретної бази будівельних матеріалів. Тому проблема ефективного використання тих чи інших будівельних матеріалів в архітектурі та дизайні середовища залежить від матеріально-технічних засобів їх реалізації.

Асортимент і якість виробів будівельної індустрії визначають безпосередній вплив на технічні, естетичні переваги об'єкта та його довговічність. Проблема підвищення загального рівня якості будівництва та архітектури безпосередньо пов'язана з поліпшенням якості будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, впровадженням широкого асортименту нових ефективних матеріалів, які повною мірою відповідають архітектурно-будівельним вимогам.

Довговічність будівель визначається довговічністю застосування будівельних конструкцій і залежить від багатьох факторів.

До основних будівельних матеріалів належать як виготовлені промисловістю матеріали (цемент, цегла, чорні та кольорові метали; санітарно-технічні, електротехнічні, хімічні, лакофарбові матеріали; алебастр, лісоматеріали тощо), так і сировинні матеріали мінерального та рослинного походження (глина, пісок, щебінь, круглий ліс, камінь тощо).

До основних критеріїв якості матеріалів належать параметри опору зовнішнім навантаженням: міцність, в'язкість, надійність, ресурс тощо. Конструкційні матеріали підрозділяються: а) за природою матеріалів – на металеві, неметалеві, композиційні; б) за технологічним виконанням – на деформовані (прокат, поковка, штампування, пресування тощо), литі, випалювальні, формовані, склеювані, зварювані; в) за умовами роботи – жароміцні, корозійностійкі, зносостійкі тощо.

Класифікація будівельних матеріалів здійснюється за різними ознаками, в тому числі за походженням, хімічним складом, особливостями технології та за призначенням [3; 4]. Виділимо такі групи будівельних матеріалів і виробів за особливостями їх використання під час формування об'єктів архітектурно-ландшафтного середовища.

Природні кам'яні матеріали. Отримали широке застосування як несучий конструкційний, так і оздоблювальний матеріал для різних споруд і будівель, а також у ландшафтному дизайні. Кольорова та фактурна гама природного каменю надає особливі художньо-образні характеристики та етнокультурну своєрідність вулицям, паркам і скверам, міським площам та бульварам. Природний камінь використовується у геопластиці рельєфу, водних пристроях, декоративних покриттях, малих архітектурних формах, благоустрою та елементах декоративно-прикладного мистецтва.

Найбільш поширеним матеріалом для мощення є тротуарна плитка, що виготовляється вібропресуванням або вібролитвом. Більш привабливим є зовнішній вигляд плитки, виготовленої за допомогою вібролиття, яка має широке розмаїття кольорів та форм. Вібропресова плитка найчастіше застосовується на великих площах у благоустрою території міста.

Металеві матеріали. Відкривають майбутні перспективи й творчі можливості їх використання в дизайнерських композиціях. Еволюція металевих виробів характеризується їх традиційним використанням, а також різноманітними новаторськими пошуками архітекторів і дизайнерів, де поширеним став прийом сполучення конструкційного металу зі склом, деревом, керамікою, тканинами тощо. Крім того, металеві несучі конструкції одночасно працюють як активні декоративні елементи у виставкових та торговельних павільйонах, паркових і вуличних меблях різної конструкції і форми, кафе та ресторанах, мостових переходах, малих архітектурних формах [5].

Для досягнення архітектурної виразності широке застосування набули сталеві конструкції, оскільки сталь є багатофункціональним та універсальним матеріалом.

Основними характеристиками сучасних металевих конструкцій є: а) висока надійність як результат однорідності, ізотропності і цілісності матеріалу; б) відносна легкість – значне співвідношення міцності до маси; в) непроникність для різних середовищ; г) індустріальність і стандартизація виробів; г) здатність до ремонтів і реконструкції [6].

Використання металевих конструкцій дає можливість досягати високої архітектурної виразності будівель. Для цього, зокрема, сталеві елементи дозволяють реалізувати такі прийоми: а) біонічні основи роботи конструкцій візуально наближають каркас будівлі до аналогів у живій природі; б) висока міцність сталі дає можливість

застосовувати естетичні, невеликі за габаритами тонкостінні перерізи; в) застосування перфорованих та решітчастих конструкцій підкреслює візуальну «легкість» будівлі; г) пластичність сталі дає змогу використовувати вигнуті, криволінійні елементи; г) вантові, розтягнуті елементи дають максимальну ефективність використання матеріалу і можливість формування великопрогонних, «повітряних» будівель; д) обробка металоконструкцій можлива у великій гамі кольорів і матеріалів.

В архітектурно-будівельній практиці використовують сплави кольорових металів (мідних, алюмінієвих, латунних, титанових), що не піддаються корозії та мають підвищену пластичність.

Матеріали та вироби з деревини. Деревина за своєю питомою міцністю конкурує із сучасними конструкційними матеріалами. Матеріали та вироби з деревини використовуються в будівлях і спорудах різноманітного призначення завдяки їхнім перевагам, таким як певна міцність і водночас легкість, здатність добре утримувати тепло в зимовий час і прохолоду влітку. Багатовікова історія багата зразками видатних культових споруд, дерев'яних садиб і вілл, павільйонів, альтанок, в яких деревина є чудовим конструкційним, декоративним та оздоблювальним матеріалом. Сучасні технології створення модифікованої деревини, дерев'яних клеєних конструкцій різної форми поперечного перерізу дають нові можливості, особливо для створення малих архітектурних форм, таких як: альтанки, фонтани, перголи, трельяжі, огорожі, містки, вазони, скульптури, садові меблі, елементи дитячих майданчиків і т. д.

Конструкційні матеріали, вироблені на основі деревини, часто мають переваги порівняно з натуральною деревиною, перевершують її за експлуатаційними властивостями, а також за габаритами. Наведемо деякі з деревних матеріалів: а) фанера – листовий будівельний матеріал, виготовлений із натуральної деревини, що зазвичай складається зі щільно склеєних по товщині декількох тонких шарів деревини; б) деревноволокнисті плити (ДВП) – матеріал, що отримується гарячим пресуванням маси або сушкою деревноволокнистого килима, що складається з целюлозних волокон, води, синтетичних полімерів і спеціальних добавок; в) деревостружкові плити (ДСП) – листовий композиційний матеріал, вироблений гарячим пресуванням деревних частинок, переважно стружки, з введенням спеціальних добавок.

Керамічні вироби. Характерні тим, що особливості їх застосування в дизайні дають мож-

ливість створювати стильову єдність ансамблю забудови та благоустрою територій. Зокрема, клінкерні вироби (великий асортимент будівельної кераміки високої якості та неповторного стилю) стають незамінними у разі оформлення споруд в етностилі, цінуються своєю натуральністю, універсальністю, безпекою та екологічною чистотою. Клінкерна цегла застосовується як під час реконструкції старих будівель, так і під час будівництва нових об'єктів у районах зі сформованою історичною забудовою. Завдяки широкому вибору форм, фактури та кольорової гами клінкерні вироби розкривають необмежені можливості у ландшафтному дизайні. Можливості клінкерної цегли широкі і різноманітні. Нею облицьовують кам'яну і цегельну кладку, цоколі будинків, а також використовують для оздоблення підлог, декоративних колон і балконів. Найбільш важливими властивостями клінкеру є його водонепроникність, оптимальні тепло- та звукоізоляційні якості, морозостійкість.

Використання керамічної цегли в оздобленні будівель, малих архітектурних форм, облаштування прилеглої території стало вагомим естетичним засобом організації архітектурно-ландшафтного середовища.

Керамічну цеглу отримують різними способами: методом пластичного формування, сухого пресування, відпалу з додаванням тирси і т. д. Завдяки цьому досягаються різні властивості цегли: пористість, морозостійкість, вологостійкість.

Керамічна цегла буває різних видів: суцільна, порожниста і облицювальна.

Суцільна або рядова цегла використовується під час будівництва основних стін і фундаментів будівлі. Вона має високу міцність, морозостійкість і не тріскається у разі перепаду температур.

Порожниста цегла володіє меншою щільністю, але більш високими теплоізолюючими властивостями. Її використовують під час будівництва внутрішніх стін і несучих конструкцій. Цегла оброблена особливим способом і має жолобки на зовнішніх сторонах. Завдяки цьому зменшується розхід будівельного розчину і з'являється можливість ідеальної підгонки цегли одна до одної.

Облицювальна цегла представлена великою кількістю кольорів, форм і фактур. Як декоративний матеріал застосовується для оздоблення фасадів будівель та елементів інтер'єру, викладення клумб і доріжок, арок і колон, камінів і внутрішніх стін. Облицювальна цегла може бути стилізована під мармур, граніт, дерево та інше.

Керамічна цегла відносно дорога.

Бетон та залізобетон. Широко почав застосовуватися в дизайні міського середовища в першій половині ХХ століття. Конструкційні та декоративні можливості бетону та залізобетону втілюються в таких ландшафтних спорудах, як мости, надземні і підземні переходи, літні сцени, амфітеатри, а також є економічно вигідними матеріалами для обробки поверхні землі, підпирних стінок, сходів, пандусів тощо. Останнім часом найбільшого поширення як дорожнє покриття здобули фігурні елементи бруківки, які дають можливість створювати різноманітні дизайнерські задуми щодо малюнку, масштабу й кольорового вирішення декоративних покриттів.

З новітніх бетонів відзначаємо газобетон та піноблоки.

Газобетон отримують за допомогою додавання газоутворюючого компонента у суміш з води і кремнеземистого матеріалу. У процесі хімічної реакції в суміші утворюються шпори, заповнені повітрям, які значно знижують не тільки масу плит, але й їх міцність. Невелика міцність газобетонних плит може стати перешкодою у разі будівництва високих будинків.

Для малоповерхового будівництва газобетон – відмінний матеріал. У зв'язку з малою масою матеріалу для будинку в один-три поверхи не потрібен зміцнений фундамент. Пориста структура плит добре утримує тепло, що значно знижує затрати на опалення. Довговічність газобетону значно вища порівняно з іншими матеріалами, до того ж такі плити вогнетривкі й запобігають поширенню вогню у разі пожежі.

Крім суто технологічних позитивів, у газобетону є і скриті переваги. Він дає широкі архітектурні можливості: блоки легко розпилюються під потрібний розмір і форму, тому будь-яка дизайнерська фантазія може бути легко реалізована.

Газобетон випускається гладкими плоскими плитами, які майже не вимагають вирівнювання. За рахунок цього знижується вартість внутрішнього та зовнішнього оздоблення.

До недоліків можна віднести низьку механічну міцність, малу еластичність.

Пінобетон – найпоширеніший нині матеріал для будівництва приватних будинків. Це – суміш піску, цементу, води і піни. Матеріал легкий, зручний у роботі, йому можна надати будь-який розмір, він не потребує масивного фундаменту. Піноблоки випускаються великими прямокутними плитами сірувато-білого кольору.

До очевидних переваг пінобетону можна віднести його низьку теплопровідність, за рахунок чого знижуються витрати на опалення. У разі

пожежі піноблок не вибухає, як звичайний бетон, і не виділяє токсичні речовини, оскільки у його складі відсутні шлаки і щебінь.

Пінобетон екологічний, він підтримує оптимальний мікроклімат у будинку, прекрасно вентилюється і не гниє, має високі шумопоглинальні властивості.

Основний недолік пінобетону – його гігроскопічність, тобто властивість вбирати вологу, що приводить до появи плісняви.

Прозорий бетон (літрокон). Порівняно новий матеріал, але популярний за рахунок своєї міцності і водостійкості.

Прозорий бетон – композитний матеріал, який складається із суміші цементного розчину і скляних оптоволоконних ниток, які пропускають світло. Внаслідок цього через плити такого матеріалу можна бачити силуети навколишніх предметів. Застосовується не тільки для будівництва суперсучасних будинків, але й для виробництва аксесуарів: світильників, меблів і т.д.

Кількість оптоволокна становить усього 5% від загальної маси плити, за рахунок чого вона не втрачає міцність, але набуває «повітряного» вигляду. Прозорий бетон вирізняється високими вогнестійкими, зносостійкими характеристиками, не вбирає вологу, не руйнується за низьких температур.

З прозорого бетону будують дахи мансард і фасадів з внутрішнім підсвічуванням, викладають тротуари і доріжки. Єдиний мінус цього матеріалу – досить висока ціна.

Крім того, застосовують штучні блоки, що виготовляються з бетонних сумішей на основі декоративних щебеню і піску та портландцементу. Декоративний щебінь і пісок – переважно сировинний облицювальний високодекоративний фракціонований матеріал. Декоративний щебінь і пісок застосовують для оздоблення лицьових поверхонь бетонних і залізобетонних елементів будівель, виготовлення штучних блоків і декоративних плит. Пісок – незамінний матеріал у ландшафтних роботах. Крупний пісок найчастіше використовується для приготування бетону, а дрібний – для будівельного розчину.

Плити бетонні тротуарні виготовляють з важкого та дрібнозернистого бетону різноманітної форми: прямокутні, квадратні, фігурні. Найчастіше застосовують для влаштування збірних покриттів тротуарів, пішохідних зон, садово-паркових доріжок.

Матеріали та виробни зі скла. Дають можливість їх активного використання у зв'язку з новими міцнісними та статико-динамічними характеристиками в організації пандусів, сходів, амфітеатрів, терас, скульптурних композицій. Оскільки виробни зі скла можуть виконувати функції несучої

чих горизонтальних конструкцій, то за їх допомогою можна організувати мостові переходи та перекриття великих прогонів. Для утворення малих архітектурних форм виробу зі скла застосовуються як конструкційний та декоративний матеріал. Розвиток науково-технічного прогресу та впровадження нових технологій відкриють ще більші естетичні можливості застосування виробів зі скла в ландшафтному мистецтві.

Полімерні матеріали. Дають змогу ефективно імітувати фактуру і малюнок природних матеріалів не тільки в будівлях, а й у засобах ландшафтного дизайну, таких як малі архітектурні форми, елементи декоративно-прикладного мистецтва, зупинки транспорту, вітрини, виставкові павільйони. Сучасна технологічна обробка цих матеріалів дає додаткові можливості для естетичного дизайнерського задуму. Широкого застосування набувають оздоблювальні матеріали на полімерній основі, сухі оздоблювальні суміші і конструктивно-оздоблювальні матеріали, які дають змогу вести оздоблення сухими методами. Слід враховувати і значну економічність застосування полімерних матеріалів та зниження трудомісткості будівельних робіт. Високі пластичні можливості цих матеріалів також сприяють розви-

тку засобів моделювання рельєфу у ландшафтному проектуванні. Цікавим для ландшафтного дизайну аспектом якостей полімерних матеріалів є можливість їх використання як штучного озеленення.

Серед інших матеріалів для ландшафтного проектування є геотканина (геотекстиль) – нетканний матеріал, який здатний пропускати воду. Переваги геотекстилю: а) міцний і добре витримує різні високі розривні навантаження; б) пропускає повітря і воду, але затримує найдрібніші частинки ґрунту; в) стійкий до хімічних і механічних впливів; г) простий у доставці та монтажі; г) економічний за ціною.

Висновки. Характерні природно-ландшафтні особливості того чи іншого краю, господарська діяльність та наявність доступних місцевих матеріалів на відповідних територіях суттєво позначаються на формуванні архітектурно-предметного середовища в дизайні.

На практиці під час вибору будівельних матеріалів слід провести детальний аналіз естетичних, екологічних і економічних характеристик.

Таким чином, радикальне оновлення архітектурно-ландшафтного середовища – це важливе і здійсненне завдання.

Список літератури:

1. Основи дизайну архітектурного середовища : підручник / Тімохін В.О., Шебек Н.М., Малік Т.В. та ін. Київ : Основа, 2010. 395 с.
2. Основи ландшафтного дизайну : підручник / Крижанівська Н.Я. Київ : «Ліра-К», 2009. 217 с.
3. Матеріалознавство : підручник / Пушкарьова К.К., Кочевих М.О., Гончар О.А., Бондаренко О.П. Київ : «Ліра-К», 2012. 591 с.
4. Абизов В.А. Теорія розвитку архітектурно-будівельних систем. Київ : КНУКіМ, 2009. 239 с.
5. Жербин М.М., Владимирский В.А. Металлические конструкции. Киев : Вища школа, 1986. 215 с.
6. Нілов О.О., Пермяков В.А., Шимановський О.В., Білик С.І., Белов І.Д., Лаврінченко Л.І., Володимирський В.О. Металеві конструкції : підручник. II видання. Київ : «Сталь», КНУБА, 2010. 832 с.

Vasylyshyn V.Ya. BUILDING MATERIALS – AN IMPORTANT COMPONENT OF DESIGN IN MODERN BUILDING

The article considers the features of traditional and new building materials and their role in the development of architectural and landscape environment, in particular in landscape design. It is substantiated that the important factors influencing the formation of the architectural and landscape environment are the harmonious combination of relief, plant and other natural and artificial elements. The problem of improving the overall quality of construction and architecture is directly related to improving the quality of building materials, products and structures, the introduction of a wide range of new effective materials that fully meet the architectural and construction requirements, minimizing materials per unit of useful construction volume. The classification of building materials by origin, chemical composition, technology features and purpose is given. It is important to design for long-term operation such types and design solutions of buildings that could adapt to changing living standards and be renewable, suitable for reconstruction. The main advantages and disadvantages of natural stone materials, metal materials, types of concrete (aerated concrete, foam concrete, transparent concrete), materials and wood products, ceramics, glass materials and products, polymer materials are summarized. It is substantiated that in practice, when choosing materials for construction, a balance should be struck between aesthetic, environmental and economic characteristics. In the process of choosing a building material, it is advisable to pay attention to aesthetics, environmental friendliness, energy efficiency, recyclability, ease of installation and maintenance, the possibility of restoring the source of material supply.

Key words: building materials, design, architectural and landscape environment, construction products and structures, architectural and construction requirements.

Василишин Я.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕСТЕТИЧНОГО УПОРЯДКУВАННЯ АРХІТЕКТУРНО-ЛАНДШАФТНОГО СЕРЕДОВИЩА

У статті узагальнено сучасне розуміння естетичного упорядкування рекреаційних ландшафтів та архітектурно-ландшафтної організації міських просторів. Сформульовано нові напрями і наукові підходи до дослідження естетики й організації ландшафту, розробки принципів проектування архітектурно-ландшафтного середовища, які дадуть змогу удосконалити композиційно-планувальну й функціональну структуру міста загалом. Визначено три основні напрями досліджень: 1) вивчення ландшафту як естетичного об'єкта; 2) вивчення людини як суб'єкта та об'єкта естетичного сприйняття; 3) пізнання закономірностей естетичного сприйняття ландшафту людиною. Розглянуто основні підходи до естетико-ландшафтних досліджень: якісний, суб'єктивно-описовий, нейропсихологічний, просторово-нормативний, географічний, психолого-емпіричний, психолого-феноменальний. Обґрунтовано основні композиційні принципи проектування ландшафтного середовища: планувальні (цілісність архітектурно-ландшафтного середовища, функціональна варіативність, диференціація ландшафтів, збереження і перетворення ландшафтів) та об'ємно-просторові (співмасштабність архітектурних і ландшафтних компонентів середовища, рівновага міського силуету, видовищність архітектурно-ландшафтного середовища). Узагальнено основні естетичні категорії в їх застосуванні до ландшафту. Обґрунтовано зміст та рекомендації для завдань ландшафтного планування, ландшафтного проектування та дизайну. Подано приклад реалізації пошуково-навчального проектування в галузі ландшафту на кафедрі архітектури та містобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, а саме «Структурно-функціональна та архітектурно-планувальна реорганізація та розвиток території Дністровського каньйону».

Ключові слова: естетичне упорядкування, ландшафт, архітектурно-ландшафтне середовище, ландшафтно-екологічна реконструкція, міський простір.

Постановка проблеми. Як свідчить зарубіжний і вітчизняний досвід, найкращим методом оновлення архітектурно-ландшафтного середовища є процес комплексного оновлення архітектурних об'єктів і середовища, в якому вони існують, спрямований на підвищення економічної ефективності та покращення екологічних і архітектурно-художніх характеристик середовища.

Одним з основних напрямів наукової роботи на кафедрі архітектури та містобудування Інституту архітектури, будівництва та енергетики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу є дослідження естетичного впорядкування рекреаційних ландшафтів та архітектурно-ландшафтної організації міських просторів, оскільки під впливом соціально-економічних змін у суспільстві та розвитку науково-технічного прогресу композиційно-планувальна і функціональна структури архітектурно-ландшафтного середовища безперервно змінюються.

У роботах науковців, що вивчають природне середовище, як засіб оздоровлення міського мікроклімату показано значення озеленення про-

сторів міста для поліпшення гігієнічних характеристик середовища, вітрового, шумового, радіаційного режимів, іонізації і фітонізації повітря, створення мікрокліматичного комфорту для життєдіяльності людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На потребі оновлення архітектурно-ландшафтного середовища наголошувало багато вітчизняних та зарубіжних учених. Більшість робіт присвячена дослідженням питань ландшафтно-екологічної реконструкції територій міста, прийомів і методів реконструкції озелених просторів [1; 2]. Великий перелік становлять роботи, в яких ландшафт розкривається у зв'язку з дослідженням закономірностей формування міських ансамблів, питань архітектурно-ландшафтної організації міських просторів, історичного досвіду формування ландшафтних об'єктів, комп'ютерного моделювання дизайнерського підходу до вирішення багатьох проблем формування архітектурно-ландшафтного середовища [3; 4; 5].

Постановка завдання. Актуальність цього дослідження зумовлена необхідністю сформулювати

нові напрями і наукові підходи до дослідження естетики й організації ландшафту, розробки принципів проектування і комплексної реновації архітектурно-ландшафтного середовища, які дадуть змогу удосконалити композиційно-планувальну й функціональну структури міста загалом.

