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 33 (72) № 6 2022

Видавничий дім
«Гельветика»
2022

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 геоінженерії 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 загально-інженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;
Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

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

Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 6 від 29.12.2022 року)

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво 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), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

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

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

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

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2022

ЗМІСТ

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Бернацький А.В., Сіора О.В., Соколовський М.В., Лукашенко В.А., Данилейко О.О., Набок Т.М., Бондарєва В.І., Шамсутдінова Н.О.
ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СКАНАТОРУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ 1

Казимиренко Ю.О., Лебедєва Н.Ю., Макруха Т.О.
ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОКРИТТЯ З 65Г, НАПОВНЕНОГО АЛЮМОСИЛІКАТНИМИ МІКРОСФЕРАМИ, У СУДНОРЕМОНТНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ 8

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Кравченко В.В., Петриченко Є.А., Кутковецька Т.О.
ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ГАЗОДИЗЕЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАСОБІВ У СУЧАСНОМУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ ВИРОБНИЦТВІ 13

Лузан С.О., Ситников П.А.
САМОПОШИРЮВАНИЙ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ СИНТЕЗ: СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ 17

Павленко В.Я.
ЗАХИСНЕ ПОКРИТТЯ ЯК ЗАСІБ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ КЛИНКІВ ХОЛОДНОЇ ЗБРОЇ. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ 24

Павленко В.Я.
ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО ТА ОРГАНІЗАЦІЙНОГО РІВНЯ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ ТА ТЕХНІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ ПРИ АКРЕДИТАЦІЇ ВИПРОБУВАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРІЙ 30

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Воловик А.Ю.
АДАПТИВНЕ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ЗА НАЯВНОСТІ НЕСПРАВНОСТЕЙ У КАНАЛІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ 35

Омецинська Н.В., Гуйда О. Г., Вишемірська Я.С., Мінаєва Ю.Ю.
АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙНИХ ТРАКТІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ТЕХНОЛОГІЙ TDM, WDM, UDWDM ТА СОЛІТОННИХ СИСТЕМ 43

Розорінов Г.М., Сірченко І.А.
ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В МЕРЕЖАХ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АУДІОВІЗУАЛЬНОГО КОНТЕНТУ 48

Трапезон К.О., Войналович О.О.
ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ PHOTO WAKE-UP ДЛЯ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗОРУ 52

Цяпа С.М.
МОДЕЛЬ ТРАСИ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ НАЗЕМНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ 59

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Амбросьонок А.А., Сазонов А.Ю., Черепанська І.Ю., Лукінюк М.В.
СИСТЕМА ДЕТЕКТУВАННЯ ПОСТРАЖДАЛИХ В РЕЗУЛЬТАТІ ВИКИДІВ ХІМІЧНО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН 65

Вакалюк Т.А., Болотіна В.В.
НЕОБХІДНІСТЬ РОЗРОБКИ ОНЛАЙН-РЕСУРСУ ДЛЯ НАУКОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ СПІВРОБІТНИКІВ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....71

Haitan O.M., Kolesnyk D.D.
3D COMPUTER GRAPHICS IN THE DEVELOPMENT OF KNOWLEDGE CONTROL SYSTEM IN THE DGBL APPROACH.....77

Дадиверін В.В., Фещенко І.О., Потапова К.Р., Тарасенко-Клятченко О.В., Івасенко Д.В
СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧЧЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЄДНАННЯ МЕТОДІВ HAAR TA SVM 86

Ковалевський В.В., Вакалюк Т.А.
СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ РОЗРОБКИ ТА ФУНКЦІОНУВАННІ СИСТЕМ ЗАХИСТУ СЕРВІСІВ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ.....92

Лагута В.В., Єгоров О.Й., Доманська Г.А., Тимошенко Л.С.
КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ.....99

Макарова Л.М., Латанська Л.О., Давлатова Д.Х., Кольцов А.В.
ДВОФАКТОРНА НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРУ ВЕБ-ЗАСТОСУНКІВ, ЩО СТВОРЮЮТЬСЯ МОВОЮ PYTHON З ВИКОРИСТАННЯМ DJANGO REST FRAMEWORK.....104