Завдання дослідження – окреслити коло проблем і розробити основні композиційні принципи проектування архітектурно-ландшафтного середовища, обґрунтувати напрями дослідження естетичного впорядкування рекреаційних ландшафтів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Серед основних видів дослідження ландшафтів відзначимо: 1) містобудівні дослідження; 2) географічні дослідження; 3) ландшафтознавчі дослідження.

У центр уваги наукових підходів до дослідження естетики й організації ландшафту ставлять вивчення закономірностей естетичного сприйняття людиною ландшафту. Ця загальна структура визначає три основні напрями досліджень, а саме: 1) вивчення ландшафту як естетичного об'єкта; 2) вивчення людини як суб'єкта та об'єкта естетичного сприйняття; 3) пізнання закономірностей естетичного сприйняття ландшафту людиною. Ці напрями умовно можна назвати ландшафтоцентричними, антропоцентричними і перцепційними.

Ландшафтоцентричний напрям дослідження естетики ландшафту спрямований на вивчення тих рис ландшафту, які визначають його естетичні якості, їх просторову композицію. Саме з вивчення цих питань і почалося формування естетики ландшафту як наукового напрямку.

Важливою прикладною проблемою, розробку якої можна віднести до ландшафтоцентричного напрямку естетики ландшафту, є наукове обґрунтування проектів і планів естетичного упорядкування рекреаційних ландшафтів.

Антропоцентричний напрям дослідження естетики ландшафту спрямований на пізнання людини, яка розглядається і як суб'єкт естетичного сприйняття ландшафту, і як об'єкт, у свідомості якого формується відповідний образ ландшафту.

Перцепційний напрям дослідження естетики ландшафту скерований на пізнання процесу, закономірностей і чинників естетичного сприйняття людиною ландшафту. Це сприйняття є надзвичайно складним процесом.

Естетико-ландшафтознавчі дослідження, порівняно із дослідженнями традиційних природ-

ничих напрямів ландшафтознавства, зумовлюють необхідність залучення низки підходів і методів суміжних наук (ландшафтознавства, ландшафтної екології, урбоекнології та містобудівництва, рекреаційної географії, психології, соціології, культурології, дизайну).

Розглянемо основні підходи до естетико-ландшафтознавчих досліджень:

1) *якісний підхід до естетико-ландшафтознавчих досліджень* не вимагає пошуку краси через формальні співвідношення ознак ландшафту, а виходить із тези, що естетичними якостями ландшафт наділяє людина. Одним із поширених прийомів таких досліджень в естетиці ландшафту є опитування людей щодо їх сприйняття ландшафту, яке проводиться серед різних груп респондентів (мешканців певного регіону, людей певних соціальних груп, туристів тощо). Одержані оцінки обробляються за допомогою статистичних методів. Ці методи дають змогу отримати об'єктивні оцінки естетичності ландшафту, причому чим більша вибірка опитаних респондентів, тим загальний результат є об'єктивнішим і достовірнішим;

2) *суб'єктивно-описовий підхід* відрізняється від якісного тим, що оцінка та опис естетичних якостей ландшафту дається не вибіркою респондентів, а одним фахівцем. Результати таких досліджень суттєво залежать від особистих естетичних уподобань, знань і досвіду виконавця – експерта;

3) *нейропсихологічні підходи* на практиці реалізуються методами та прийомами відповідних розділів медицини. Тут одержано чимало результатів, які є важливими для пояснення низки особливостей сприйняття людиною ландшафту;

4) *просторово-нормативний підхід до естетико-ландшафтознавчого аналізу* базується на вивченні окремих естетичних характеристик ландшафту з упорядкуванням вихідного ландшафту згідно з вимогами та стандартами певного художнього стилю, діючими правилами та нормами;

5) *географічний підхід* полягає в дослідженні переважно значних за розмірами територій, які включають ландшафти різних фізіономічних типів;

6) *психолого-емпіричний підхід* відрізняється від розглянутих вище тим, що основну увагу зосереджує не на ландшафті як об'єкті естетичного сприйняття, а на людині, яка цей ландшафт сприймає, її емоційних реакціях від сприйняття ландшафту, впливі наявних стереотипів на це сприйняття тощо;

7) в основі психолого-феноменологічного підходу лежить не емпіричний матеріал наукових досліджень, а естетичні почуття, враження та оцінки конкретної особи.

Отже, естетико-ландшафтознавчі дослідження ґрунтуються на різних підходах. Кожний із цих підходів має як свої переваги, так і обмеження.

До основних композиційних принципів проєктування архітектурно-ландшафтного середовища слід відносити планувальні та об'ємно-просторові.

Блок планувальних принципів становлять: а) принципи цілісності архітектурно-ландшафтного середовища, які полягають у створенні на основі історично сформованих ландшафтних об'єктів системи окремих ландшафтно-архітектурних комплексів, кожний з яких є самостійною закінченою архітектурно-містобудівною одиницею і входить до загальноміського ансамблю, об'єднаного спільною концепцією розвитку архітектурних і ландшафтних об'єктів; б) принципи функціональної варіативності – це організація на території міста різних типів багатофункціональних та спеціалізованих ландшафтно-архітектурних комплексів; в) принцип диференціації ландшафтів полягає у виділенні в структурі міста ландшафтних територій, що відповідають за стабілізацію і формування екологічного балансу території, і ландшафтних об'єктів, що впливають лише на формування естетичної виразності, тобто на диференціювання ландшафтних об'єктів за еколого-естетичними властивостями та характером і тривалістю використання; г) збереження і перетворення ландшафтів.

Для формування просторових візуальних зв'язків між усіма ландшафтними об'єктами необхідна організація чіткої системи композиційних осей пішохідних площ і вулиць, бульварів, скверів, набережних і т.д. з високим рівнем дизайну середовища. Ця система композиційно-планувальних осей з візуальними домінантами на їх завершенні й перетині дасть змогу штучно спрямувати погляд людини саме туди, де вона зможе побачити природні компоненти архітектурно-ландшафтного середовища. Роль таких композиційних осей переважно відводиться річкам, бульварам та проспектам, вздовж яких розміщуються ландшафтно-архітектурні комплекси.

У процесі розвитку архітектурної та містобудівної теорії було багато спроб розробити типологію архітектурно-ландшафтного середовища міста. В основу типології закладено найхарактерніші властивості: зміст функціональних процесів,

стильову приналежність, культурно-історичну цінність, соціальну значущість, роль території у формуванні екологічного балансу чи естетичної виразності міста, а також тривалість і періодичність користування територією [1; 5].

У процесі реалізації принципу диференціації ландшафтних територій можливі три ситуації: 1) ландшафтні об'єкти щоденного використання – незначна площа, найвищий рівень дизайну середовища, будь-який метод організації ландшафту; 2) ландшафтні об'єкти періодичного тривалого відпочинку – високий рівень дизайну середовища з переважанням природних засобів ландшафтного дизайну, велика площа території, пейзажний або змішаний метод організації ландшафту (центральний міський парк, спеціалізовані парки, пляжі, зони активного відпочинку в лісопарках тощо); 3) ландшафтні об'єкти періодичного короткочасного відвідування – мінімальний рівень дизайну середовища, дуже велика площа території, виключно пейзажний метод організації ландшафту (великі лісопаркові масиви на периферії міста, віддалені райони санітарно-захисних зон і т. ін.).

Відповідно до різних естетичних теорій один і той самий ландшафт може розглядатися як естетичний чи як позбавлений будь-яких естетичних якостей. До ландшафтних об'єктів, що впливають на естетичну виразність архітектурно-ландшафтного середовища, належать сади на дахах, ландшафтні зони в складі багатофункціональних ландшафтно-архітектурних комплексів з високим рівнем урбанізації, сквери, набережні тощо.

До ландшафтних об'єктів, що впливають на стан екологічної ситуації, належать лісопарки, гідро- та лугопарки, історичні ландшафти, значні за площею ландшафтно-архітектурні комплекси.

До блоку об'ємно-просторових принципів проєктування і реновації архітектурно-ландшафтного середовища належать принципи співмасштабності архітектурних і ландшафтних компонентів середовища (розміри забудованих територій мають бути співмасштабними до площі навколишніх відкритих ландшафтних просторів), рівноваги міського силуету (базується на поступовій трансформації моноцентричної структури міського каркасу, що спирається на домінування ролі історичного центру) та видовищності архітектурно-ландшафтного середовища (полягає в тому, що архітектурно-ландшафтне середовище розвивається як видовище, спрямоване на збудження сильних емоцій).

Серед основних теорій ландшафтознавства виділимо: 1) *дистанційні теорії*, які обстоюють положення, що естетичне відчуття можливе лише від об'єктів, які не мають для людини утилітарного, практичного значення; 2) *теорії задіяності естетичного сприйняття*, яке виникає в людини в результаті її інтенсивного та глибокого «занурення» в певний об'єкт, пізнання цього об'єкта через щоденну практику; 3) *суб'єктивістські теорії естетики*, що наголошують на провідній ролі суб'єкта в естетичному сприйнятті; 4) найбільший інтерес для ландшафтознавства становлять *об'єктивістські теорії естетики*, які досить різноманітні, і серед них можна виділити три групи: а) імітаційні; б) емоційні; в) формалістські.

Розглянемо основні естетичні категорії в їх застосуванні до ландшафту.

Естетичне розглядається як вихідна категорія естетики, як загальна характеристика її інших категорій. Статус естетичного залежить не лише від об'єкта, але від аспекту та способу його пізнання – власне естетичного, а не якогось іншого (морального, інтелектуального тощо) відношення до нього.

В естетиці є кілька основних інтерпретацій естетичного. Узагальнення думок з приводу естетичного в природі дає змогу вказати на існування двох тлумачень цієї категорії. Перше тлумачення називають *канонічним* – у природі спирається на деякий естетичний ідеал, канон; із цим каноном порівнюється природа (ландшафт) і краса природи (ландшафту), а друге – *натуралістичним*; зводиться до того, що саме природа, а не штучні об'єкти з мистецькими творами включно є первинним носієм естетичного та прекрасного.

Гармонія ландшафту може досягатися не тільки тим, що він впорядкований природними законами, а й іншими вимірами порядку. Серед цих вимірів особливе значення мають: регулярність (ритмічність), пропорційність, симетричність.

Елегантність ландшафту є частковим виразом його естетичної досконалості, коли вона виникає за якомога меншого числа елементів, місць ландшафту та композиційних зв'язків між ними.

Власне, саме елегантність лежить в основі естетичного сприйняття таких ландшафтів, як пустельні, степові, тундрові, їх не можна вважати ані мальовничими, ані величними. Гармонійність тут також здебільшого виражена слабо, оскільки для її повного виразу не вистачає матеріалу, різноманіття місць, кольорів тощо.

Чимало методик оцінки краси ландшафту ґрунтувалося на тезі: чим більш різноманітним є ландшафт, тим він більш естетичний [6].

Розрізняють чотири типи ландшафтів: природні, антропогенні, техногенні та мистецькі. Кожний із них має відповідний тип краси і відповідну стратегію її збереження та відновлення.

Ландшафтна архітектура, таким чином, тримає в полі зору одночасно два об'єкти – ландшафт і людину. Залежно від постановки дослідницького завдання як об'єкт дослідження може розглядатися ландшафт, а людина – як суб'єкт його сприйняття, в інших випадках об'єкт і суб'єкт дослідження міняються місцями.

Ландшафтний дизайн зумовлюється уявленнями, цілісним підходом, необхідністю проектувати не окремі об'єкти, а фрагменти архітектурно-ландшафтного середовища.

Подамо прикладну реалізацію пошуково-навчального проектування в галузі ландшафту на кафедрі архітектури та містобудування.

Концепція *«Структурно-функціональна та архітектурно-планувальна реорганізація та розвиток території Дністровського каньйону»* трактується на основі ідей та пропозицій ландшафтно-просторової організації рекреаційних утворень, формування та розвитку екорекреаційної мережі р. Дністер. Вона містить таке:

1. У прибережній зоні доцільним є створення терасових парків, гідропарків та ін. У вододільній зоні формується мережа агропарків, етнопарків, заповідних парків та ін.

Екорекреаційна мережа р. Дністер є багатою типологічною різноманітністю ландшафтних об'єктів. Деякі з них:

– *агропарки* – формуються на базі агроландшафтів, (агротуризм, прогулянковий, пізнавальний відпочинок);

– *етнопарки* – формуються на базі українського села з багатою історико-культурною спадщиною (краєзнавчий туризм, активний, пізнавальний відпочинок);

– *заповідні парки* – основою формування парків є охоронно-заповідні території, структурні елементи екосистеми України (краєзнавчий туризм, пізнавальний відпочинок);

– *гідропарки* – активний відпочинок і розваги;

– *технопарки* – штучне середовище комбінацій технічних пристроїв і природного оточення (активний, пізнавальний відпочинок).

2. У розвиток ідеї формування великих природно-ландшафтних територій є концепція організації системи екорекреаційної мережі; пропонується створення тематичних парків, тематика яких пов'язана з напрямом науково-дослідних комплексів екоцентрів рекреаційного змісту.

3. Функціональна організація рекреаційних зон: рекреаційно-бальнеологічна зона; рекреаційні об'єкти; агропаркова зона; аграрно-виробнича зона.

4. Система транспорту та обслуговування є одним із найважливіших завдань загальної концепції.

Висновки. Таким чином, виходячи із завдань зміни проектних підходів та естетизації архітектурних рішень, обґрунтовано зміст та рекомендації для задач ландшафтного планування, ландшафтного проектування та дизайну, тобто кожного із видів ландшафтно-проектної діяльності. Успішний розвиток рекреаційних регіонів залежить від умілого використання естетичного потенціалу рекреаційного простору, який зосереджений у природних умовах, історичних характеристиках та людях, їх світоглядно-ментальній сутності, освіченості, відчутті естетичних потреб.

Згідно з результатами проведеного дослідження можна зробити висновок, що в процесі проектування і комплексної реновації архітектурно-ландшафтного середовища слід виділяти два основні блоки принципів: планувальні та об'ємно-просторові. До блоку планувальних принципів належать принципи цілісності архітектурно-ландшафтного середовища, функціональної варіативності, диференціації ландшафтів, збереження і перетворення ландшафтів. Блок об'ємно-просторових принципів – це принципи співмасштабності архітектурних і ландшафтних компонентів середовища, рівноваги міського силуету та видовищності архітектурно-ландшафтного середовища. Усі принципи тісно пов'язані між собою, бо кінцевою метою їх дотримання є високоякісне середовище життєдіяльності людини.

Список літератури:

1. Сычева А.В. Архитектурно-ландшафтная среда. Минск : Вышэйшая школа, 1982. 182 с.
2. Вергунов А.Н., Денисов Н.В., Ожегов С.С. Ландшафтное проектирование. Ленинград : Стройиздат, 1994. 260 с.
3. Макухін В.Ф. Планувальна композиція сучасного міста. Київ : Будівельник, 1974. 66 с.
4. Ключниченко Є.Є. Соціально-економічні основи планування та забудови міст. Київ : Укрбудінформ, 1999.
5. Вергунов А.П. Архитектурно-ландшафтная организация крупного города. Ленинград : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 135 с.
6. Фремpton К. Современная архитектура: Критический взгляд на историю развития. Москва : Стройиздат, 1990. 535 с.

Vasylyshyn Ia.V. DIRECTIONS OF RESEARCH OF AESTHETIC ORDERING OF ARCHITECTURAL AND LANDSCAPE ENVIRONMENT

The article summarizes the modern understanding of the aesthetic arrangement of recreational landscapes and architectural and landscape organization of urban spaces. New directions and scientific approaches of research of aesthetics and the organization of a landscape, development of principles of designing of the architectural and landscape environment which will allow to improve compositional-planning and functional structure of the city as a whole are formulated. There are three main areas of research: 1) the study of the landscape as an aesthetic object, 2) the study of man as a subject and object of aesthetic perception; 3) knowledge of the laws of aesthetic perception of the landscape by man. The main approaches of aesthetic and landscape research are considered: qualitative, subjective-descriptive, neuropsychological, spatial-normative, geographical, psychological-empirical, psychological-phenomenal. The basic compositional principles of landscape environment design are substantiated: planning (integrity of architectural-landscape environment, functional variability, differentiation of landscapes, preservation and transformation of landscapes) and spatial-spatial (co-scale of architectural and landscape components of environmental environment, force environment). The main aesthetic categories in their application to the landscape are generalized. The content and recommendations for the tasks of landscape planning, landscape design and design are substantiated. An example of research and educational design in the field of landscape at the Department of Architecture and Urban Planning of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, namely: "Structural-functional and architectural-planning reorganization and development of the Dniester canyon".

Key words: aesthetic arrangement, landscape, architectural-landscape environment, landscape-ecological reconstruction, urban space.

Орлова О.М.

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ДВОТАВРОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ НОРМАЛЬНИМИ ТРІЩИНАМИ ПРИ КРУЧЕННІ

Наведені дані експериментальних досліджень міцності і жорсткості залізобетонних двотаврових елементів із нормальними тріщинами в процесі дії на них крутного моменту. Показано, що залежність «крутний момент – кут закручування» є практично лінійною. Суттєві нелінійні деформації з'являються на останніх етапах навантаження перед руйнуванням. Тому при нормативних крутних моментах рекомендовано вважати роботу залізобетонних елементів двотаврового поперечного перерізу з нормальними тріщинами лінійною. Показано, що наявність поздовжньої арматури впливає на міцність і жорсткість балок із нормальними тріщинами. Доволі велику частину зовнішнього крутного моменту сприймають нагельні сили в поздовжній арматурі. Різницю між зовнішнім крутним моментом і моментом нагельних сил в арматурі сприймає верхня полка двотаврового елемента. За відсутності поздовжньої арматури верхня полка може руйнуватись при навантаженнях, набагато менших, ніж руйнуюче навантаження балок із поздовжньою арматурою. Арматування експериментальних балок із нормальними тріщинами тільки поздовжньою арматурою суттєво впливає на їх жорсткість. На міцність при крученні поздовжня арматура елементів із нормальними тріщинами впливає не так суттєво, як на жорсткість.

Збільшення діаметра поздовжньої арматури призводить до зменшення деформацій і відповідно збільшення жорсткості балок при крученні. На основі експериментальних досліджень і з огляду на попередні теоретичні дослідження автора спростовано давню думку, що поздовжня арматура не впливає на міцність при крученні. Наведені факти, на погляд автора, мають бути враховані під час практичних розрахунків несучих систем залізобетонних будівель і споруд.

Ключові слова: двотавровий елемент, кручення, нормальні тріщини, жорсткість і міцність при крученні, поздовжня арматура, нагельна сила.

Постановка проблеми. Відомо, що врахування просторової роботи багаторазово статично невизначених систем (перекрытия, мости, каркаси будівель) дає змогу істотно уточнити зусилля, що виникають в окремих елементах складної системи. Відомо також, що перерозподіл зусиль між окремими елементами статично невизначених систем залежить від співвідношення згинальних і крутильних жорсткостей цих елементів [1]. Водночас у залізобетонних статично невизначених системах на згинальну і крутильну жорсткості впливає утворення різних тріщин (нормальні, похилі, просторові, тріщини відриву та ін.). Нормальні тріщини утворюються вже на невисоких рівнях навантаження. Утворення тріщин тягне за собою стрибкоподібну зміну жорсткості елемента, при цьому жорсткість може зменшитись в кілька разів.

При досить широкій вивченості жорсткості залізобетонних елементів при згині їх жорсткість і міцність при крученні мало вивчена. При цьому основна увага в наукових роботах

і нормативних документах, присвячених роботі залізобетонних елементів при крученні, приділена елементам із просторовими (спіральними) тріщинами [4; 5; 9; 11; 12]. Однак, експериментальними і теоретичними дослідженнями було показано [1; 3; 10], що нормальні тріщини також істотно впливають на жорсткість при крученні стрижневих залізобетонних елементів. У роботах [1; 3; 6; 7; 8] розглянуті чисельні і наближені методики визначення крутильних жорсткостей елементів прямокутного, таврового, коробчастого і порожнистого трикутного перерізів. У роботі [2] розглянуті питання розрахунку жорсткості та міцності залізобетонних двотаврових елементів при крученні. Експериментальним дослідженням роботи залізобетонних елементів прямокутного, коробчастого і порожнистого трикутного перерізу присвячені публікації [6–8]. Однак експериментальні дослідження жорсткості і міцності залізобетонних двотаврових елементів із нормальними тріщинами при крученні не проводилися.

Постановка завдання. Метою статті є експериментальне дослідження міцності і жорсткості залізобетонних двотаврових елементів із нормальними тріщинами при крученні.

Виклад основного матеріалу дослідження. У процесі експерименту передбачалося дослідити крутильну жорсткість і міцність залізобетонних елементів двотаврового перетину з нормальними тріщинами на моделях. Були виготовлені зразки з розмірами, показаними на рис. 1.

Метою досліджень було встановлення характеру зміни характеристик жорсткості зразків із різними діаметрами поздовжньої арматури і різними розмірами поперечного перерізу. Через те, що автором теоретично було встановлено, що для двотаврових елементів із малою товщиною стінки висота тріщини грає не істотну роль, було прийнято рішення прийняти однакову висоту нормальної тріщини, яка дорівнює половині висоти перерізу елемента, а варіювати розмірами поперечного перерізу та діаметром арматури.

Штучні нормальні тріщини були створені за допомогою пластинок з оргскла, які вставляли в місці розташування тріщини при укладанні

бетону в опалубку. Такі тріщини поділяли зразки за довжиною на окремі блоки, пов'язані між собою частиною бетону без тріщин і поздовжньою арматурою (рис. 2). Довжина блоків становила 300 мм. Крім того, три зразки були зроблені суцільними, без штучних нормальних тріщин.

Ширина нижньої полиці для всіх зразків була однаковою і становила 85 мм, її товщина – 45 мм. Товщина ребра також не варіювалася і дорівнювала 30 мм. Висота зразків становила 220 мм. Варіювалися ширина b_f і товщина h_f верхньої полиці, а також діаметр поздовжньої арматури. Верхня полиця не була армована сіткою для виключення впливу арматури з метою більш точного визначення її міцності і впливу нагельної сили в поздовжній арматурі на міцність і жорсткість елемента при крученні. Загалом було випробувано 9 балок із штучними нормальними тріщинами і 3 балки без тріщин для порівняння.

Для аналізу експериментальних даних і встановлення залежності між параметрами деформування (кутом закручування блоків, відокремлених тріщинами) і величиною зовнішнього навантаження були побудовані графіки «крутий

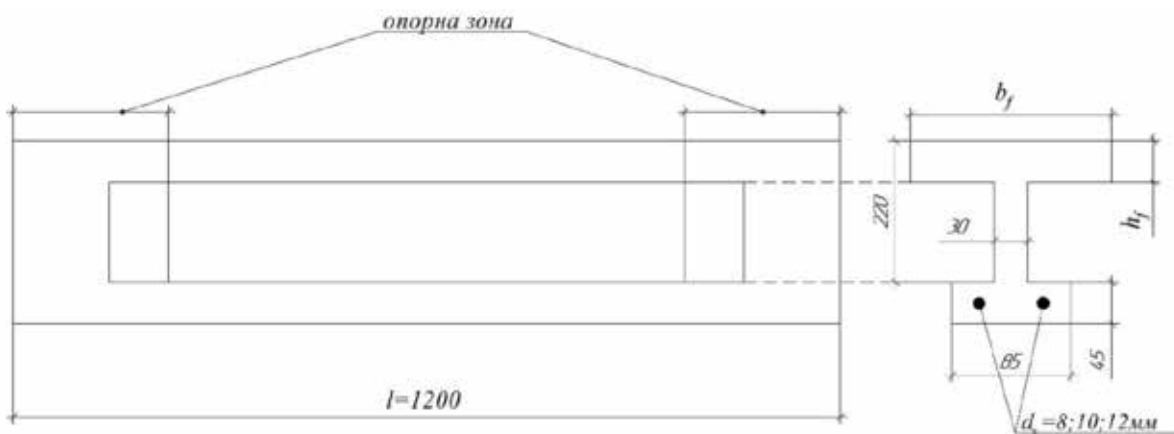


Рис. 1. Розміри експериментальних зразків

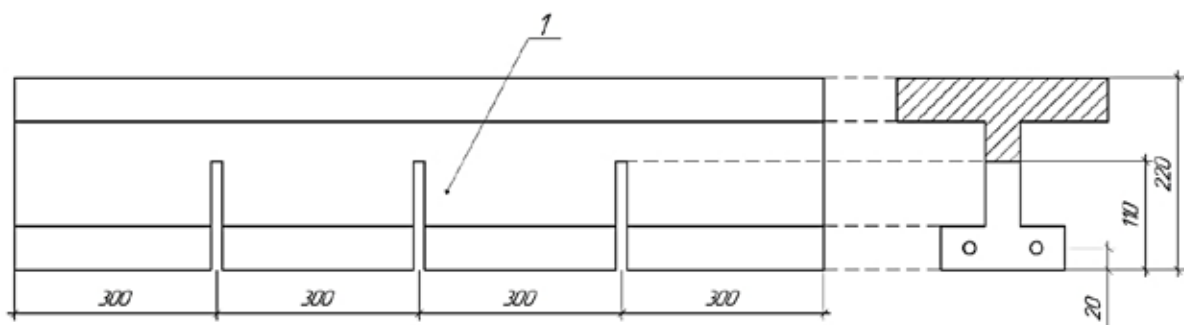


Рис. 2. Схема утворення штучних тріщин і армування зразків; 1 – вставка з оргскла

момент-кут закручування». На рис. 3–5 для прикладу наведені такі графіки для деяких випробуваних балок.

На рисунках 3–5, окрім залежностей «крутний момент-кут закручування», показані максимальні значення крутного моменту M_{max} , тобто руйнуючого крутного моменту. На передостанніх етапах навантаження прибори для вимірювання були прибрані для попередження їх руйнування, тому значень кутів закручування при руйнуванні немає.

З графіків можна бачити, що залежність «крутний момент – кут закручування» є практично лінійною. Суттєві нелінійні деформації з'явилися на останніх етапах навантаження перед руйнуванням. Тому при нормативних навантаженнях можна вважати роботу зразків лінійною.

Балка з розмірами $b_f = 300$; $h_f = 40$; $ds = 12$ (див. рис. 5) була передчасно крихко зруйнована від виколювання поздовжньої арматури, що скоріш за все є недоліком її бетонування. Тому її руйнуючий момент значно менший за руйнуючі моменти інших балок цієї ж серії.

Картина тріщиноутворення усіх зразків із штучними нормальними тріщинами мала подібний характер. Із вершини штучної тріщини з'являлася похила тріщина, яка поширювалась до верхньої полиці балки. Надалі картина кілька етапів навантаження оставалася незмінною. У деяких зразках відбувалося відшарування бетону біля поздовжньої арматури, але це не впливало на міцність зразків, за виключенням зразка (див. рис. 5). При подальшому навантаженні у верхній полиці балки з'являлася просторова тріщина. При цьому деформації суттєво збільшувалися, після чого настав момент руйнування балки.

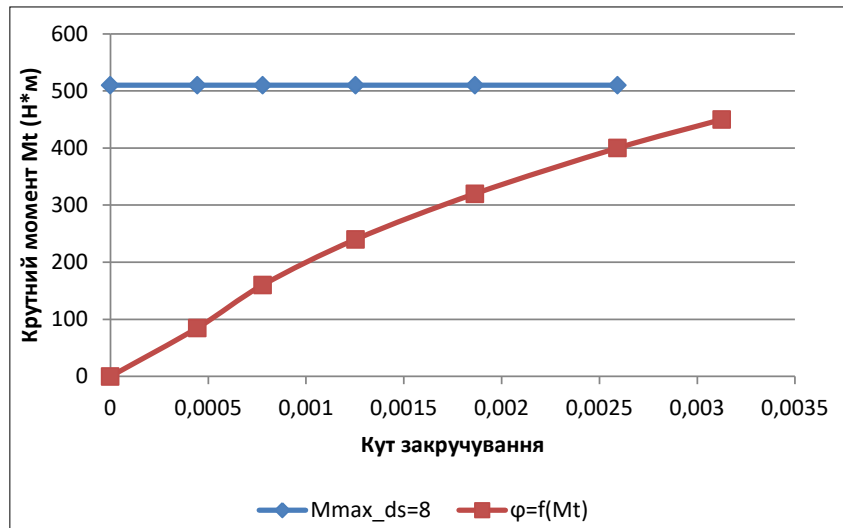


Рис. 3. Кути закручування і руйнуючі моменти для балки з розмірами: $b_f = 300$; $h_f = 30$; $ds = 8$

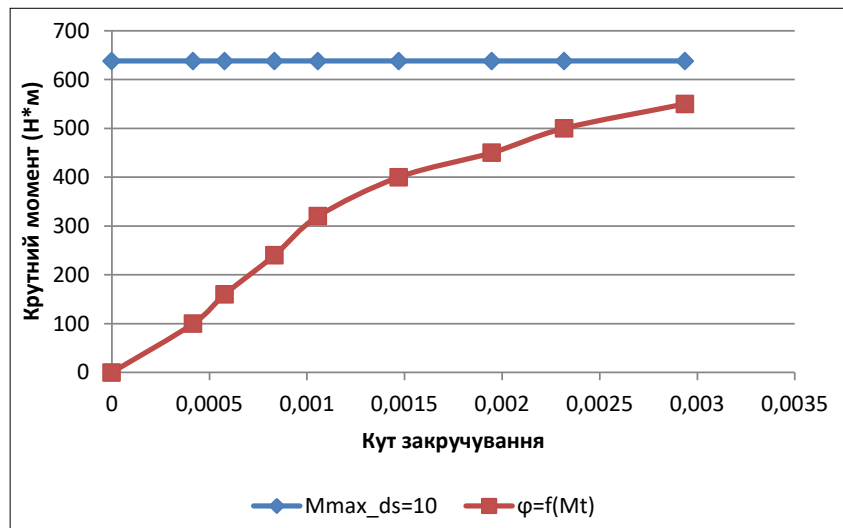


Рис. 4. Кути закручування і руйнуючі моменти для балки з розмірами: $b_f = 300$; $h_f = 40$; $ds = 10$

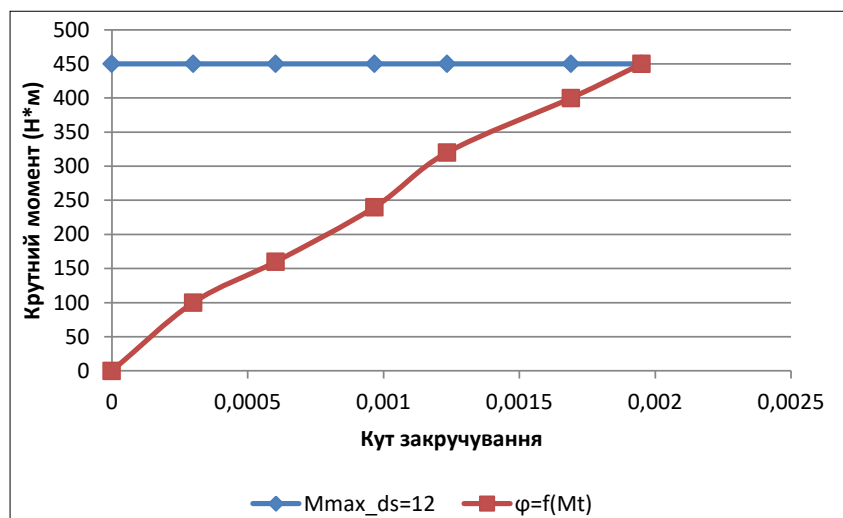


Рис. 5. Кути закручування і руйнуючі моменти для балки з розмірами: $b_f = 300$; $h_f = 40$; $ds = 12$

На рис. 6 показано загальний вигляд похилої тріщини з початком у вершині штучної нормальної тріщини.



Рис. 6. Похила тріщина від вершини штучної нормальної тріщини в балці

На рис. 7–8 показано загальний вигляд балок у процесі руйнування.



Рис. 7. Руйнування балки

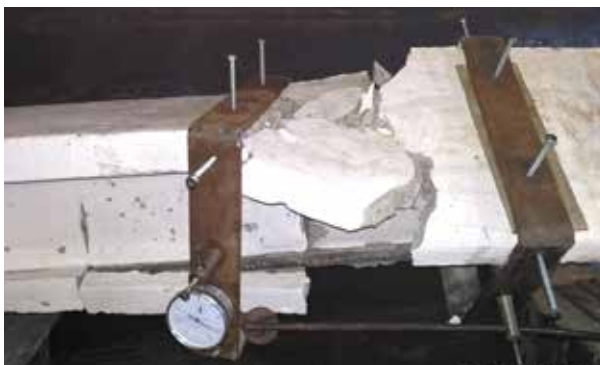


Рис. 8. Передчасне руйнування балки від виколування поздовжньої арматури

Аналізуючи експериментальні дані, можна констатувати, що наявність поздовжньої арматури впливає на міцність і жорсткість балок із нормальними тріщинами. Доволі велику частину зовнішнього крутного моменту сприймають нагельні сили в поздовжній арматурі. Різницю між зовнішнім крутним моментом і моментом нагельних сил в арматурі сприймає верхня полка двотаврового елемента. За відсутності поздовжньої арматури верхня полка може руйнуватись при навантаженнях, набагато менших, ніж руйнуюче навантаження балок із поздовжньою арматурою. Цей факт підтверджує і передчасне руйнування балки, яка описана вище, від виколування поздовжньої арматури.

На відміну від балок із штучними нормальними тріщинами в балках без тріщин спочатку з'являлися похилі тріщини в ребрах. Потім ці тріщини ширились у нижню і верхню полицю. У верхній полиці з'являлася просторова тріщина. При цьому деформації різко зростали. Після цього балки руйнувалися в результаті втрати несучої здатності верхньої полиці. Руйнуючі моменти балок без тріщин були дещо більшими, ніж моменти балок із тріщинами.

Висновки. Експериментальними дослідженнями встановлено, що діаграма «крутний момент – кут закручування» залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами до високих рівнів навантаження має лінійний характер. Пластичні деформації мають місце на останніх етапах завантаження, перед руйнуванням. Основним типом руйнування є руйнування верхньої полиці двотаврового елемента з розвитком просторової тріщини кручення.

Армування експериментальних балок із нормальними тріщинами тільки поздовжньою арматурою суттєво впливає на їх жорсткість. На міцність при крученні поздовжня арматура елементів із нормальними тріщинами впливає не так суттєво, як на жорсткість. Доволі велику частину зовнішнього крутного моменту сприймають нагельні сили в поздовжній арматурі. Різницю між зовнішнім крутним моментом і моментом нагельних сил в арматурі сприймає верхня полка двотаврового елемента.

Збільшення діаметра поздовжньої арматури призводить до зменшення деформацій і, відповідно, збільшення жорсткості балок під час кручення. Збільшення жорсткості і міцності верхньої полиці впливає як на загальну жорсткість балок, так і на їх міцність.

Дослідження показують, що міцність залізобетонних елементів при крученні залежить від перерізу поздовжньої арматури в разі наявності нормальних тріщин, що спростовує давню думку, що поздовжня арматура не впливає на міцність при крученні. Наведені факти, як вважає автор, мають

бути враховані під час практичних розрахунків несучих систем залізобетонних будівель і споруд.

Перспективою досліджень є розроблення практичних рекомендацій для проектування залізо-

бетонних двотаврових елементів із нормальними тріщинами в процесі дії на них крутних моментів із врахуванням попередніх теоретичних розробок автора та експериментальних досліджень.

Список літератури:

1. Азизов Т.Н. Жесткость железобетонных элементов при кручении и ее влияние на пространственную работу мостов. Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : Збірник наукових праць. НАН України. Фізико-мех. інститут ім. В.Г. Карпенка. Львів, 2009. С. 576–590.
2. Азизов Т.Н. Крутильная жесткость железобетонных двутавровых балок с многоядным армированием при наличии нормальных трещин / Т.Н. Азизов, О.М. Орлова, Е.В. Нагайчук. *Sciences of Europe*. 2019. Vol. 1, № 36. P. 35–39.
3. Азизов Т.Н. Определение крутильной жесткости железобетонных элементов с трещинами. Дороги і мости. Збірник наукових праць. Київ : ДерждорНДІ, 2007. Вип. 7. Том 1. С. 3–8.
4. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. Москва : Стройиздат, 1976. 208 с.
5. Коуэн, Г.Дж. Кручение в обычном и предварительно напряженном железобетоне: Пер. с англ. Москва : Изд-во литературы по строительству, 1972. 104 с.
6. Мельник О.В. Крутильна жорсткість та міцність залізобетонних елементів коробчастого перерізу з нормальними тріщинами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Одеська державна академія будівництва та архітектури. Одеса, 2012. 22 с.
7. Мельник О.С. Жорсткість та міцність залізобетонних елементів порожнистого трикутного перерізу з нормальними тріщинами при крученні : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Одеська державна академія будівництва та архітектури. Одеса, 2013. 24 с.
8. Срібняк Н.М. Крутильна жорсткість залізобетонних елементів перекриттів із нормальними тріщинами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Одеська державна академія будівництва та архітектури. Одеса, 2009. 23 с.
9. ACI 318-11, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-11), American Concrete Institute, Farmington Hills, 2011.
10. Azizov T. Calculation of reinforced concrete ceilings with normal cracks accounting the Chebyshev approximation / T. Azizov, O. Melnik and others. 6 th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings” Transbud-2017. Kharkiv, April 19–21, 2017. S. 1–7.
11. BS EN 1990:2002+A1:2005, Eurocode: Basis of Structural Design (includes Amendment A1:2005), (2002) 21.
12. Kochkarev D. Bending deflection reinforced concrete elements determination / D. Kochkarev, T. Azizov and T. Galinska. Published online: at the MATEC Web of Conferences, 16 November 2018.

Orlova O.M. THE EXPERIMENTAL RESEARCHES OF REINFORCED CONCRETE I-BEAM ELEMENTS WITH NORMAL CRACKS WHEN TURNING

The data of experimental researches of the rigidity of reinforced concrete I-beam elements with normal cracks at the action on them of the twisting moment have resulted in this paper. It is shown that the dependence “torque-twist angle” is almost linear. Significant nonlinear deformations appear in the last stages of loading before failure. Therefore at normative torques, it is recommended to consider the work of reinforced concrete elements of the I-beam cross-section with normal cracks linear. It is shown that the presence of longitudinal reinforcement affects the strength and rigidity of beams with normal cracks. Quite a large part of the external torque is perceived by the pin forces in the longitudinal reinforcement. The difference between the external torque and the moment of the pin forces in the armature is perceived by the upper shelf of the I-beam element. In the absence of longitudinal reinforcement, the upper shelf can collapse at loads much smaller than the destructive load of beams with longitudinal reinforcement.

Reinforcement of experimental beams with normal cracks only by longitudinal reinforcement significantly affects their rigidity. The torsional strength of the longitudinal reinforcement of elements with normal cracks does not affect as significantly as the stiffness. Quite a large part of the external torque is perceived by the nail forces in the longitudinal reinforcement. The difference between the external torque and the moment of the nail forces in the armature is perceived by the upper shelf of the I-beam element. Increasing the diameter of the longitudinal reinforcement leads to a decrease in deformation and, accordingly, an increase in the stiffness of the beams during torsion. Based on experimental researches and taking into account previous theoretical researches of the author the long-existing opinion that longitudinal armature does not influence durability at torsion is refuted. These facts, in the opinion of the author, should be taken into account when conducting practical calculations of load-bearing systems of reinforced concrete buildings and structures.

Key words: I-beam, torsion, normal cracks, torsional strength, longitudinal reinforcement, pin force.

ГЕОДЕЗІЯ

UDC 528.4:332.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/39>

Liu Chang

Institute of Electronics and Information Engineering
of the Guangdong Ocean University

Mamonov K.A.

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

Kondratyuk I.V.

Geodetic Survey Center LLC

Kanivets O.M.

Sumy National Agrarian University

GEOINFORMATION SYSTEMS: FEATURES OF REALIZATION OF THE EDUCATIONAL PROGRAM OF PREPARATION OF MASTERS¹

The necessity of preparation of specialists which can be qualified to apply geographic information system. It is established that there remain unresolved issues of definition and application of geographic information systems and training for the development of the modern educational system, scientific approaches. The aim of the study is to identify areas and characteristics of the formation and development of the education master's program in geographic information systems. To achieve this goal the following tasks: justification of the components of the master's program in geographic information systems; the practical aspects of the application of the master program in geographic information systems.

Defined objects of study: theoretical foundations, techniques, technologies and equipment for collection and analysis of geospatial data about the shape and size of the Earth, its reflection on the maps and plans, ensuring the construction of engineering structures (including underground) and the study of spatial relationships between objects and structures.

Formed learning objectives: developing graduates' ability to solve complex specialized tasks and practical problems in the course of professional activities or teaching that involves the use of theoretical knowledge in the field of geoinformation systems and technologies and equipment in the field of topographic and geodesic production with the aim of obtaining and analyzing geospatial data. In the framework of educational program implemented competency-based approach to the study of geographic information systems.

It is established that by implementing the educational master's programme can solved practical issues for creation of geoinformation monitoring maps for informed decision-making. The study suggests directions and define the elements of the formation and use of educational master program in geographic information systems. Its implementation allows to prepare modern specialists and to identify scientific aspects of the development of geoinformation systems in various fields.

Key words: *geographic information systems, educational master program, facilities and training goals, competencies, practical aspects of program implementation.*

Introduction. The current state of the state's economy requires a rethinking of approaches to ensuring its development. In this context the modern tools deserve attention, which allows

to form a quantitative basis for making sound management decisions. One such tool is geographic information systems, which combine quantitative methods and research models that allow you to visualize processes, which increases the level of monitoring of processes occurring in the state. The use of geographic information systems requires the training of specialists who can use geographic

¹ This article are supported by the project of Enhancing School With Innovation of Guangdong Ocean University's (230420023), by the program for scientific research start-up funds of Guangdong Ocean University, and planning project for Educational Science Planning of Heilongjiang Province (GJB1319104).

information systems. Therefore, the research topic is relevant, its solution allows to solve a set of complex problems.

Analysis of existing research. Directions and features of the use of geographic information systems and technologies are presented in the developments [1–10].

Along with this, the issues of defining and applying geographic information systems and training specialists for the development of a modern educational system and scientific approaches remain unresolved.

Materials and methods. The research uses general scientific methods: systematization, comparison, dialectical development of systems, methodology of normative-legal and information-analytical support of geoinformation systems and special methods of geoinformation analysis.

The purpose and objectives of the study. The purpose of the study is to determine the directions and features of the formation and development of the educational master's program geographic information systems. To achieve this goal the following tasks are solved:

- substantiation of the components of the master's program in geographic information systems;
- description of practical aspects of application of the master's program in geographic information systems.

Main part. The master's program in geographic information systems is determined by the relevant components. In particular, the objects of study are identified: theoretical foundations, methods, technologies and equipment for collecting and analyzing geospatial data on the shape and size of the Earth, its display on maps and plans, ensuring the construction of engineering structures (including underground) and studying geospatial relationships between objects and structures.