Марчук Д.К., Левківський В.Л., Марчук Г.В., Голенко М.Ю.
СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ДАКТИЛЬНОЇ МОВИ УКРАЇНСЬКОЇ АБЕТКИ.....109

Пахомова В.М., Мотиленко В.А.
ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ RBF ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ SMURF АТАК НА ОСНОВІ БАЗИ ДАНИХ KDDCUP 115

Рибальченко М.О., Маначин І.О., Потап О.Ю., Шибакінський В.І.
РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НА БАЗІ SCADA-СИСТЕМИ ТА ПРИКЛАДНОГО ПАКЕТУ ВІЗУАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....122

ЕНЕРГЕТИКА

Абдулін М.З., Шелешей Т.В., Беднарська І.С., Будя Ю.С., Юрчук В.С.
ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КОТЛОАГРЕГАТІВ КВГМ 100 ШЛЯХОМ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ.....130

Бєляновська О.А., Сухий К.М., Пустовой Г.М., Єрьомін О.О., Сухий М.К., Фролова Л.А.
КРИТЕРІЇ ПІДБОРУ РОБОЧИХ ПАР ДЛЯ АДСОРБЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ.....136

Кочмарський В.З., Костюк О.В., Тимейчук О.Ю., Куба В.В.
АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ШВИДКОСТІ ВИДІЛЕННЯ $CaCO_3$ В КВАЗІСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ ОБОРОТНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ.....141

Середа В.В., Соломаха А.С., Притула Н.О., Швець Н.О.
ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ ТЕРМІЧНОГО ЗНЕСОЛЕННЯ ВОДИ З ВІДКРИТИМ І ЗАКРИТИМ ПОВІТРЯНИМ ЦИКЛОМ.....146

Чередніков В.М., Чередніков О.В.
ВИПРОБУВАННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ ГЕЛІКОПТЕРА НА ЛАБОРАТОРНОМУ СТЕНДІ.....153

МЕТАЛУРГІЯ

Тесленко О.І., Куц Г.О.
СТРУКТУРНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРЯМИ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПІДПРИЄМСТВАМИ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ.....165

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Батюк Л.В., Кізілова Н.М.
РОЗРОБКА, ПРИГОТУВАННЯ І КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ МІКРО/НАНОСУСПЕНЗІЙ:
ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ І ПЕРСПЕКТИВИ.....174

Гриценко О.М., Баран Н.М., Волошкевич П.П., Строган О.І.
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРИРОДИ МЕТАЛІЧНОГО НАПОВНЮВАЧА
НА ЗАКОНОМІРНОСТІ КОПОЛІМЕРИЗАЦІЇ 2-ГІДРОКСІЕТИЛМЕТАКРИЛАТУ
З ПОЛІВІНІЛПІРОЛІДОНОМ.....180

Дістанов В.Б., Мироненко Л.С., Породнов А.О.
РОЗРОБКА АНТИБАКТЕРІАЛЬНИХ І ПРОТИВІРУСНИХ ПРЕПАРАТІВ
НА ОСНОВІ ПОХІДНИХ ФОРМАЗАНІВ.....187

Жданюк Н.В., Щербань В.О.
ГЕЛЕВЕ ЛИТТЯ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....197

Коваль М.Г.
ПЛАНУВАННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ЦИКЛІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯМ РЕСУРСІВ У ТЕХНОЛОГІЇ
ФАРБУВАННЯ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ
(НА ПРИКЛАДІ БАРВНИКА ДИСПЕРСНОГО ТЕМНО-СИНЬОГО 3).....203

**Лебедєв В.В., Мірошниченко Д.В., Савченко Д.О., Матюхов Д.В.,
Лєндич Є.С., Соловей Л.В.**
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІБРИДНИХ
ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ БІОГРАДАБЕЛЬНИХ ГУМІН-ПОЛІМЕРНИХ
ГІДРОГЕЛЕЙ ЖЕЛАТИНУ 210

Нудченко Л.А., Береговий Т.О., Мережко Н.В., Свідерський В.А.
ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СТАН ПОВЕРХНІ ДИСПЕРСНИХ ОКСИДІВ.....215

Savvova O.V., Zaitseva I.S., Smirnova O.L., Voronov G.K., Fesenko O.I., Pylypenko O.I.
ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF TI6AL4V TITANIUM ALLOY
IN MALIC ACID SOLUTIONS.....221