Learning objectives are formed: formation of graduates' ability to solve complex specialized tasks and practical problems in the process of professional activity or training, which involves the application of theoretical knowledge of geographic information systems and technologies and equipment in topographic and geodetic production to obtain and analyze geospatial data.

Theoretical content of the subject area: knowledge about the shape and size of the Earth, concepts and principles of topographic and geodetic activities and land cadastre, as well as their information support. Basic knowledge of natural sciences and in-depth knowledge of mathematics and information technology.

Methods, techniques and technologies: field, in-house and remote research methods, methods of collecting and processing geospatial data, geoinformation systems, technologies of field and in-house works.

Tools and equipment: geophysical, navigation, aerosole equipment, photogrammetric and cartographic systems, specialized GIS, surveying, and photogrammetric software for solving applied tasks in geodesy and land management [11].

Defines General competence (LC):

1. The ability of oral and written communication in Ukrainian and foreign languages.
2. The ability to learn to perceive the knowledge obtained in the field of geodesy, photogrammetry, land surveying, cartography and Geoinformatics and integrate them with existing ones.
3. The ability to be critical and self-critical to understand the factors that have a positive or negative impact on communication, and the ability to identify and consider these factors in concrete communicative situations.
4. Ability to plan and manage time.
5. The ability to produce new ideas, to show creativity and the ability of systematic thinking.
6. The ability to search and critically analyze information from different sources.
7. To be focused on safety.
8. The ability to a flexible way of thinking which enables to understand and solve problems and tasks while maintaining a critical attitude to established scientific concepts.
9. The ability to use knowledge in practice.
10. To have research skills.
11. To have skills of development and project management.
12. Ability to work both individually and in a team.
13. Ability to communicate effectively on professional and social levels.
14. The potential for further training.
15. Responsible for the quality of work performed [11].

Special competence who are studying the master educational programme (SK) with the following:

1. Knowledge of scientific concepts, theories and methods necessary for understanding the principles of operation and function of the modern geodetic photogrammetric instrument and navigation systems and their equipment.
2. Knowledge of the main normative legal acts and reference materials, standards and technical conditions, instructions and other normative-administrative documents in their professional activities.

3. Knowledge of technical characteristics, design features, purpose and rules of operation of geodesic, photogrammetric, nautical equipment and equipment.

4. Knowledge of specialized software and geographic information systems and basic programming skills for solving practical professional problems.

5. Knowledge of professional and civil security in the tasks of professional activity.

6. Knowledge of modern technological processes and systems of technological preparation of production.

7. The ability to apply and integrate knowledge and understanding of related disciplines in the engineering industries.

8. Ability to use and implement new technologies, to participate in modernization and reconstruction of equipment, devices, systems and complexes, in particular with the aim of increasing their effectiveness and precision.

9. The ability to understand and take into account the social, environmental, ethical, economic aspects influencing the formation of technical solutions.

10. Ability to use professionally-profiled knowledge and practical skills for solving typical problems of the specialty, and selection of technical means for their implementation.

11. The ability to use knowledge and skills to calculate a priori estimates of the accuracy and selection of technologies for the design and execution of applied professional task.

12. The ability to identify, classify and describe the digital model through the use of analytical methods and modelling techniques.

13. The ability to explore a problem and identify constraints including those arising from issues of sustainable development and the impact on the environment.

14. The ability to substantiate the choice of methods for solving specialized problems, critically evaluate obtained results and to defend their decisions.

15. The use of appropriate terminology and forms of expression in professional activity [11].

Selected special (professional) competencies of choice (VSC):

1. Ability to design, organize and perform geodetic works using modern methods, instruments and software.

2. Ability to apply geographic information technologies for modeling and analysis of spatial objects and phenomena; to develop geographic information systems for various purposes.

3. Ability to apply knowledge of laws, standards and methods for the valuation of land and real estate.

4. Ability to apply knowledge on land management, rational use of land resources, improving the efficiency of land use with the use of modern technologies of land management design and land accounting.

The learning outcomes of the educational master's programme geo-information technologies are:

– use oral and written technical Ukrainian language and be able to communicate in a foreign language (English) in the circle of specialists in geodesy and land management;

– to know the theoretical foundations of geodesy, higher geodesy and engineering, topographic and thematic mapping, compilation and map updating, remote sensing and photogrammetry, land management, property valuation and land cadastre;

– know the regulatory-legal framework for ensuring the rational use, protection, registration and assessment of lands at the national, regional, local and household levels, procedures of state registration of land plots, other real property and limitations in their use;

– to apply the methods and technology of creation of the state geodetic networks and special engineering-geodetic networks, topographic surveys of the area, topographic and geodetic measurements for survey, design, construction and operation of engineering structures, public, industrial and agricultural complexes, using modern ground-based and aerospace methods;

– use methods of collecting information in the field of geodesy and land management, its classification in accordance with the intended design or production specifications;

– use geodetic and photogrammetric equipment and technology, methods of mathematical processing of geodetic and photogrammetric measurements;

– to use methods and techniques of land use planning, territorial and economic land management, planning, use and protection of land, cadastral surveys and maintenance of the state land cadastre;

– to develop projects of land management, land and cadastral documentation and documentation on land valuation, to make maps and prepare cadastral data with the use of computer technology, geographic information systems and digital photogrammetry;

– processing the results of geodetic measurements, topographic and cadastral surveys using GIS technology and computer software and database management system;

– possess the technologies and techniques of planning and execution of geodetic, topographic and cadastral surveys and computer processing of the results of surveys in geographic information systems;



Fig. 1. Geographic information map of generalizing spatial indicators of territorial development of land use of regions, rel. from

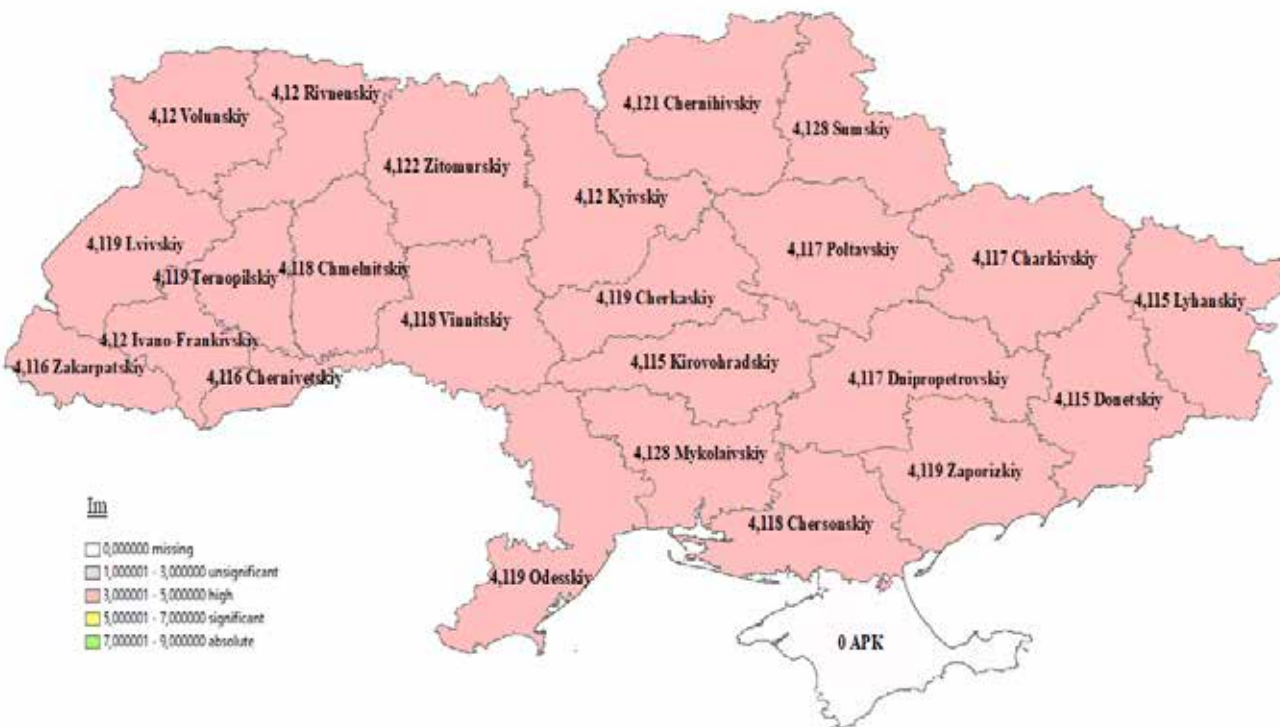


Fig. 2. Geoinformation map of generalizing town-planning indicators of territorial development of land use of regions, rel. from



Fig. 3. Geoinformation map of generalizing investment indicators of territorial development of land use of regions, rel. from

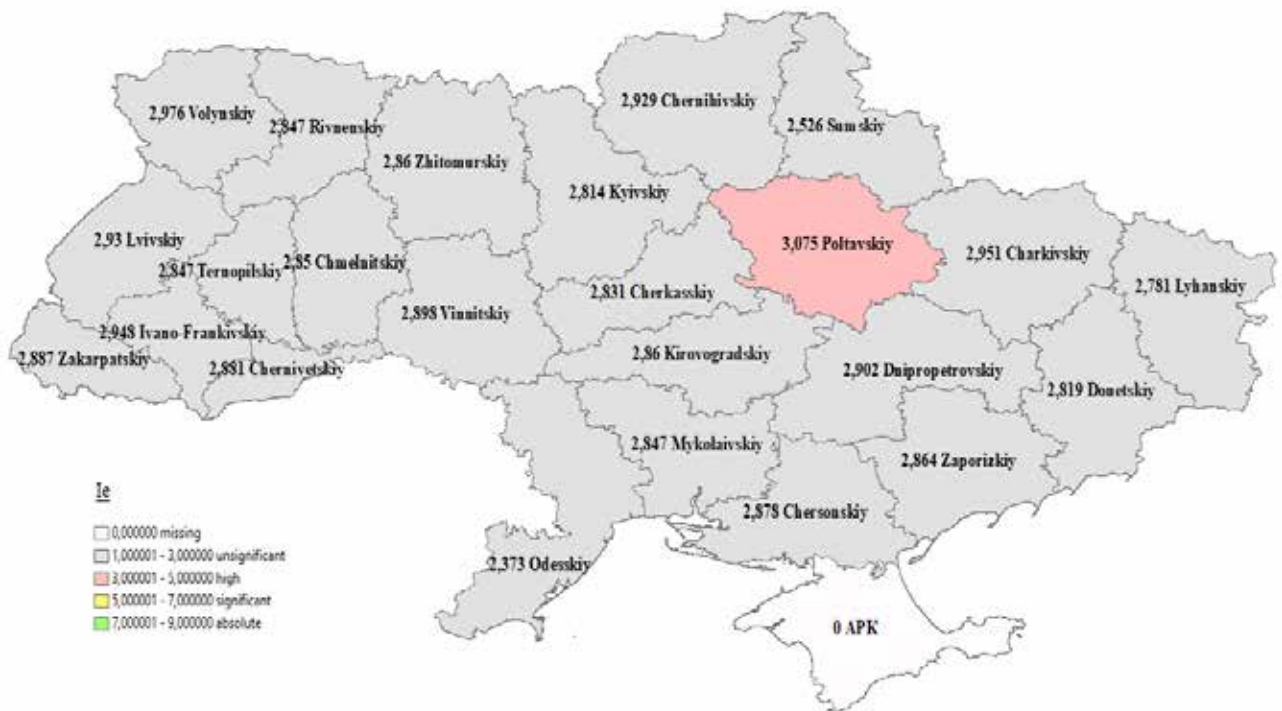


Fig. 4. Geoinformation map of generalizing ecological indicators of territorial development of land use of regions, rel. from

- to know the methods of land use planning, territorial and economic land management, planning, use and protection of land taking into account the influence of several socio-economic, ecological, landscape, environmental and other factors;
- to know the methods of organization of topographic surveying production from field measurements to the management and implementation of topographic and land-based products using knowledge of the fundamentals of legislation and production management;
- possess modern methods, instruments and software for the design, organization and execution of geodetic works;
- own geo-information technology for modeling and analysis of spatial objects and phenomena;
- to perform the valuation of land and immovable property;
- owning modern technologies of land use planning and registration of lands for rational use of land resources, improve the efficiency of land use [11].

According to the developed program the modules are defined:

- basic principles and approaches to the development and application of geographic information systems;
- geoinformation systems tools;

- features of application of geoinformation systems: general approach;
- application of geographic information systems at the regional level;
- use of geographic information systems in housing and communal services;
- application of geographic information systems in construction;
- use of geographic information systems in other areas of regional development.

Implementing the educational master's program, practical issues regarding the formation of monitoring geoinformation maps for making informed decisions can be solved (Fig. 1–4).

Conclusions. As a result of the research the directions and elements of formation and use of the educational master's program on geographic information systems are offered. Its implementation allows to train modern specialists and determine the scientific aspects of the development of geographic information systems in various fields. The practical directions of realization of the educational master's program on geoinformation systems on the basis of the constructed geoinformation maps of indicators of territorial development of land use of regions are considered, that has allowed to form monitoring system for increase of efficiency of decision-making in system of land relations.

References:

1. Генсецький М.П. Методичні основи геоінформаційного забезпечення інженерних комунікацій в експлуатаційних системах : дис. ... канд. техн. наук : 05.24.01. Київськ. нац. ун-т буд-тва і архіт. Київ, 2004. URL: <http://dissert.com.ua/content/20248.html>.
2. Корнієць А.В. Особливості застосування ГІС-технологій в Україні. *Матеріали науково-практичної конференції, присвяченої Міжнародному дню геоінформаційних систем. (Харків, 19 листопада 2015 р.)*. Харків : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова, 2015. С. 47–50.
3. Мамонов К., Корнієць А. Застосування геоінформаційних систем для моніторингу використання земель міст. Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених "GeoTerrece-2017" (14–16 грудня 2017 р.) : збірник матеріалів. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. С. 216–218.
4. Мамонов К.А., Штерндок Е.С. Методи і моделі оцінки формування, розподілу та використання земель мегаполісу, що застосовуються у системі геоінформаційного забезпечення. *Економічна кібернетика: аспекти становлення і розвитку електронної економіки* : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. (Дніпро, 1–2 берез 2017 р.) Дніпро : Пороги, 2017. С. 92–96.
5. Палеха Ю.Н., Олещенко А.В., Соломаха И.В. Применение ГИС-технологий в градостроительных проектах на государственном и региональном уровнях. *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. География*. 2012. 25 (64). № 1. С. 155–166.
6. Штерндок Е.С. Моделирование влияния пространственных факторов на оцінку та використання земель мегаполісу : дис. ... канд. техн. наук : 05.24.04. Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, 2017. 246 с.
7. Шипулін В.Д. Основи ГІС-аналізу : навчальний посібник. ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. Харків. 2014. 336 с.
8. Шипулін В.Д. Основні принципи геоінформаційних систем : навчальний посібник. ХНАМГ. Харків. 2010. 313 с.
9. Goodchild M.F. Geographical information science. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1992, No. 6 (1), Pp. 31–45.

10. ISO 19152:2012 Geographic information – Land Administration Domain Model (LADM). 2012. 118 p. URL: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm.

11. Освітня програма (освітньо-професійна). Геодезія та землеустрій. Другий (магістерський) рівень вищої освіти. Галузь знань: 19 «Архітектура та будівництво». Спеціальність: 193 «Геодезія та землеустрій». Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. 21 с.

Лю Чан, Мамонов К.А., Кондратюк І.В., Канівець О.М. ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ: ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ОСВІТНЬОЇ ПРОГРАМИ ПІДГОТОВКИ МАГІСТРІВ

Обґрунтована необхідність підготовки спеціалістів, що можуть кваліфіковано застосовувати геоінформаційні системи. Встановлено, що залишаються невирішеними питання щодо визначення та застосування геоінформаційних систем та підготовки спеціалістів для розвитку сучасної освітньої системи, наукових підходів. Метою дослідження є визначення напрямів та особливостей формування й розвитку освітньої магістерської програми «Геоінформаційні системи». Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання: обґрунтування складників магістерської програми з геоінформаційних систем; характеристика практичних аспектів застосування магістерської програми з геоінформаційних систем.

Визначені об'єкти вивчення: теоретичні основи, методики, технології та обладнання для збирання та аналізу геопросторових даних про форму та розміри Землі, її відображення на картах і планах, забезпечення зведення інженерних споруд (включаючи підземні) та вивчення геопросторових зв'язків між об'єктами та структурами.

Сформовані цілі навчання: формування у випускників здатності розв'язувати складні спеціалізовані завдання та практичні проблеми в процесі професійної діяльності або навчання, що передбачає застосування теоретичних знань з геоінформаційних систем та технологій і обладнання у галузі топографо-геодезичного виробництва з метою отримання та аналізу геопросторових даних. У рамках освітньої програми реалізовано компетентнісний підхід до вивчення геоінформаційних систем.

Встановлено, що, реалізуючи освітню магістерську програму, можуть бути вирішені практичні питання щодо формування моніторингових геоінформаційних карт для прийняття обґрунтованих рішень. У результаті дослідження запропоновані напрями та визначені елементи формування й використання освітньої магістерської програми з геоінформаційних систем. Її реалізація дає змогу підготувати сучасних спеціалістів та визначити наукові аспекти розвитку геоінформаційних систем у різних сферах.

Ключові слова: геоінформаційні системи, освітня магістерська програма, об'єкти і цілі навчання, компетентності, практичні аспекти реалізації програми.

УДК 624:528:004
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/40>

Русіна Н.Г.

Відокремлений структурний підрозділ «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Льольчик В.О.

Відокремлений структурний підрозділ «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Кийко Н.М.

Відокремлений структурний підрозділ «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Кушнірук О.М.

Відокремлений структурний підрозділ «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Рудько О.М.

Відокремлений структурний підрозділ «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

ЩОДО ПИТАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 3D КАДАСТРУ НЕРУХОМОСТІ: ЗАРУБІЖНИЙ ДОСВІД

У статті досліджуються сучасні тенденції розвитку інформаційного забезпечення 3D земельного кадастру, особливості розробки стандартів впровадження в дію 3D-кадастру та використання земельно-кадастрових даних для управління «розумними містами» для цілей сталого розвитку за кордоном. Система управління земельними ресурсами, що забезпечує механізм підтримки управління нерухомістю, є однією з найважливіших інфраструктур будь-якої країни. Головним стержнем управління земельними ресурсами є земельний кадастр. Традиційна двовимірна (2D) реєстрація нерухомих об'єктів більше не відповідає вимогам сучасного суспільства і є потреба в 3D-реєстрації реальних об'єктів нерухомості. Ведення 3D-кадастру забезпечують WEB-ресурси. Ведення 3D-кадастру здійснюється за міжнародними стандартами CityGML, що забезпечують єдиний простір для роботи з 3D-об'єктами. Просторові одиниці кваліфікаційно поділені на будівельні підрозділи та комунальні мережі. Моделювання будівельної інформації (ISO 19166 BIM2GIS) має надати концептуальні рамки для картографічного відображення інформації BIM та необхідного механізму картографування. Особливо це стосується програми «розумне місто», яка передбачає постійний моніторинг споживання енергії, шумового забруднення тощо. Збагачення 3D-моделей міст непросторовою інформацією забезпечить якісне містобудівне планування, створення та обслуговування 3D-кадастрів на основі реєстрації 3D-випадків. Концептуальна Рамка для відображення інформації про BIM у ГІС визначається за допомогою таких трьох механізмів: перспективне визначення BIM до ГІС (B2G PD); картографування елементів BIM до ГІС (B2G EM); картографування BIM у GIS LOD (B2G LM). Моделювання об'єктів нерухомості за допомогою так званих «тіл» дасть змогу проводити повноцінний аналіз та розрахунки на міцність.

Ключові слова: кадастр нерухомості, геоінформаційна система, атрибутивні дані, тривимірна модель, просторовий аналіз.

Постановка проблеми. Система управління земельними ресурсами, що забезпечує механізм підтримки управління нерухомістю, є однією з найважливіших інфраструктур будь-якої країни. Ця інфраструктура необхідна для планування та реалізації політичних рішень, пов'язаних із

земельними питаннями, і загалом для підтримки суспільних відносин щодо володіння, користування і розпорядження землею в державі. Основною частиною сучасної системи управління земельними ресурсами є земельний кадастр, який розвивається протягом багатьох століть – спочатку

для оподаткування, а потім для надання правового захисту власникам земельних наділів. Сучасний земельний кадастр – двигун управління земельними ресурсами, головним завданням якого є підтримка інтегрованої системи управління земельними ресурсами, ефективного ринку землі, прозорості реєстрації прав власності на земельні ділянки, електронного ведення документообігу, відкритості та публічності у сфері земельних відносин.

Підкреслимо, що в багатьох правових системах земля традиційно визначається як природне середовище, яке охоплює поверхню землі та всі прив'язані до неї об'єкти, як над, так і під землею поверхнею (грунт, будівлі, інші природні та побудовані об'єкти тощо). З юридичної точки зору земля, тобто нерухомість, може бути визначена як абстрактна сутність, яка виявляється як сукупність прав на її використання, обов'язків та обмежень. Земельний кадастр включає дані про землю, будівлі та інші нерухомі споруди на, над і під землею поверхнею, тому термін «земельний кадастр» можна прирівняти до терміна «кадастр нерухомості». Нині традиційний кадастр не завжди може повною мірою забезпечити інтереси у сфері нерухомості та вимоги сучасного управління земельними ресурсами. Міжнародні дослідження показали, що традиційна двовимірна (2D) реєстрація нерухомих об'єктів більше не відповідає вимогам сучасного суспільства і є потреба в 3D-реєстрації реальних об'єктів нерухомості [1].

Зокрема, в міських територіях, зокрема в інших районах інтенсивного використання людиною, є тенденція використовувати простір над і під поверхнею землі, над і під об'єктами нерухомості і т. д. Складні тривимірні об'єкти не можуть бути визначені і зареєстровані як кадастрові об'єкти в традиційному 2D земельному кадастрі і представлені в 2D кадастровій карті. Звичайна система управління земельними ділянками, заснована на 2D-кадастрі, не дає змоги вертикально розділити простір об'єкта, змушує інвестора придбати весь об'єкт або отримати інші права, що дають змогу використовувати визначений простір чужої власності, наприклад сервітут права. Впровадження таких інвестицій у містах, що супроводжуються придбанням цілих об'єктів, створює додаткові витрати; здійснення інвестицій лише під землею, яка знаходиться у муніципальній чи державній власності, без купівлі нерухомості інших сторін може призвести до неоптимального розташування об'єктів.

Таким чином, за останнє десятиліття попит на тривимірний (3D) кадастр у всьому світі

значно зріс. Нині замало багатоцільового 3D-кадастрового графічного зображення із просторовим розширенням земельних ділянок. Дані реального світу про фізичні об'єкти (тобто про землю та об'єкти, які пов'язані із нею) мають бути включені до концептуального та модельного кадастру нерухомості. 3D-представлення моделей фізичних об'єктів, таких як будівлі, транспортна та комунальна інфраструктура, водотоки тощо, роблять кадастр нерухомості легким для розуміння для користувачів та створюють основу для розробки багатоцільового кадастру. Саме створення такого багатоцільового 3D-кадастру нерухомості в Україні є актуальним і важливим. Туму вивчення досвіду європейських країн із цього питання робить значний внесок у створення національного 3D-кадастру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Розвиток інформаційного забезпечення земельного кадастру у країнах Європи та Північної Америки відбувається значно швидше, ніж у країнах пострадянського простору. Прикладом цього є система земельного кадастру Франції, яка ведеться на електронній кадастровій карті країни, де можна онлайн отримати просторову інформацію про земельні ділянки, але для отримання даних про власника необхідно робити офіційний запит. Кадастрова система Іспанії складається з реєстру прав і кадастрової карти та поділяється на міську і сільську, а інформація відображає сучасний стан земель і показує зміни. США не має єдиної кадастрової системи земельних ділянок, у кожному штаті діє своя система [2].

Однією з найважливіших умов ефективного управління нерухомістю в зарубіжних країнах є введення 3D-кадастру. Сучасний кадастр є плоским, тобто двовимірним (2D). Чинний двовимірний кадастр не дає змоги чітко побачити лінії електропередач, телевежі, комунікаційні труби і висотні об'єкти, тобто практично неможливо здійснити облік таких об'єктів нерухомості, як дорожні розв'язки, мости і тунелі, багаторівневі комплекси нестандартної форми, з нависаючим другим, третім поверхом, що потрапляють на чужу територію [3]. Ведення 3D-кадастру забезпечують WEB, можливості яких розширені від WEB-публікації до повноцінної WEB-середини ГІС, що забезпечує динамічну взаємодію різних даних про об'єкт. Наприклад, в Oracle Spatial 11G передбачена підтримка растрових зображень аерофотознімків і супутникових знімків, тривимірних триангуляційних мереж для цифрових моделей рельєфу, тривимірних хмар точок для даних лідар-

ної зйомки, а також простих і складових об'ємних геометричних тіл, які можна використовувати для подання таких об'єктів інфраструктури, як будівлі. Незважаючи на постійний розвиток баз даних, вони не підтримують всі типи геометрії, необхідної в області архітектури, проектування та будівництва [4].

3D-кадастр є складником багатоцільового кадастру (multipurpose cadastre), який розглядається як основа географічної локалізації та визначення технічної, правової, фіскальної та економічної інформації, пов'язаної із землею. Багатоцільовий кадастр можна розглядати як суспільну, оперативну й адміністративно інтегровану систему даних про землю, яка містить у постійному та доступному вигляді інформацію про землю на рівні «нерухомої одиниці» [5].

Формування багатоцільового кадастру здійснюється на основі визначення відповідних напрямів, що враховують кожну зі складових частин державного земельного кадастру [6]. У багатоцільовому кадастрі можна зазначити такі фундаментальні концепції для реєстрації 3D-ситуацій [7]:

- 3D-ознаки в наявній системі кадастрової реєстрації (рішення передбачає збереження 2D-кадастру із зовнішніми посиланнями на цифрову презентацію 3D-ситуацій);

- гібридне рішення (обов'язкова реєстрація двовимірних ділянок та додаткова реєстрація 3D юридичного простору у випадках одиниць 3D-власності; обов'язкова реєстрація двовимірних ділянок та додаткова реєстрація фізичних 3D-об'єктів у випадках одиниць 3D-власності);

- повна 3D кадастрова реєстрація (комбінована 2D/3D-альтернатива; повноцінний 3D-кадастр).

Саме тому постає питання нагальної необхідності запровадження 3D кадастру, який би відображав земельну ділянку у трьох просторових аспектах, враховуючи всі об'єкти під та над поверхнею певної ділянки, і права власності кожної частини таких ділянок та об'єктів, як це поширено в інших країнах, що сприятиме запобіганню неоднозначності у визначенні прав власності. Найбільш розвинені країни світу вже мають досвід часткового переходу до 3D-кадастрів, тому було б доцільним розглянути особливості обліково-реєстраційної системи земельних ресурсів зарубіжних країн із метою виявлення позитивних тенденцій та наслідків, до яких треба прагнути й Україні [8].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження сучасних тенденцій розвитку інформаційного забезпечення 3D земельного кадастру,

особливостей розробки стандартів впровадження в дію 3D-кадастру та використання земельно-кадастрових даних для управління «розумними» містами для цілей сталого розвитку за кордоном.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нова програма розвитку міст ООН Хабітат-III являє зміну парадигм, засновану на наукових досягненнях урбаністики, стандартах і нових принципах планування, будівництва, розвитку міст, управління ними та поліпшення стану міських районів. Програма зробила наголос на сталому міському розвитку як на найважливішому етапі для досягнення стійкого розвитку на основі комплексного і скоординованого підходу на глобальному, регіональному, національному, регіональному і місцевому рівнях, з участю всіх відповідних суб'єктів [9]. При цьому земельний кадастр відіграє важливу роль для розвитку та росту більшості країн, оскільки він включає в себе питання землекористувань. Він, як відомо, є основою для більшості питань розвитку та індикатор для створення благоустрою. Деякі країни уже створили багатоцільовий кадастр для різних юрисдикцій. Однак менш ніж 50 країн світу не мають повноцінної земельної інформаційної системи, також жодна країна не має повної тривимірної кадастрової інформаційної системи, що включає всі аспекти (3D-законодавство, 3D-геодезичні методи, реєстрація 3D-прав, обмежень та відповідальності, управління і т. д.) [7].

Rajabifard і Ho [9] стверджують, що парадигма, заснована на 2D-базах даних для запису та подання інформації про землю та майно, має обмежене значення, і що є чіткий попит на більш ефективні підходи до управління інформацією та аналізу для прийняття рішень із місцем розташування (3D-земля та майно). Це важливо для досягнення результатів сталого планування та постійного управління розумними містами. Як представили Kitsakis та інші [10], 3D-нерухомість, як квартири багатоповерхових будівель, зареєстрована в більшості країн, але її майже неможливо відобразити на 2D цифрових (кадастрових) картах. Зміна 2D-парадигми на реєстрацію 3D-просторових одиниць дасть змогу зареєструвати та відобразити зазначені тривимірні об'єкти нерухомості (багатоквартирні будинки, офісні центри або підземні гаражі, метро). Зв'язок 3D кадастрової інформації з безліччю інформаційних потоків, що стосуються міського середовища, зберігає актуальність та роль кадастрової інформації як основної для всього суспільства [11]. У двовимірній цифровій кадастровій карті не можливо відобразити

просторові межі всіх просторових одиниць. Оскільки міста стають структурно складними з ростом підземної інфраструктури, 3D-кадастр забезпечує розумну відповідь.

У 2016 році в Нідерландах було запроваджено 3D правові норми об'єктів нерухомості, які бути зареєстровані в земельному кадастрі. Вихідні дані – BIM (Building Information model) [7]. Для цих цілей кадастру використовують стандарт ISO 19152. Перша редакція міжнародного стандарту ISO 19152: 2012 Географічна інформація – Модель домену земельної адміністрації (ISO / TC 211, 2012) була опублікована у 2012 році. Вона визначає референтну концептуальну модель, що охоплює основні інформаційні компоненти реєстрації земель. Чотири основні класи стандарту ISO 19152 (ISO / TC 211, 2012) [7]:

- клас LA_Party. Випадками цього класу є сторони;
- клас LA_RRR. Випадки підкласів LA_RRR – це права, обмеження або обов'язки;
- клас LA_BAUnit. Випадки цього класу є основними адміністративними одиницями;
- клас LA_SpatialUnit. Випадками цього класу є просторові одиниці.

Однією з переваг цієї моделі є беззаперечна ідентифікація будь-якої земельної функції, шляхом впровадження спеціального ідентифікатора об'єкта (Oid), який складається з двох частин: Локальний ідентифікатор та простору імен [7]. Основні адміністративні одиниці підлягають реєстрації (за законом), так і пов'язані унікальні та однорідні права (обмеження/обтяження). Просторові одиниці кваліфікаційно поділені на будівельні підрозділи або комунальні мережі. ISO 19152 також надає стереотипні класи для наборів даних із зовнішніх джерел. З цієї точки зору, перша версія ISO 19152, опублікована в 2012 році, підтримує ідею повторного використання наявних 3D зовнішніх даних (наприклад, BIM) для цілей 3D-кадастру [12].

Друга версія ISO 19152, яка нині в процесі розвитку, йде на крок далі (в плані описаної моделі) і має надавати користувачам приклади технічних кодувань LADM (наприклад, використання BIM/IFC). Особливо це стосується програми «розумне місто», яка передбачає постійний моніторинг споживання енергії, шумового забруднення та багато іншого, що викликано швидкою урбанізацією у всьому світі. Збагачення 3D-моделей міст непросторовою інформацією забезпечить якісне містобудівне планування, створення та обслуговування 3D-кадастрів на основі реєстрації 3D-випадків (3D

просторові одиниці). Таке збагачення вимагає реалізації масштабною системи, здатної зберігати, маніпулювати, аналізувати, керувати та відображати різні типи просторових та непросторових даних та їх взаємозв'язки [12]. Нова версія ISO 19152 буде значно розширена на нові пакети та додатки. Нещодавно ISO 19152 почала враховувати також інформацію про просторове планування. Наприклад, просторове планування регулює загальну висоту будівлі на ділянці. Пакет підтримує геометрію об'єкта, який представляє ієрархію просторового планування та геометричні характеристики, полегшує інформацію в зоні просторового планування та описує громади та їх роль у просторовому плануванні. Важливість тривимірного просторового планування підкреслюють дослідники [13; 14] для цілей управління «розумними» містами.

Моделювання будівельної інформації (ISO 19166 BIM2GIS) має надати концептуальні рамки для картографічного відображення інформації BIM та необхідного механізму картографування. Концептуальна Рамка для відображення інформації про BIM в ГІС визначається за допомогою трьох механізмів [12]: 1) перспективне визначення BIM до ГІС (B2G PD): підтримує перспективне представлення інформації залежно від конкретної вимоги наприклад, управління міським об'єктом; 2) картографування елементів BIM до ГІС (B2G EM): підтримує відображення елементів від моделі BIM до моделі ГІС. Як BIM та ГІС схеми моделі різні, B2G EM вимагає правила відображення із зазначенням способу перетворення з моделі BIM в елемент моделі ГІС; 3) картографування BIM у ГІС LOD (B2G LM): підтримує визначення LOD та генерацію від моделі BIM до моделі ГІС. LOD, як визначено в моделі ГІС, складається з LOD, що представляють інформацію про геометрію об'єкта в ГІС. Визначені моделі LOD є механізмом візуалізації та класів, які являють собою граничне зображення, засноване на концепції поверхні. Щоб представити BIM-об'єкт у ГІС, інформацію про LOD необхідно витягти з моделі BIM з урахуванням кожної концепції LOD ГІС модель. Це може бути визначено набором правил відображення LOD.

Тісно пов'язаною роботою з ISO 19166 (B2GM) є технічний звіт ISO / NP TR 23262 GIS (GEOSPATIAL) / BIM INTEROPERABILITY. Цей документ має на меті визначити вимоги до стандартів, щоб дозволити двостороннє відображення між двома платформами, що дасть змогу відобразити будь-яку модель BIM / IFC на схемах додатків ГІС та навпаки.

Технічний звіт ISO / TR 23262 буде вивчати [12]: 1) розробка відображає два напрями – правила семантичного посередництва інформаційного потоку між ГІС (Загальна модель функцій, визначена в ISO 19101: 2014 Географічна інформація – Довідкова модель та ISO 19109: 2015 Географічна інформація – Правила схеми застосування) та метамоделью IFC; 2) картографування між геометричною/топологічною моделлю GIS (ISO 19107: 2003 Географічна інформація – Просторова схема) та ISO 10303-42: 2014. Системи промислової автоматизації та інтеграція – Представлення та обмін даними про продукцію – Частина 42: Інтегрований загальний ресурс: Геометричне та топологічне подання. Він вивчить геометричне та топологічне подання, включаючи відмінності у типах сегментів та інтерполяціях кривих та поверхонь; 3) перетворення координат між ГІС та BIM. ГІС має масштабний коефіцієнт у своїх прогнозах, який може давати відхилення, коли мова йде про дані з високою точністю, а BIM використовує 3D декартові координати, які можуть давати відхилення, коли йдеться про спеціальні дані, оскільки він розглядає світ як рівну поверхню; 4) зв'язок між типами функцій у ГІС та логічним зв'язком елементів у IFC та подальша семантична сумісність; 5) картографування термінів між ГІС та BIM; 6) Рекомендації Робочої групи з інтегрованого цифрового побудови навколишнього середовища (RGP IDBE). Бачення цієї спільної робочої групи буде пояснено спільними концептуальними відмінностями між геопросторовими та BIM методологіями та низкою ланцюжків цінностей для інтегрованих цифрових даних та технологій побудованого середовища.

Зв'язок програмного забезпечення дозволить, з одного боку, створення реалістичних тривимірних твердотільних об'єктів нерухомості, а з іншого – зберігання атрибутивної інформації, закріпленої за цими об'єктами і розв'язання різноманітних завдань, пов'язаних із просторовим аналізом і отриманням довідкової документації. Будь-яка GIS, у тому числі і ArcGis, у змозі впоратися з цим завданням, тому що дає змогу створювати схему бази даних, в якій ця інформація буде і зберігатися, і оброблятися за допомогою запитів. Наприклад, покупець житла зможе викупити не тільки площу, але і вид із вікна квартири, у 3D-реєстр можна внести той об'єм повітря, який відділяють вікна квартири від прилеглого будинку. Тривимірна модель дасть змогу проводити оцінку житла, ґрунтуючись на ринковій ціні, оскільки нині об'єкти, що знаходяться поруч, можуть відрізнятись в ціні мало чи не в тисячу разів. У 3D-реєстрі будуть відобра-

жені об'ємні моделі нерухомості, що допоможе побачити об'єкти на різних рівнях. Можна буде побачити дорожні розв'язки, тунелі, мости, трубопроводи, лінії метрополітену, інженерно-технічні споруди і комунікації, а також незавершене будівництво і зелені насадження [4]. Природно, що ця технологія підвищить якість обліку таких об'єктів, розширить можливості кадастрового обліку, вплине на процеси проектування і планування, дасть змогу приймати ефективніше управлінські рішення, планувати інвестиції, прискорити процес укладання угод. Тривимірна модель дасть змогу за лічені години провести висотну оптимізацію, вирішити питання прокладання додаткових ліній підземних комунікацій, можливість проведення земляних робіт і таким чином уможливить всебічну оцінку інвестиційного проекту. Нові методи, що відображають багатошарову модель об'єкта, допоможуть визначити реальну ринкову вартість незавершеного будівництва або виробництва, оцінити будівельну ситуацію, ступінь завершеності будівництва, визначити варіанти найбільш ефективного використання земельної ділянки, на якій розташований довгобуд. У разі точкової забудови буде не важко вписати майбутній об'єкт у навколишню інфраструктуру, визначити межі нерухомості, що належать іншим особам.

Висновки. Міжнародний стандарт ISO 19152, який нині переглядають і планують значно розширити, дає концептуальну базу для побудови 3D-кадастру на основі реєстрації 3D-просторових одиниць. Для широкого використання даних BIM у проектах ГІС, що стосуються розумних міст, необхідні механізми трансформації. Стандарт ISO 19166 має забезпечити професіоналам базові рамки для таких перетворень. Крім того, сфера застосування технічного звіту про сумісність GIS ISO / NP TR 23262 (геопросторовий) / BIM – це дослідження бар'єрів та пропозицій щодо поліпшення сумісності між геопросторовими стандартами, розробленими ISO / TC 211, та стандартами BIM, розробленими ISO / TC 59 SC 13. До виявлених проблем, які варто вирішити, зараховано особливості загальної термінології та відсутність експертів, які мають глибокі знання обох сфер. Однак сумісність між BIM та GIS може створити сильні ефекти синергії на операційному та стратегічному рівнях. Адже тривимірна фотореалістична візуалізація міської інфраструктури за допомогою твердих тіл, виконаних у програмному продукті AutoCAD, і створення 3D-кадастру на базі геоінформаційної системи ArcGis здатні змінити технологію і практику управління містом, міського планування навколишнього середовища, розробки та ведення проектів [4].

Список літератури:

1. Drobež P., Fras M. K., Ferlan M., Lisec A. Transition from 2D to 3D real property cadastre: The case of the Slovenian cadastre. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2017. № 6. P. 125–135.
2. Анопрієнко Т.В., Пілічева М.О., Маслій Л.О., Куліш Ю.Р. Сучасні тенденції інформаційного забезпечення земельного кадастру в Україні та світі. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Том 31 (70) Ч. 2. № 1. С. 146–152.
3. Поморцева О.Є. Тривимірний кадастр нерухомості: проблеми та рішення. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30 (69) Ч. 2. № 2. С. 206–210.
4. Поморцева О.Є. Тривимірний кадастр нерухомості: проблеми використання даних. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Том 30 (69) Ч. 2. № 3. С. 212–216.
5. Шипулін В.Д. Система земельного адміністрування: основи сучасної теорії [Текст] : навч. посібник / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015.
6. Тихенко О.В. Особливості формування багатоцільового кадастру в Україні. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2018. № 2. С. 50–57.
7. Нестеренко С.Г., Головачов В.В., Радзінська Ю.Б., Фролов В.О. Об'єкт нерухомості як тривимірна складова багатоцільового кадастру. *Комунальне господарство міст*. 2019. Том 3. Випуск 149. С. 119–125.
8. Кондратенко Д.Ю. Правові проблеми запровадження тривимірної облікової системи земель у сфері земельних відносин. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2015. Вип. 218. С. 137–145.
9. New Urban Agenda. URL: <http://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-English.pdf>.
10. Rajabifard A, Ho S (2015) Towards smart future cities: 3D cadastres as a fundamental enabler. *Coordinates*. URL: <https://mycoordinates.org/towards-smart-future-cities-3d-cadastres-as-a-fundamental-enabler>.
11. Kitsakis D, Paasch J, Paulsson J, Navratil G, Vucic N, Karabin M, El-Mekawy M, Koeva M, Janecka K, Erba D, Alberdi R, Kalantari M, Yang Z, Pouliot J, Roy F, Montero M, Alvarado A, Karki S (2018) Legal foundations. In: van Oosterom P (Ed.), *Best Practices 3D Cadastres*, pp. 1–66.
12. Janečka K. Standardization supporting future smart cities – a case of BIM/GIS and 3D cadastre. *GeoScope*. 2019. 13(2). P. 106–113
13. Atazadeh B, Kalantari M, Rajabifard A, Ho S, Ngo T (2017) Building information modelling for high-rise land administration. *Transactions in GIS* 21 (1): 91–113.
14. Bydłoz J, Bieda A, Parzych P (2018) The Implementation of Spatial Planning Objects in a 3D Cadastral Model. *International Journal of Geo-Information*. 7(4), 153.

Rusina N.H., Liulchyk V.O., Kyiko N.M., Kushniruk O.M., Rudko O.M.

ON THE ISSUE OF SOFTWARE 3D REAL ESTATE CADASTRE: FOREIGN EXPERIENCE

The article examines current trends in the development of information support 3D land cadastre, features of the development of standards for the implementation of 3D cadastre and the use of land cadastral data for the management of “smart cities” for sustainable development abroad. The land management system, which provides a mechanism to support real estate management, is one of the most important infrastructures of any country. The main core of land management is the land cadastre. Traditional two-dimensional (2D) real estate registration no longer meets the requirements of modern society and there is a need for 3D registration of real estate. Maintenance of 3D-cadastre is provided by WEB-resources. The 3D cadastre is maintained according to CityGML international standards, which provide a single space for working with 3D objects. Spatial units are qualitatively divided into construction units or utilities. Construction information modeling (ISO 19166 BIM2GIS) should provide a conceptual framework for the mapping of BIM information and the necessary mapping mechanism. This is especially true of the “smart city” program, which provides for constant monitoring of energy consumption, noise pollution and much more. Enrichment of 3D-models of cities with non-spatial information will provide high-quality urban planning, creation and maintenance of 3D-cadastres on the basis of registration of 3D-cases. The conceptual Framework for displaying BIM information in GIS is defined by the following three mechanisms: long-term definition of BIM to GIS (B2G PD); mapping of BIM elements to GIS (B2G EM); mapping BIM to GIS LOD (B2G LM).

Key words: real estate cadastre, geographic information system, attribute data, three-dimensional model, spatial analysis.

УДК 622.271.3
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/41>

Савчук Л.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Доскіч С.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

РЕВІТАЛІЗАЦІЯ ТЕРИТОРІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ЯЗІВСЬКОГО ТА НЕМИРІВСЬКОГО РОДОВИЩ СІРЧАНИХ РУД

Надмірне споживання природних ресурсів спричинило утворення великої кількості порушених земель, непридатних для використання. У зв'язку з цим у середині минулого століття виник новий науково-технічний напрям – рекультивация, що передбачає повернення порушених територій до початкового або близького до початкового стану. Відкриття потужних родовищ сірчаних руд на Львівщині в 50-х роках минулого століття дало потужний поштовх розвитку видобутку сірки і виробництву низки продуктів хімічної промисловості. Вичерпання руд із високим вмістом сірки, економічна недоцільність використання бідних руд, нарощування видобутку дешевої сірки, яку отримували як побічний продукт очищення природного газу та нафти від сірковмісних сполук, спричинило припинення видобутку сірки і закриття підприємств хімічної галузі, що базувалися на території родовищ. Було проведено рекультивацию території родовищ сірчаних руд – Язівського та Немирівського з утворенням найбільшої штучної водойми Львівщини Яворівського озера. Мета роботи – моніторинг стану рекультивованої території Язівського та Немирівського родовищ сірчаних руд для їх повноцінного використання. Це дасть змогу забезпечити екологічну безпеку, попередити надзвичайні ситуації та науково обґрунтувати рішення ефективного господарського освоєння відновлених територій. Проведені дослідження показали, що в початковий період затоплення мінералізація води на поверхні озера була досить високою і становила 2360 мг/дм³, щороку вона зменшувалася і вже влітку 2012 року на поверхні озера вода була прісною (969 мг/дм³). З 2012 року якість води погіршується, з 2013 року опріснення озера припинилося. У липні 2015 року спостерігалось підвищення мінералізації води на поверхні озера до 1150 мг/дм³, у травні 2017 року вона збільшилася до 1248 мг/дм³ і до цих пір знаходиться межах 1248–1280 мг/дм³. Вода в озері належить до кальцій-сульфатних, із високим значенням твердості і дуже високим вмістом сульфатів, що можна пояснити розчиненням гіпсоангідритів та вапняку. На початкових стадіях затоплення спостерігали високий вміст сірководню, в останніх пробах до глибини 30 м ця токсична домішка відсутня. Прозорість води в озері – 8 м. Після добування сірки ґрунти забруднені сіркою, вміст якої зменшується з глибиною, в шарі ґрунту до 20 см 2–3%, на глибині 20–40 см 0,4–0,6%. Змінився і рН ґрунтів, він становить 3-4, а на деяких ділянках – 1,5–2. Для відпрацьованих територій характерне вторинне засолення ґрунтів, вони стали біотоксичними. Водночас у прибережній зоні велика кількість озерної рослинності, уже водиться риба. Яворівське озеро має всі необхідні умови для організації на його базі регіонального центру рекреації.

Ключові слова: рекультивация, ревіталізація, техногенно порушені землі, постмайнінг, рекультивация, водні ресурси.

Постановка проблеми. У своєму розвитку людство завжди намагалося підкорити природу будь-яким шляхом, надмірно споживаючи її ресурси і руйнуючи все, що його оточувало. Надмірне споживання стало моделлю суспільного розвитку. Це призвело до вичерпування природних ресурсів: вирубки лісу, виснаження родовищ корисних копалин, надмірного споживання та забруднення води, руйнування земельного фонду тощо. Таке ставлення до довкілля спричинило забруднення Землі відходами (твердими, рідкими, газоподібними), порушило баланс при-

родних процесів. Минулого століття внаслідок бурхливого промислового розвитку в Україні загалом і Львівській області зокрема розробляли велику кількість родовищ корисних копалин і добували природну сірку, калійні солі, вугілля, залізни, уранові, нікелеві, титанові руди тощо. Родовища природної сірки Львівської області належали до найпотужніших у світі. Але за роки експлуатації багатші руди були використані, а з нижчим вмістом сірки переробляти було економічно не доцільно. Крім того, нарощувався видобуток дешевої сірки, яку отримували як побічний

продукт очищення природного газу та нафти від сірковмісних сполук і яка коштувала 25–35 доларів проти 100–120 за перероблення сірчаних руд. Тому в 1997 році було прийнято рішення про закриття найбільшого у світі Яворівського сірчаного кар'єра. У басейні р. Вісла утворилися величезні території порушених земель, непридатних для сільськогосподарського використання через їх забруднення сіркою та іншими шкідливими речовинами. Відновлення цих територій стало важливою проблемою, що вимагала негайного вирішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні реалії вимагають нових підходів до рекультивації порушених земель – їх відновлення і створення умов для відродження життя у всіх його проявах природним шляхом. Цього досягають ревіталізацією (відродженням) природного середовища, а саме: відслідковуванням процесів, що протікають на рекультивованих землях, прогнозуванням змін та наданням рекомендацій щодо управління процесами відновлення для забезпечення високої якості життя.

Одним із шляхів зменшення негативного впливу техногенних процесів на довкілля є рекультивація земель. Це науково-технічний напрям, що виник порівняно недавно і передбачає повернення порушених територій до початкового або близького до початкового стану. Проблемами рекультивації порушених земель займалися багато українських та зарубіжних учених. Серед них – В. Кнабе, І. Лазарева, Б. Колесников, С. Трофимов, Л. Моторина, В. Овчинников, Б. Волоसेцький, Р. Панас, А. Гайдін, І. Зозуля, М. Маланчук. Процесами рекультивації пост техногенних територій на заході України займалися і займаються науковці Львівського інституту гірничо-хімічної промисловості, які розробили і втілили в життя низку проектів щодо відновлення порушених земель [1, с. 29, 32; 2, с. 12].

Для проведення комплексу робіт із рекультивації порушених земель розроблено ДСТУ 7705:2015 Захист довкілля. Рекультивація земель. Терміни та визначення понять. Метою рекультивації є повернення порушених земель до ефективного використання в народному господарстві. Вибір відповідних заходів для відновлення порушених земель залежить від: природних умов району, стану порушених земель, характеристики складників території, інженерно-геологічних, гідрологічних, господарських, соціально-економічних та екологічних умов, технології і механізації гірничих і будівельно-монтажних робіт тощо. На

вибір виду рекультивації впливає агрохімічний склад ґрунтів і розривних порід, географічне розташування, соціально-економічні чинники, перспективи розвитку території [3, с. 16].

З огляду на сучасний стан екології та спровоковану ним зміну клімату, для повернення території, зайнятої порушеними землями до ефективного використання, використовують процес ревіталізації [4, с. 9]. Це поняття ширше ніж рекультивація і охоплює не тільки постмайнінг, але й постійне спостереження і контролювання стану відновлених земель і складників території та прогнозування подальших змін. Автори [4, с. 10] під постмайнінгом розуміють комплекс робіт, що проводять після завершення експлуатації родовища корисних копалин, який включає демонтаж обладнання, ліквідацію гірничих виробок, впорядкування гідромережі, планувальні роботи на ділянках, придатних для рекультивації. Моніторинг необхідний для ефективного управління процесами відновлення порушених земель та запобігання негативних проявів шкідливих чинників, що мали місце під час гірничо-промислових розробок.

Відродження посттехногенних територій є світовою проблемою. Так, після обвального падіння цін на сірку уряд Польщі прийняв рішення про закриття сірчаного кар'єра Махув і його перетворення на озеро для рекреації. Роботи фінансувалися з державного бюджету, виконувалися фахівцями Науково-дослідного центру «Сяркополь» і Гірничо-металургійною академією [5, с. 48].

Великий обсяг роботи виконали вчені Німеччини, які відразу після падіння Берлінської стіни провели рекультивацію солевидобувних та буровугільних кар'єрів, створивши озера, парки, пляжі, різні атракціони, дитячі майданчики, станції човнів [6, с. 167]. Починаючи з 2016 р. світова наукова спільнота постійно проводить міжнародні конференції, на яких розглядає способи (шляхи, напрями) поводження із закинутими шахтами та кар'єрами.

Постановка завдання. Величезні території порушених земель, утворені внаслідок розробки родовищ сірчаних руд на Львівщині, рекультивували, створивши штучну водойму, призначену для рекреаційного та господарсько-побутового використання. На стан території довкола водойми – ґрунтів, води, тваринного і рослинного світу тощо – впливає швидкість і якість процесів відновлення. Тому метою досліджень є моніторинг стану рекультивованої території Язівського та Немирівського родовищ сірчаних руд для їх повноцінного використання.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Процеси індустріалізації та урбанізації негативно впливають на навколишнє природне середовище. Тому першочерговим завданням є шляхи зменшення негативного впливу техногенних процесів на довкілля. Водночас одним із показників високого рівня життя є здоров'я населення, на яке впливають умови рекреації, якість питної води і таке інше. Тому, розглядаючи можливості рекультивації земель Язівського та Немирівського родовищ сірчанних руд, брали до уваги стан території і склад ґрунтів до початку видобутку сірки та можливості відновлення порушених земель для сільськогосподарського виробництва чи для рекреації. До відкриття в 1956–1957 рр. родовищ самородної сірки територія Яворівщини була вкрита мішаними лісами, за винятком болотистих ділянок у заплавах річок. Тут були розвинуті потужні четвертинні відкладення, представлені флювіогляціальними пісками. Вони містили водоносний горизонт прісної води високої якості. Ґрунтові води залягали на глибині 2–3 м, а в долинах – 0,5–1 м.

На Язівському родовищі сірчаної руди природну сірку видобували в основному методом підземної виплавки та частково кар'єрним способом. Немирівське родовище розробляли підземною виплавою. Розробка сірчанних родовищ супроводжувалася ландшафтними змінами: вилученням земель із господарського обігу, створенням техногенних ландшафтів, забрудненням ґрунтів сіркою, вирубкою лісів, створенням системи примусового відведення річок із території родовища будівництвом дамб, каналів, водосховищ. Після добування сірки ґрунти були забруднені її залишками та іншими шкідливими домішками, що негативно впливають на якість ґрунтових вод. Вміст сірки в шарі ґрунту до 20 см – 2–3%, на глибині 20–40 см зменшується до 0,4–0,6%. Змінився і рН ґрунтів: становить 3–4, а на деяких ділянках – 1,5–2. Для відпрацьованих територій було характерне підтоплення ґрунтів, що супроводжується вторинним засоленням. Ґрунти стали біотоксичними, а їх самоочищення без вживання спеціальних рекультиваційних заходів триватиме до 15–25 років. З огляду на вищевикладене і досвід із рекультивації таких територій у Польщі [5, с. 52], найбільший елемент техногенного ландшафту – Яворівський сірчаний кар'єр – було затоплено, а отриману водойму рекомендовано використовувати для рекреаційних цілей, а за потреби – для господарсько-питного водопостачання. Тому моніторинг стану території в межах найбільшої штучно створеної водойми Львівщини є дуже важливим.

Яворівський сірчаний кар'єр був котлованом, частково заповненим внутрішніми відвалами. Розміри поверхні – 3300 × 2700 м, дна – 2000 × 2200 м. Площа порушених земель по поверхні (по четвертинних відкладах) – 847 га, по третинних глинах – 525 га, по руді – 332,6 га, внутрішніх відвалів – 287,3 га. Практично по всьому периметру кар'єра внутрішні відвали відмежовані від борта кар'єра траншеєю глибиною 20–30 м і шириною в нижній частині в середньому 50 м. Винятком є лише західний борт Південного кар'єра. У центрі східного борта кар'єра була прокладена виїзна траншея. Її продовження була розрізна траншея, яка розмежувала Центральний і Південний кар'єри. Тут проходила рудовозна дорога.

До початку затоплення кар'єра найнижчі відмітки були в районі центрального зумпфу (130 × 130 м), який був розташований поблизу виїзної траншеї. На північ від нього знаходився північний зумпф, а з західної сторони центрального кар'єра – західний зумпф. Рівень води, відповідно, мав позначки 150–151 м, 153–154 м, 158–159 м. Відмітки підосви рудного покладу на східному фланзі Центрального кар'єра в основному знаходились у межах 146–150 м, в центрі кар'єра – 152–156 м, на західному фланзі – 155–160 м. Мінімальна позначка підосви на Південному кар'єрі – 155,8 м, і вона підвищується від центру до флангів. Найбільші відмітки вершин внутрішніх відвалів сягають 215–230 м. Схили внутрішніх відвалів відповідають куту природного схилу і місцями сповзають. Глибина Центрального кар'єра вздовж західного борта – 60–70 м, у центрі – 80 м, в районі центрального зумпфу – до 90 м, в північно-західній частині – до 105 м. Глибина Південного кар'єра – 50–70 м. Залишкова ємкість кар'єра дорівнює 307 млн м³.

Внаслідок ліквідації та рекультивації Яворівського кар'єра з видобування сірки, затоплення водою утворилася найбільша штучна водойма Львівської області, створена за проектом Львівського інституту «Гідрохіпром». Оскільки кар'єр перетинав басейн річки Шкло з притоками Гноєнець, Терешка та інші, в період експлуатації для відведення річок була створена складна система водовідведення. Згідно з проектом, який вже втілено в життя, передбачено відновлення річкового стоку з метою повернення річок у кар'єр і для подальшого витоку води з майбутнього озера старим руслом річки Шкло.

Заповнення кар'єра водою р. Шкло відбувалось в 2002–2006 роках.

Яворівський сірчаний кар'єр затоплений підземними, поверхневими і річковими (р. Шкло, р. Якша, р. Гноєнець) водами. Його максимальна глибина сягає 75 м у районі Центрального зумпфа. Глибина озера в районах видобувних зон сірчаної руди – 50–60 м, а в межах внутрішніх відвалів розташовані менш глибокі ділянки з глибиною 10–30 м. Об'єм озера становить 198 млн м³ при площі дзеркала води 694,2 га.

Озеро живиться з таких джерел: атмосферних опадів на площі водного дзеркала та прибережної водозбірної площі; води річок Гноєнець, Шкло і Якша; підземних вод неогенового водоносного комплексу, мінералізація яких становить біля 2700 мг/л.

У період експлуатації річка Шкло була забруднена стічними водами з технологічного комплексу. Після припинення його роботи пройшло самоочищення. Річкові води за вмістом основних компонентів відповідають нормативам для питної води. На витоку води з водосховища Новий Яр загальна мінералізація води становить 417 мг/дм³, вміст сульфатів – 97 мг/дм³, фосфати відсутні. Однак у канал впадають забруднені стоки з санаторію Шкло і з промзони, що розташована поблизу управління колишньої виробничого об'єднання «Сірка». У воді, що витікає з території санаторію Шкло, присутні сполуки азоту і фосфору, які свідчать про органічне забруднення.

У період затоплення кар'єрної виїмки мінералізація води на поверхні озера з кожним роком зменшувалася. На початку затоплення вона становила 2360 мг/дм³ [7, с. 58], наприкінці (2006 рік) – 1200 мг/дм³ [8, с. 122]. У період трансформації (першого водообміну) мінералізація продовжувала зменшуватися і влітку 2012 року на поверхні озера

вода була вже прісна (969 мг/дм³). З 2012 року якість води погіршується, з 2013 року опріснення озера припинилося. У липні 2015 року виявлено підвищення мінералізації води на поверхні озера до 1150 мг/дм³, в травні 2017 року вона збільшилася до 1248 мг/дм³. У каналі на витоку з озера мінералізація становила 1377 мг/дм³. Прозорість води в озері – 8,0 м. Практично стабільним був вміст іону калію в озерній воді (від 4.5 до 11 мг/дм³ в усій товщі озерної води) і вміст хлоріону (від 19 до 27 мг/дм³).

Хімічний склад води Яворівського озера в 2017 році наведено в таблиці 1.

Як видно з таблиці, в поверхневому шарі мінералізація води становить 1248 мг/дм³, а в каналі на витоку з озера – 1377 мг/дм³, що перевищує нормативні показники для питного водопостачання і для умов випуску води в гідромережу. Вода характеризується високим значенням твердості, що можна пояснити розчиненням гіпсоангідридів та вапняку. Ці мінерали не тільки активно відшаровувалися з бортів кар'єра на початку його затоплення, але й потрапляли у воду з внутрішніх відвалів, якими був заповнений кар'єр.

Негативним є забруднення води в озері сульфатами, кількість яких із глибиною зростає. Це, на нашу думку, пов'язане не тільки з хімічними процесами і розчиненням гіпсоангідридів, але й із діяльністю сульфатредукуючих бактерій. Якщо на початкових стадіях затоплення спостерігали високий вміст сірководню, то в останніх пробах до глибини 30 м ця токсична домішка відсутня. Це можна пояснити збільшенням води у водоймах (фактор розведення) й окисненням зеленими та пурпуровими сіркобактеріями.

Таблиця 1

Хімічний склад води Яворівського озера (мг/дм³)

Глибина, м	pH	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	P ₂ O ₅	H ₂ S	NH ₄ ⁺	Заг. мін.
0	6,9	29,7	290	6,1	173	710	5,1	0,0	0	2,1	1248
5	7,5	29,5	310	2,4	175	759	5,1	0,0	0	1,7	1314
10	7,5	29,7	300	2,4	170	995	5,8	0,0	0	2,5	1538
20	7,3	32,4	308	1,2	168	948	5,7	1,1	0	1,8	1500
30	6,6	35,9	340	13,4	373	1502	6,8	17,2	20,2	8,4	2352
40	6,6	38,5	332	4,9	368	1546	8,8	17,8	24,8	9,3	2386
50	6,6	41,1	336	2,4	383	1333	9,5	18,2	21,7	8,7	2188
60	6,6	41,9	330	4,9	370	1332	17,7	12,1	20,7	7,6	2174
70	6,6	42,5	338	4,9	358	1571	19,1	13,9	22,7	7,9	2415
82 дно	6,6	43,0	348	6,1	441	1308	16,1	33,1	28,4	17,3	2280
Заток. р. Шкло	7,7	13,5	246	8,5	175	377	7,2	0,0	0	1,9	856
Впад. р. Шкло в озеро	7,4	17,5	102	6,1	205	389	4,4	0,0	0	0,0	750
Витік з озера	7,8	37	326	45	168	769	–	0,4	–	–	1377

За останніми дослідженнями, вода Яворівського озера належить до такої, яка вважається чистою, солонуватою. Мінералізація води в поверхневій зоні стабілізувалася на рівні 1,3 г/дм³, сірководень відсутній. Подальше опріснення води можливе після завершення впускної споруди на річці Гноянець і осушенні водосховища Новий Яр, як це передбачено проектом. За даними Львівського управління охорони природи, вода техногенних водоймищ – ставків на річках у зоні діяльності колишнього Яворівського ДГХП «Сірка» відповідає якості природних вод цього регіону, і ці водоймища використовуються місцевим населенням. Нині площа озера близько 10 км², довжина берегової лінії – до 12 км. Рельєф дна є таким: максимальна глибина приблизно 70 м, є мілини з підводною і надводною рослинністю, затоплені пагорби, багато затоплених кущів та дерев. У прибережній зоні велика кількість озерної рослинності. Уже водиться риба: щука, плітка, карась, сазан, окунь, товстолобик, лин (на мілинах і в заростях тростини).

Яворівське озеро має всі необхідні умови для організації на його базі регіональних центрів рекреації. Необхідно прискорити освоєння рекреаційного

потенціалу цього озера, що дасть змогу створити прибуткові підприємства та нові робочі місця.

Висновки. Високий рівень використання природних ресурсів супроводжується вичерпанням їх запасів і утворенням порушених ландшафтів, які варто повертати в обіг, гармонійно вписуючи в довкілля відповідно до естетичних вимог. Для цього треба використовувати концепцію ревіталізації порушених територій – повернення до життя у всіх його проявах.

Ревіталізація території відпрацьованих Язівського та Немирівського родовищ сірчаних руд з утворенням штучної водойми – Яворівського озера є наочним прикладом повернення порушених земель до ефективного використання. Яворівське озеро може використовуватися як для відпочинку та спорту, так і для забезпечення населення питною водою.

Для забезпечення екологічної безпеки, попередження надзвичайних ситуацій та науково обгрунтованого ефективного господарського освоєння відновлених територій необхідно проводити їх постійний моніторинг.

Список літератури:

1. Гайдін А.М., Зозуля І.І. Яворівське озеро. Львів : ПТВФ «АФІША», 2007. 56 с.
2. Гайдін А.М., Зозуля І.І. Ландшафтний парк «Подорожжє». Львів : ПТВФ «АФІША», 2010. 37 с.
3. Панас Р.М. Рекультивация земель : навч. посібник. Львів : Новий світ, 2007. 224 с.
4. Гайдін А.М., Собко Б.Ю. Ревіталізація. Відновлення порушених ландшафтів в зонах діяльності гірничих підприємств : монографія / А.М. Гайдін, Б.Ю. Собко. Дніпро : ПП Кулик В.В., 2019. 218 с.
5. Gawlik B., Kopec J. Zagadnienia likwidacji wyrobyska kopalni siarki Machow w procesach restrukturyzacji przemyslu siarkowego. Kształtowanie krajobrazu terenow posteksploatacyjnych w gornictwie. Krakow, 2003. 367 p.
6. Thoma H., Seifert G., Kuehn F. Examoles of the development of sinkholes above flooding or flooded salt mines in central Germany and ways of remote detection of areas with potencial risk of fal. Fall 2000 Miting. San Antonio, Texas, USA, 2000. P. 163–175.
7. Баран І.М., Подопригора О.І., Грищук Г.В., Боднар Л.С., Кіт Л.Я., Клим І.Р., Гнатуш С.О., Гудзь С.П. Екологічний моніторинг водойм Яворівського сіркового родовища; мікробіологічний контроль. *Довкілля та здоров'я*. 2003. № 4 (27). С. 56–62.
8. Гайдин А.М. Формирование химического состава воды при затоплении серных карьеров. *Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2008. № 2. С. 118–123.

Savchuk L.V., Doskich S.V. TERRITORY REVITALIZATION OF THE SPENT YAZIVSKY AND NEMYRIVSKY SULFUR ORE DEPOSITS

Excessive consumption of natural resources led to the formation of a large number of disturbed lands unusable. As a result, in the middle of the last century, a new scientific and technical direction emerged – reclamation, which involves the return of disturbed territories to their initial or close to the initial state. The discovery of powerful deposits of sulfur ores in the Lviv region, in the 50s of the last century, gave a powerful impetus to the development of sulfur production and production of a number of chemical products based on it. Depletion of high-sulfur ores, economic inexpediency of using poor ores, increasing production of cheap sulfur, which was obtained as a by-product of purification of natural gas and oil from sulfur-containing compounds, led to the cessation of sulfur production and closure of chemical plants based on deposits. It was carried out the reclamation of the territory of sulfur ore deposits – Yazivsky and Nemyrivsky with the formation of the largest artificial reservoir of Lviv region Yavoriv Lake. The purpose of the work is monitoring of the reclaimed territory condition of Yazivsky and Nemyrivsky sulfur ore deposits for their full use. This will

ensure environmental safety, prevent emergencies and scientifically justify the decision of effective economic development of restored territories. Conducted studies have shown that in the initial period of flooding the water mineralization on the surface of the lake was quite high and amounted to 2360 mg/dm³, every year it decreased and already in the summer of 2012 on the surface of the lake the water was fresh (969 mg/dm³). Since 2012, water quality has deteriorated, since 2013; the desalination of the lake has stopped. In July 2015, there was an increase in water mineralization on the surface of the lake to 1150 mg/dm³, in May 2017 it increased to 1248 mg/dm³ and is still in the range of 1248...1280 mg/dm³. The water in the lake is calcium sulfate, with a high value of hardness and a very high content of sulfates, which can be explained by the dissolution of gypsum anhydrite and limestone. In the initial stages of flooding, a high content of hydrogen sulfide was observed, in recent samples up to a depth of 30 meters, this toxic impurity is absent. The transparency of the water in the lake is 8,0 m. After extraction of sulfur, the soils are contaminated with sulfur, the content of which decreases with depth, in the soil layer up to 20 cm 2–3%, at a depth of 20–40 cm 0,4–0,6%. The pH of soils has also changed, it is 3–4, and in some areas – 1.5–2. Spent territories are characterized by secondary salinization of soils, they have become biotoxic. At the same time, there is a large amount of lake vegetation in the coastal zone, and fish are already found. Yavoriv Lake has all the necessary conditions for the organization on its basis the regional recreation center.

Key words: *reclamation, revitalization, technogenic disturbed land, post mining, water resources.*

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/42>**Осадчук О.В.**

Вінницький національний технічний університет

Осадчук В.С.

Вінницький національний технічний університет

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ НА ОСНОВІ ТУНЕЛЬНО-РЕЗОНАНСНОГО ДІОДА

На основі повної еквівалентної схеми тунельно-резонансного діода, яка враховує його ємнісні та індуктивні властивості, складено диференційне рівняння другого порядку, що описує фізичні процеси в коливальній системі генератора. Розв'язок рівняння дав змогу отримати аналітичну залежність вихідної змінної напруги генератора від часу, а також умови виконання стабільних синусоїдальних коливань у системі. Визначено залежність резонансної частоти від параметрів схеми і режимів живлення, а також аналітичну залежність частоти, при якій у коливальній системі генератора повністю компенсуються втрати енергії завдяки від'ємному диференційному опором. Показано, що резонансна частота генератора змінюється на ділянці від'ємного диференційного опором від $12 \cdot 10^9$ Гц до $1,8 \cdot 10^9$ Гц, що пояснюється сумісним впливом зміни від'ємного диференційного опором, власних ємності та індуктивності тунельно-резонансного діода. Використання приладів із від'ємним диференційним опором дає змогу суттєвим чином спростити конструкторське виконання генераторів електричних коливань в усьому діапазоні радіотехнічних частот. При цьому на базі конкретного схемотехнічного рішення залежно від режимів роботи можна реалізувати як генератори гармонічних коливань, так і генератори імпульсних коливань спеціальної форми. Дослідження характеристик надвисокочастотних генераторів на основі тунельно-резонансних діодів базується на еквівалентній схемі, яка не враховує індуктивної складової частини діода, хоча ця складова частина є за будь-яких умов роботи, оскільки струм, який протікає крізь прилад, завжди запізнюється стосовно напруги, яка його викликала, що відповідає індуктивній реакції тунельно-резонансного діода. Генератор електричних коливань створено на основі тунельно-резонансного діода, вольт-амперна характеристика якого має спадну ділянку, що відповідає існуванню диференціального від'ємного опором на цій ділянці. Спадна ділянка виникає завдяки зменшенню струму, який проходить через двобар'єрну квантову гетероструктуру, зменшенню коефіцієнта прозорості потенційних бар'єрів, внаслідок збільшення енергії електронів при зростанні прикладеної напруги порівняно з енергетичним резонансним рівнем.

Ключові слова: генератор, тунельно-резонансний діод, частота, від'ємний диференційний опір, гетероструктура, наноелектронна структура.

Постановка проблеми. Розробка новітніх мікроелектронних технологій, таких як промєнево-епітаксіальна та газофазна епітаксіальна, які стали головними технологіями в наноелектроніці, дала змогу створити нові сучасні квантові наноструктури. На базі цих квантових гетероструктур було розбудовано унікальні наноелектронні прилади, які отримали назву «тунельно-резонансні діоди». В основі роботи цих приладів лежить

ефект тунелювання електронів через квантові гетероструктури під час їх руху перпендикулярно до площини потенціальних бар'єрів, які поділяють квантові гетероструктури.

Використання приладів із від'ємним диференційним опором дає змогу суттєвим чином спростити конструкторське виконання генераторів електричних коливань в усьому діапазоні радіотехнічних частот. При цьому на базі конкретного схемотехнічного

рішення залежно від режимів роботи можна реалізувати як генератори гармонічних коливань, так і генератори імпульсних коливань спеціальної форми. Проте дослідження характеристик надвисокочастотних генераторів на основі тунельно-резонансних діодів базується на еквівалентній схемі, яка не враховує індуктивної складової частини діода, хоча ця складова частина є за будь-яких умов роботи, оскільки струм, який протікає скрізь прилад, завжди запізнюється порівняно з напругою, яка його викликала, що відповідає індуктивній реакції тунельно-резонансного діода. Тому ця робота присвячена дослідженню генератора електричних коливань, в еквівалентній схемі якого враховано вплив індуктивної складової частини діода.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні основи роботи тунельно-резонансних діодів заклали Л. Есакі і Р. Тцу [1; 2; 3]. Дійсно, вони першими дослідили від'ємний диференційний опір у наноструктурах AlGaAs/GaAs, внаслідок резонансного тунелювання електронів крізь потенційні бар'єри. Унікальними властивостями тунельно-резонансних діодів є їх надвисокочастотні властивості разом із від'ємним диференційним опором, що дало змогу будувати на їх основі логічні пристрої, прилади пам'яті, перемикачі, резонансні підсилювачі, генератори, сенсори та багато інших приладів [4, с. 454–465; 5–8; 9, с. 196–235]. Особливу увагу було приділено розробці і дослідженню генераторів електричних коливань, які можуть працювати в області терагерцових частот, втрати енергії в коливальних системах яких компенсуються від'ємним диференційним опором [10–13; 14, с. 302–307; 15, с. 259–266].

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження математичної моделі генератора на основі тунельно-резонансного діода, яка враховує його ємнісні та індуктивні властивості. Для досягнення поставленої мети в роботі треба вирішити такі задачі: 1) провести аналіз та розв'язання диференційного рівняння другого порядку, що описує фізичні процеси в коливальній системі генератора на основі тунельно-резонансного діода; 2) визначити умови виконання стабільних синусоїдальних коливань у системі; 3) визначити залежність резонансної частоти від параметрів схеми і режимів живлення, а також отримати аналітичну залежність частоти, при якій у коливальній системі генератора повністю компенсуються втрати енергії завдяки від'ємному диференційному опором; 4) зробити висновки з проведеного дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Генератор електричних коливань створено на основі

тунельно-резонансного діода, вольт-амперна характеристика якого має спадну ділянку, що відповідає існуванню диференціального від'ємного опору на цій ділянці. Спадна ділянка виникає завдяки зменшенню струму, який проходить через двобар'єрну квантову гетероструктуру, зменшенню коефіцієнта прозорості потенціальних бар'єрів, внаслідок збільшення енергії електронів при зростанні прикладеної напруги порівняно з енергетичним резонансним рівнем. Від'ємний диференційний опір перетворює енергію постійного електричного поля джерела напруги, що живить тунельно-резонансний діод, на енергію змінного електричного поля. Схема генератора подана на рис. 1. Електрична схема генератора (рис. 1) живиться від джерела постійної напруги $U_{ж}$, опору втрат R_s , який включає всі омичні опори схеми, зовнішньої індуктивності L , яка послідовно підключена до внутрішньої індуктивності діода, а також містить індуктивності виводів схеми, зовнішньої ємності C , яка паралельно підключена до внутрішньої ємності діода, а також сам тунельно-резонансний діод.

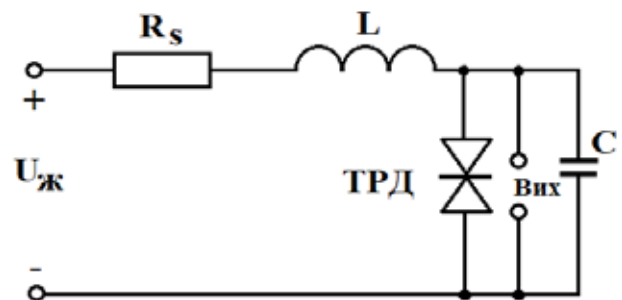


Рис. 1. Схема генератора електричних коливань на основі тунельно-резонансного діода

Еквівалентну схему генератора для розрахунків його характеристик подано на рис. 2.

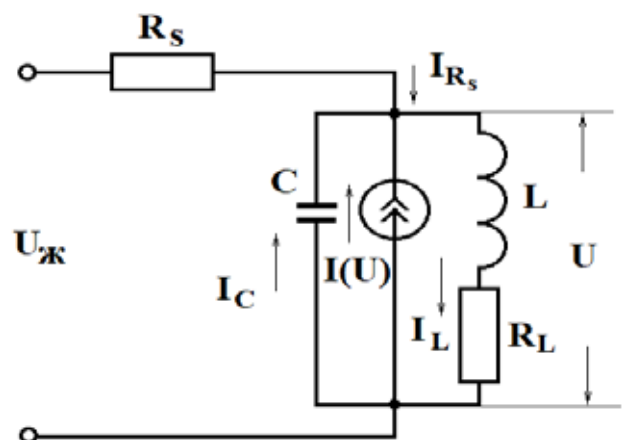


Рис. 2. Еквівалентна схема генератора електричних коливань із внутрішнім джерелом струму $I(U)$

Джерело струму $I(U)$ в робочій точці на спадній ділянці вольт-амперної характеристики визначає відношення $U/I(U)$, що відповідає від'ємному диференційному опору $-R_g$, тому надалі в еквівалентній схемі (рис. 3) $U/I(U)$ замінюється на $-R_g$. Згідно з рис. 2 складемо рівняння Кірхгофа, яке необхідне для аналізу схеми генератора електричних коливань

$$U_{жс} = U_{R_s} + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L, \quad (1)$$

$$I_{R_s} = -I_C - I(U) + I_L = -C \frac{dU}{dt} - I(U) + I_L, \quad (2)$$

З рівнянь (1) і (2) знайдемо складники, які визначають розвиток процесів у схемі

$$\frac{dU}{dt} = \frac{-I_{R_s} - I(U) + I_L}{C}, \quad (3)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{U - R_L I_L}{L}, \quad (4)$$

У стані рівноваги ($U = U_0$ і $I_L = I_{L0}$) струми і напруги залишаються незмінними

$$\left. \frac{dU}{dt} \right|_{U=U_0} = 0, \quad \left. \frac{dI_L}{dt} \right|_{I_L=I_{L0}} = 0, \quad (5)$$

З рівнянь (3), (4) і (5) знаходимо струми і напруги в стані рівноваги

$$U_{жс} - U_0 = R_s (I(U_0) - I_{L0}), \quad (6)$$

$$I_{L0} = U_0 / R_L, \quad (7)$$

Стан рівноваги схеми генератора електричних коливань реалізується в точці перетину спадної ділянки статичної вольт-амперної характеристики діода і лінії статичного навантаження.

Визначення стійкості стану рівноваги визначається аналітичним методом А.М. Ляпунова [16, с. 145–150]. За цим методом правильну відповідь про питання стійкості станів рівноваги нелінійної системи (1) і (2) дає дослідження рівнянь її першого (лінійного) наближення. Для отримання цих рівнянь введемо нові змінні для системи (1) і (2)

$$u = U - U_0, \quad (8)$$

$$x_{1,2} = \frac{-\left[\frac{R_L}{L} + \left(\frac{1}{R_s C} - \frac{1}{R_g C} \right) \right] \pm \sqrt{\left[\frac{R_L}{L} + \left(\frac{1}{R_s C} - \frac{1}{R_g C} \right) \right]^2 - \frac{4}{LC} \left(\frac{R_L}{R_g} - \frac{R_L}{R_s} - 1 \right)}}{2}, \quad (16)$$

$$i = I_L - I_{L0}, \quad (9)$$

які описують невеликі відхилення режиму схеми генератора від параметрів рівноваги U_0, I_{L0} . Нелінійну статичну характеристику тунельно-резонансного діода поблизу стану рівноваги замінимо лінійною функцією $I(U_0 + u) = I(U_0) + \frac{u}{R_g}$, що включає диференціальний від'ємний опір R_g у точці рівноваги, а нелінійні ємність $C(U)$ і індуктивність $L(U)$ в точці рівноваги будемо вважати постійними. Тоді рівняння (3) і (4) приймуть вигляд

$$\frac{du}{dt} = \frac{u}{R_s C} - \frac{u}{R_g C} + \frac{i}{C}, \quad (10)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{u - R_L i}{L}, \quad (11)$$

Виконавши диференціювання рівняння (10) і підставивши в нього рівняння (11), отримуємо

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = \left(\frac{1}{C R_s} - \frac{1}{R_g C} \right) \frac{du}{dt} + \left(\frac{u - R_L i}{LC} \right), \quad (12)$$

У рівняння (12) підставимо замість струму i його вираз

$$i = C \frac{du}{dt} - \frac{u}{R_s} + \frac{u}{R_g}, \quad (13)$$

тоді кінцевий вираз для рівняння (12) приймає вигляд

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \left[\frac{R_L}{L} + \left(\frac{1}{R_s C} - \frac{1}{R_g C} \right) \right] \frac{du}{dt} + \left(\frac{R_L}{R_g} - \frac{R_L}{R_s} - 1 \right) \frac{u}{LC} = 0, \quad (14)$$

Згідно з рівнянням (14) складемо характеристики рівняння системи

$$x^2 + x \left[\frac{R_L}{L} + \left(\frac{1}{R_s C} - \frac{1}{R_g C} \right) \right] + \left(\frac{R_L}{R_g} - \frac{R_L}{R_s} - 1 \right) \frac{1}{LC} = 0, \quad (15)$$

Стійкість стану рівноваги, за Ляпуновим, визначається властивостями коренів рівняння (15). Якщо дійсні складники коренів позитивні, то стан рівноваги є стійким, а для виникнення коливань у системі необхідно, щоб корені мали комплексне значення. Виходячи з цих вимог, можна записати умови, за яких у системі генератора виникають синусоїдальні коливання. Розв'язок рівняння (15) має вигляд

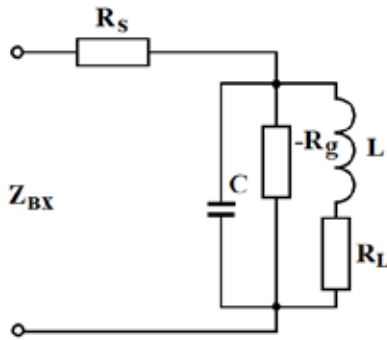


Рис. 3. Еквівалентна схема генератора

З виразу (16) витікають умови стійкої роботи

$$\left| \frac{R_L}{L} + \left(\frac{1}{R_s C} - \frac{1}{R_g C} \right) \right| < 0, \quad (17)$$

$$\left| \frac{1}{LC} \left(\frac{R_L}{R_g} - \frac{R_L}{R_s} - 1 \right) \right| > 0, \quad (18)$$

Розв'язок рівняння (14) дає залежність вихідної напруги генератора від часу і описується виразом

$$u(t) = A \exp(x_1 t) + B \exp(x_2 t), \quad (19)$$

де x_1 і x_2 корені рівняння (15), які визначаються виразом (16), A і B – постійні інтегрування, що знаходяться з початкових умов.

На основі еквівалентної схеми (рис. 3) розрахуємо повний вхідний опір Z_{ex} , на основі якого визначимо резонансну частоту і частоту, на якій повністю компенсуються втрати енергії в коливальній системі генератора. Вираз повного опору має вигляд

$$Z_{ex} = R_s + \frac{\left[\frac{R_g}{1 + (\omega CR_g)^2} \right]^2 R_L + \left[\frac{R_g}{1 + (\omega CR_g)^2} \right] (\omega L)^2 + \left[\frac{\omega CR_g^2}{1 + (\omega CR_g)^2} \right]^2 R_L + \left[\frac{R_g}{1 + (\omega CR_g)^2} \right] R_L^2}{\left[\frac{R_g}{1 + (\omega CR_g)^2} + R_L \right]^2 + \left[\omega L - \frac{\omega CR_g^2}{1 + (\omega CR_g)^2} \right]^2} + j \frac{\left[\frac{R_g}{1 + (\omega CR_g)^2} \right]^2 (\omega L) - \left[\frac{\omega CR_g^2}{1 + (\omega CR_g)^2} \right] R_L - \left[\frac{\omega CR_g^2}{1 + (\omega CR_g)^2} \right] (\omega L)^2 + \left[\frac{\omega CR_g^2}{1 + (\omega CR_g)^2} \right]^2 (\omega L)}{\left[\frac{R_g}{1 + (\omega CR_g)^2} + R_L \right]^2 + \left[\omega L - \frac{\omega CR_g^2}{1 + (\omega CR_g)^2} \right]^2} \quad (20)$$

Порівнявши нулю уявну складову частину рівняння (20), визначимо резонансну частоту $f_{рез}$ з рівняння, яке описується формулою

$$\omega^4 (R_g^4 C^3 L^2) + \omega^2 (C^3 R_g^4 R_L^2 + CR_g^2 L^2 - R_g^4 C^2 L) + (CR_g^2 R_L^2 - R_g^2 L) = 0, \quad (21)$$

Розв'язок рівняння (21) є вираз

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ad}}{2a} \right]^{1/2}, \quad (22)$$

де $a = R_g^4 C^3 L^2$; $b = C^3 R_g^4 R_L^2 + CR_g^2 L^2 - R_g^4 C^2 L$; $d = CR_g^2 R_L^2 - R_g^2 L$.

Рівняння для визначення частоти $f_{R=0}$, за якої втрати енергії в коливальній системі генератора дорівнюють нулю, отримаємо, прирівнявши нулю дійсну складову частину виразу (20). Таким чином, рівняння має вигляд

$$\omega^4 (R_s R_L^2 C^4 R_g^4 + L^2 C^2 R_g^2 R_s - LC^3 R_g^4 R_s + R_g^3 L^2 C^2) + \omega^2 (2R_L^2 C^2 R_g^2 R_s + 2R_s R_g^3 R_L C^2 + R_s C^2 R_g^4 - 2R_s L C R_g^2 + R_s L^2 + R_g L^2 + C^2 R_g^4 R_L + R_g^3 R_L^2 C^2) + (R_g^2 R_s + 2R_s R_g R_L + R_g^2 R_L + R_g R_L^2) = 0. \quad (23)$$

Розв'язок рівняння (23) дає значення для $f_{R=0}$

$$f_{R=0} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{-n \pm \sqrt{n^2 - 4ml}}{2m} \right]^{1/2}, \quad (24)$$

де $m = R_s R_L^2 C^4 R_g^4 + L^2 C^2 R_g^2 R_s - LC^3 R_g^4 R_s + R_g^3 L^2 C^2$; $l = R_g^2 R_s + 2R_s R_g R_L + R_g^2 R_L + R_g R_L^2$.

$n = 2R_L^2 C^2 R_g^2 R_s + 2R_s R_g^3 R_L C^2 + R_s C^2 R_g^4 - 2R_s L C R_g^2 + R_s L^2 + R_g L^2 + C^2 R_g^4 R_L + R_g^3 R_L^2 C^2$;

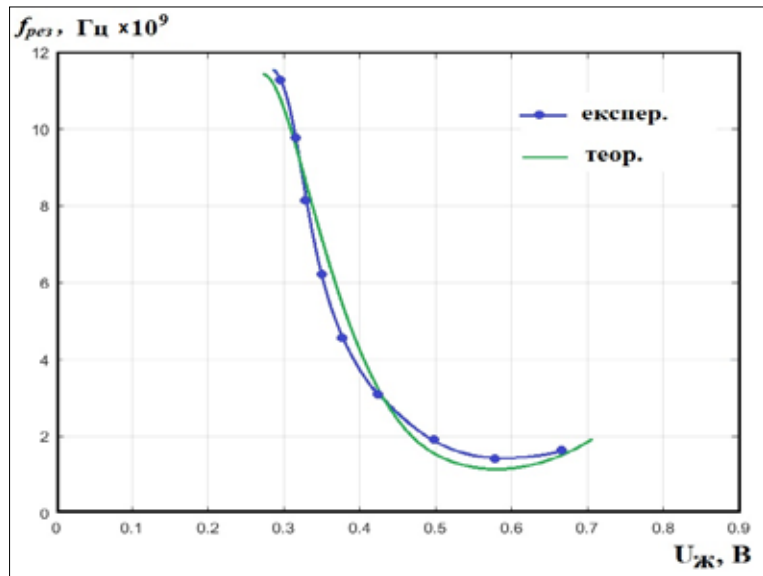


Рис. 4. Теоретична та експериментальна залежності резонансної частоти від зміни напруги живлення генератора

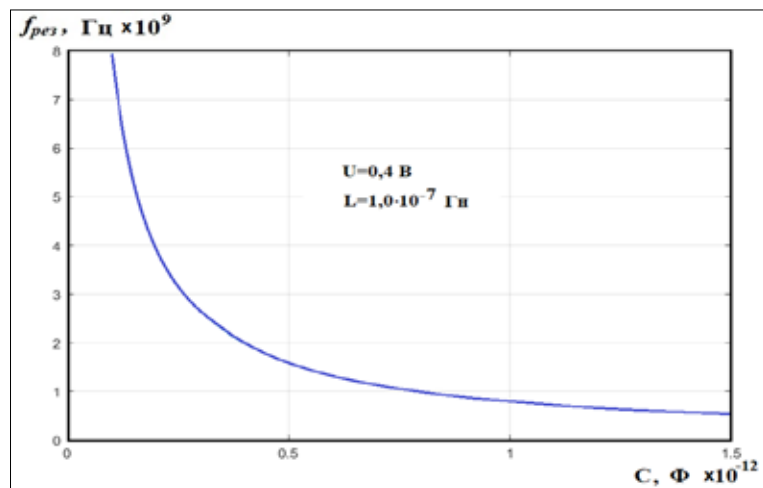


Рис. 5. Теоретична залежність зміни резонансної частоти генератора від зміни зовнішньої ємності

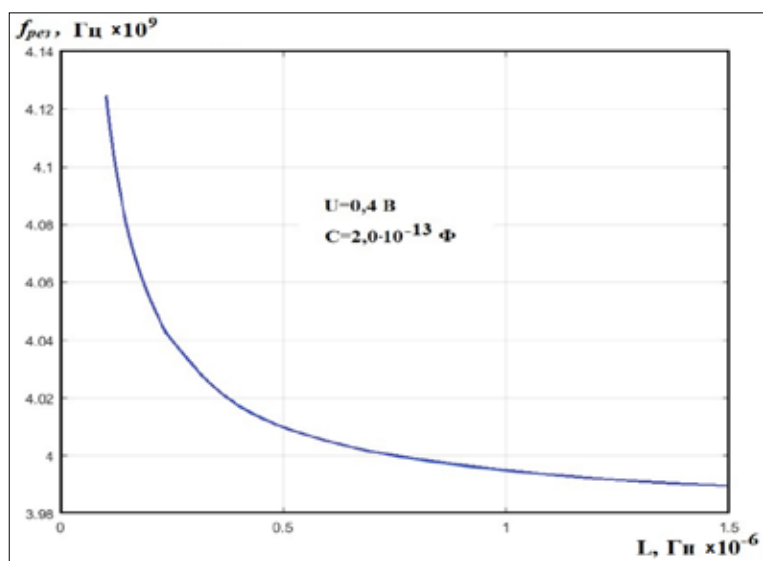


Рис. 6. Теоретична залежність резонансної частоти генератора від зміни зовнішньої індуктивності

На рис. 4 подано теоретичну та експериментальну залежності резонансної частоти від зміни напруги живлення генератора на спадній ділянці вольт-амперної характеристики. Як видно з графіка, резонансна частота зменшується майже за лінійним законом, що пояснюється зміною величини від'ємного диференційного опору на спадній ділянці вольт-амперної характеристики тунельно-резонансного діода, а також зміною власних ємності та індуктивності діода. Розкид теоретичної і експериментальної кривих становить $\pm 2,5\%$.

На рис. 5 представлено залежність резонансної частоти від зміни зовнішньої ємності генератора. Як видно з рис. 5, резонансна частота різко зменшується зі збільшенням зовнішньої ємності до $0,5 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$, а подальше зростання зовнішньої ємності в значно меншій степені впливає на резонансну частоту генератора. Це пояснюється тим, що при малих значеннях зовнішньої ємності коливальної системи генератора на резонансну частоту значно впливає власна ємність тунельно-резонансного діода.

На рис. 6 наведено залежність резонансної частоти від зміни зовнішньої індуктивності

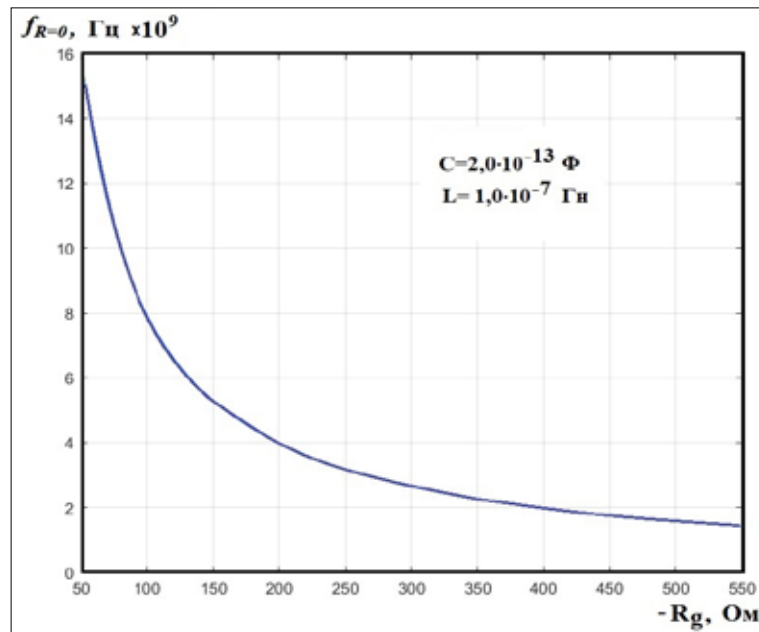


Рис. 7. Теоретична залежність частоти $f_{R=0}$ від зміни величини від'ємного диференційного опору

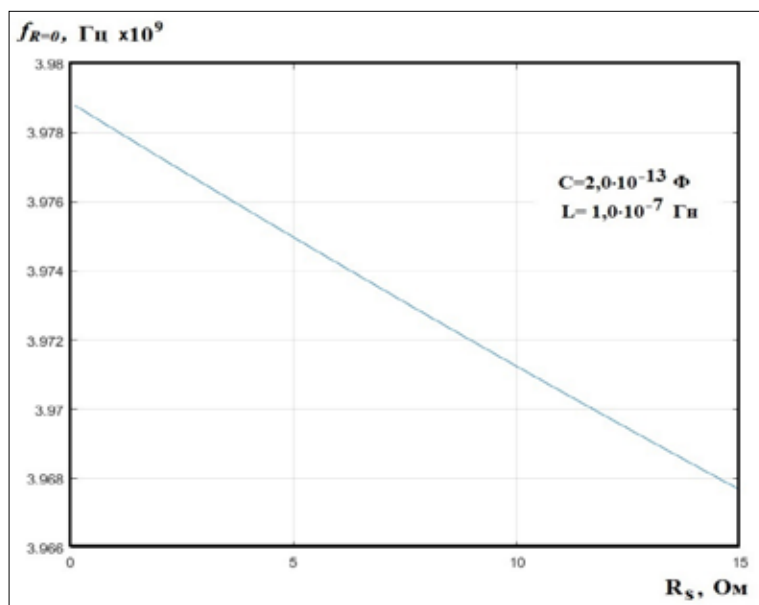


Рис. 8. Теоретична залежність частоти $f_{R=0}$ від зміни зовнішнього активного опору

коливальної системи генератора. Поведінка зміни резонансної частоти зі зростанням зовнішньої індуктивності така сама, як і для ємності, і пояснюється тими самими причинами.

На рис. 7 подано залежність частоти $f_{R=0}$, при якій повністю компенсуються втрати енергії в коливальній системі генератора, від зміни від'ємного диференційного опору. Як видно з рис. 7, частота $f_{R=0}$ зменшується в широкому діапазоні від $16 \cdot 10^9$ Гц до $1,8 \cdot 10^9$ Гц при зміні диференційного опору на спадній ділянці вольт-амперної характеристики діода. Цей спад частоти $f_{R=0}$ пояснюється як зміною самого від'ємного диференційного опору, так і зміною власних індуктивності та ємності тунельно-резонансного діода.

На рис. 8 наведено залежність частоти $f_{R=0}$ від зміни зовнішнього активного опору R_s . Як видно з графіка, частота $f_{R=0}$ лінійно зменшується при зростанні активного опору R_s . Це пояснюється тим, що він додається до активної складової частини повного вхідного опору схеми і лінійно змен-

шує величину від'ємного диференційного опору, який разом із внутрішніми власними ємністю та індуктивністю зменшують частоту $f_{R=0}$.

Висновки. На основі повної еквівалентної схеми тунельно-резонансного діода, яка враховує його ємнісні та індуктивні властивості, складено диференціальне рівняння другого порядку, що описує фізичні процеси в коливальній системі генератора. Розв'язок рівняння дав змогу отримати аналітичну залежність вихідної змінної напруги генератора від часу, а також умови виконання стабільних синусоїдальних коливань у системі.

Визначено аналітичні залежності резонансної частоти генератора та частоти, за якої втрати енергії в коливальній системі генератора повністю компенсуються енергією від'ємного диференційного опору. Показано, що резонансна частота генератора змінюється на ділянці від'ємного диференційного опору від $12 \cdot 10^9$ Гц до $1,8 \cdot 10^9$ Гц, що пояснюється сумісним впливом зміни від'ємного диференційного опору, власних ємності та індуктивності тунельно-резонансного діода.

Список літератури:

1. Esaki L. and Tsu R. Superlattices and negative differential conductivity in semiconductors. *IBM J. Res. Develop.*, 1970. Vol. 14. Jan. P. 61–65.
2. Tsu R. and Esaki L. Tunneling in a finite superlattice. *Appl. Phys. Lett.* 1973. June, vol. 22. P. 562–564.
3. Chand L.L., Esaki L. and Tsu R. Resonant tunneling in semiconductor double barriers. *Appl. Phys. Lett.* 1974. Vol. 24. June. P. 593–595.
4. Sze S.M. and Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices* Wiley-Interscience. USA. ISBN-13: 978-0-471-14323-9. 815 p. 2007.
5. Awan, Jram Taj. Optical and Transport of p-i-n GaAs-AlAs resonant tunneling diode. Jram Taj Awan – Sao Carlos: UFS Car, 2014, P.85.
6. Halimatus Saadiah, Warsuzarina Mat Jubadi, Nabihah Ahmad and M. Hairol Jabbar. Resonant Tunneling Diode Design for Oscillator Circuit. *International Postgraduate Conference. Physics.* 2017. P. 1–8.
7. Jan-Frederik Mennemann, Ansgar Jüngel, Hans Kosina. Transient Schrodinger-Poisson Simulations of a High-Frequency Resonant Tunneling Diode Oscillator. *Journal of Computational Physics.* Volume 239, 15 April 2013. P. 187–205.
8. Man Mohan Singh, M.J. Siddiqui, Anupriya Saxena. Comparative Simulation of GaAs and GaN based-Double Barriers-Resonant tunneling Diode. *Proceedings of the International Conference on Computational Modeling and Security (CMS 2016).* P. 581–587. doi: 10.1016/j.procs.2016.05.224
9. Осадчук В.С., Осадчук А.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винница : «Универсум-Винница», 1999. 275 с.
10. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. Мікроелектронний перетворювач тиску з частотним виходом на основі тунельно-резонансного діода. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2015. № 1 (221). С. 97–101.
11. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities. *Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).* 21–23 May 2015. Omsk. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147167
12. Osadchuk I.A., Osadchuk A.V., Osadchuk V.S. and Semenov A.O. Nanoelectronic Pressure Transducer with a Frequency Output Based on a Resonance Tunnel Diode. 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine. 2020. P. 452–457. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235474.
13. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. The Microelectronic Radiomeasuring Transducers of Magnetic Field with a Frequency Output. *Elektronika ir Elektrotechnika.* Kaunas : Techolodija. 2011. № 4 (110). P. 67–70. URL: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.110.4.289>

14. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р.Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда. Москва : Техносфера, 2009. 368 с.

15. Нанoeлектроника: теория и практика : учебник / В.Е. Борисенко, А.И. Воробьева, А.Л. Данилюк, Е.А. Уткина. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 366 с.

16. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей : Учебное пособие для вузов. Москва : Радио и связь, 1982. 280 с.

Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk Ya.A. INVESTIGATION OF THE GENERATOR ELECTRICAL FLUCTUATIONS ON THE BASIS OF A RESONANT TUNNELING DIODE

Based on the full equivalent circuit of the tunnel resonance diode, which takes into account its capacitive and inductive properties, a second-order differential equation is described that describes the physical processes in the oscillatory system of the generator. The solution of the equation made it possible to obtain the analytical dependence of the output alternating voltage of the generator on time, as well as the conditions for stable sinusoidal oscillations in the system. The dependence of the resonant frequency on the parameters of the circuit and power modes, as well as the analytical dependence of the frequency at which energy losses due to negative differential resistance in the oscillator system are completely compensated, are determined. It is shown that the resonant frequency of the generator varies in the region of negative differential resistance from $12 \cdot 10^9$ Hz to $1.8 \cdot 10^9$ Hz, which is explained by the combined influence of changes in negative differential resistance, intrinsic capacitance, and inductance of the tunnel resonance diode. The use of devices with negative differential resistance can significantly simplify the design of generators of electrical oscillations in the entire range of radio frequencies. Moreover, on the basis of a specific circuitry solution, depending on the operating modes, it is possible to implement both harmonic oscillation generators and special-shape pulse oscillators. The study of the characteristics of microwave generators based on tunnel resonance diodes is based on an equivalent circuit, it does not completely take into account the inductive component of the diode, although this component exists under any operating conditions, since the current that flows through the device is always delayed in relation to the voltage that caused it, which corresponds to the inductive reaction of the tunnel resonance diode. The electric oscillation generator is based on a tunnel resonance diode, the current-voltage characteristic of which has a complex section corresponding to the existence of differential negative resistance in this section. The descending section occurs due to a decrease in the current passing through the double-barrier quantum heterostructure, due to a decrease in the transparency coefficient of potential barriers, due to an increase in the electron energy with an increase in the applied voltage compared to the energy resonance level.

Key words: generator, tunnel resonance diode, frequency, negative differential resistance, heterostructure, nanoelectronic structure.

Відомості про авторів

Артемук С.І. – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Афанасьєва Т.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біоінженерії і води Одеської національної академії харчових технологій

Бабіч В.Ф. – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханіки, мехатроніки та інженерної графіки Одеської національної академії харчових технологій

Бабошко Д.Ю. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва Криворізького національного університету

Беглов К.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету

Безвесільна О.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри приладобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Безусов А.Т. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри біоінженерії і води Одеської національної академії харчових технологій

Беляновська О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри енергетики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Биковець Н.П. – кандидат технічних наук, завідувач кафедри загальнонаукових дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

Болотіна В.В. – асистент кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка»

Бражник І.Д. – аспірант Національного університету «Одеська морська академія»

Бридінський В.А. – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Бродський Ю.Б. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних технологій та моделювання систем Житомирського національного агроекологічного університету

Бутовський Л.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вакалюк Т.А. – доктор педагогічних наук, доцент, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Василишин В.Я. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Василишин Я.В. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри архітектури та містобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Васильчук Д.П. – старший викладач кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії

Ваховський В.М. – студент групи 2КН-19м кафедри комп'ютерних наук Вінницького національного технічного університету

Воденнікова Л.В. – асистент кафедри природничих дисциплін для іноземних студентів та токсикологічної хімії Запорізького національного університету

Воденнікова О.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургії Запорізького національного університету

Восвода Н.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інженерії харчового виробництва ДВНЗ «Херсонський державний аграрний університет»

Генвальдт А.С. – студентка Державного університету «Житомирська політехніка»

Гіць І.І. – асистентка кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Львівська політехніка»

Глухова Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та приладобудування Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Гомеля М.Д. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Грановська О.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Губинський М.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту Національної металургійної академії України

Гуйда О.Г. – доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Гулей О.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики та енергозберігаючих технологій Української інженерно-педагогічної академії

Доскіч С.В. – кандидат технічних наук, асистент кафедри вищої геодезії та астрономії Національного університету «Львівська політехніка»

Доценко Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біоінженерії і води Одеської національної академії харчових технологій

Дрозд О.В. – кандидат технічних наук, доцент, заступник директора Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Дубко В.О. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри автоматичного управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Жарський Є.В. – студент Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Жук М.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Львівська політехніка»

Залобовський М.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

Іваненко О.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кірсанова В.В. – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри загальнонаукових дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

Казимиренко Ю.О. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Канівець О.М. – старший викладач кафедри геодезії та землеустрою Сумського національного аграрного університету

Кийко Н.М. – викладач Відокремленого структурного підрозділу «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Клябіна Т.М. – магістр кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету

Кобилянський Б.Б. – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії

Козак М.М. – студентка кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Львівська політехніка»

Кондратюк І.В. – директор, інженер-землевпорядник ТОВ «Геодезично-вишукувальний центр», м. Харків

Корецька І.Л. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

Кужелович В.І. – старший викладач кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України

Кухтик Н.О. – аспірантка кафедри «Двигуни та теплотехніка», старший викладач кафедри «Екологія та безпека життєдіяльності» Національного транспортного університету

Кушнірук О.М. – викладач Відокремленого структурного підрозділу «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Левкін Д.А. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри вищої математики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

Легутенко А.С. – здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня ДВНЗ «Херсонський державний аграрний університет»

Лисенко О.І. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко О.О. – студент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лю Чан – кандидат економічних наук, доцент Інституту електроніки та інформаційної інженерії Університету океану Гуандун, Китай

Люльчик В.О. – кандидат сільськогосподарських наук, викладач Відокремленого структурного підрозділу «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Малишев В.В. – доктор технічних наук, професор, директор Інженерно-технологічного інституту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

Мамонов К.А. – доктор економічних наук, професор, професор кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Марценяк О.П. – старший викладач кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України

Мещеряков Д.В. – менеджер підтримки користувачів АТ PETROSOFT

Микитин І.П. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Михалевський Д.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного технічного університету

Мороз О.С. – аспірант кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Назарова І.О. – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Новіков В.І. – старший викладач 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»

Орлова О.М. – викладач Уманського державного педагогічного університету імені Павла Тичини

Осадчук В.С. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

Осадчук О.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

Осадчук Я.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

Палвашова Г.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біоінженерії і води Одеської національної академії харчових технологій

Панасюк І.В. – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту інженерії та інформаційних технологій Київського національного університету технологій та дизайну

Панов Є.М. – доктор технічних наук, професор, декан Інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Півторак Г.В. – асистентка кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Львівська політехніка»

Поліщук М.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Польовик В.В. – кафедра технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

Поперешняк С.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри програмних систем і технологій факультету інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Прядко В.А. – асистент кафедри електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології Житомирського національного агроекологічного університету

Пустовой Г.М. – аспірант кафедри енергетики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Романуша В.О. – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії

Рудько О.М. – викладач Відокремленого структурного підрозділу «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Румянцев В.Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургії Запорізького національного університету

Русіна Н.Г. – кандидат педагогічних наук, викладач Відокремленого структурного підрозділу «Рівненський коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

Савчук Л.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кадастру територій Національного університету «Львівська політехніка»

Савчук Т.О. – кандидат технічних наук, професор Вінницького національного технічного університету

Саонов А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Семенець Д.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії

Скляренко О.І. – студент ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Старченко О.С. – аспірант кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Суша І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Сухий К.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Сухий М.П. – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри енергетики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Табуненко В.О. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри електротехнічних систем комплексів озброєння та військової техніки Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Тарасов В.К. – кандидат технічних наук, член-кореспондент Академії технічних наук України, доцент Запорізького національного університету

Тачиніна О.М. – доктор технічних наук, доцент Національного авіаційного університету

Ткач М.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ушкаренко О.О. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Фролова Л.А. – доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Хома Ю.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Черепанська І.Ю. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних технологій та моделювання систем Житомирського національного агроекологічного університету

Черноусенко О.Ю. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Чижевська Л.А. – магістрант кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

Чижмотря О.В. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Чижмотря О.Г. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Чумаченко М.Н. – старший викладач кафедри загальнонаукових дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

Шишкін О.О. – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельних виробів, матеріалів та конструкцій Криворізького національного університету

Шишкіна О.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології будівельних виробів, матеріалів та конструкцій Криворізького національного університету

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 31 (70) № 4 2020

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Ю. Семенченко*

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. 25,49. Ум.-друк. арк. 35,11. Зам. № 0920/250

Підписано до друку 28.08.2020. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

03150, м. Київ, вул. Велика Васильківська 74, оф. 7

Телефон +38 (048) 709 38 69,

+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.