Трембус І.В., Гондовська А.С., Черьопкіна Р.І.
БЕЗХЛОРМІСТКЕ ВИБІЛЮВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ОРГАНОСОЛЬВЕНТНОЇ
СОЛОМ'ЯНОЇ ЦЕЛЮЛОЗИ.....226

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Бажай-Жежерун С.А., Береза-Кіндзерська Л.В.
ПРИРОДНІ ХАРЧОВІ СОРБЕНТИ ЗЕРНА.....233

Любич В.В., Желєзна В.В., Новіков В.В.
КУЛІНАРНА ЯКІСТЬ МАКАРОНІВ З ДОБАВЛЯННЯМ РІЗНОЇ КІЛЬКОСТІ
БОРОШНА ГАРБУЗОВОГО.....239

ТРАНСПОРТ

Кириченко Г.І., Бердниченко Ю.А., Стрелко О.Г., Антонів О.С.
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОТРИМАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗАЛІЗНИЦІ
ПРИ ВИКОРИСТАННІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ 243

Мурад'ян А.О., Демидюков О.В.
ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ МОРСЬКИХ ПОРТІВ В УМОВАХ
ЦИФРОВИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ: ЗАКОРДОННИЙ ДОСВІД 247

Петренко О.І.
ПРИНЦИПИ ЕРГОНОМІЧНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
ПЕРЕВЕЗЕННЯ НА ТРАНСПОРТІ.....253

Petrov L.M., Kishianus I.V., Petryk Yu.M.
STUDY OF THE FORCE LOAD OF A CAR WHEEL WHEN IT RUNS OVER AN OBSTACLE..... 259

Ярута А.М.
СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОНТЕЙНЕРНИХ ВАНТАЖОПЕРЕВЕЗЕНЬ В ПОРТАХ СВІТУ: ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ..... 264

БУДІВНИЦТВО

Арінушкіна Н.С., Грищенко Т.М.
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СПОСОБІВ РЕГЕНЕРАЦІЇ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ..... 270

Єсакова С.В., Чепурний Д.О.
РОЗРАХУНОК ГОРИЗОНТАЛЬНО НАВАНТАЖЕНИХ ПАЛЬ, ЗАТИСНУТИХ У РОСТВЕРК, З УРАХУВАННЯМ ТРИВАЛОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ..... 276

Коверніченко Л.М., Щерба В.В., Сизий Б.С.
ВИБІР ЗАПОВНЮВАЧИВ ДЛЯ БЕТОНУ..... 283

ЕЛЕКТРОНІКА

Переверзєв О.А., Трапезон К.О.
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНИХ АЛГОРИТМІВ ВІДСТЕЖЕННЯ РУХУ ОБ'ЄКТІВ В ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ БЕЗПЕКИ..... 288

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ..... 294

CONTENTS

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Bernatskyi A.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Lukashenko V.A., Danyleiko O.O., Nabok T.M., Bondarieva V.I., Shamsutdinova N.O.
SPECIFICS OF THE LASER CLADDING PROCESS USING A LASER SCANNING DEVICE.....1

Kazymyrenko Yu.O., Lebedeva N.Yu., Makrukha T.O.
PERSPECTIVES OF APPLICATION OF COATINGS OF 1066 (65Г) STEEL, FILLED WITH ALUMINOSILICATE MICROSPHERES, IN SHIP REPAIR TECHNOLOGIES.....8

INDUSTRIAL ENGINEERING

Kravchenko V.V., Petrychenko Ye.A., Kutkovetska T.O.
PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF GAS-DIESEL ENERGY MEANS IN MODERN AGRICULTURAL PRODUCTION.....13

Luzan S.A., Sytnykov P.A.
SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS: STATE, PROBLEMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS.....17

Pavlenko V.Ya.
PROTECTIVE COATING AS A MEANS OF IMPROVING THE QUALITY OF BLADES OF COLD WEAPONS. METHODS AND MEANS OF CONTROL.....24

Pavlenko V.Ya.
SSESSMENT OF THE TECHNICAL AND ORGANIZATIONAL LEVEL OF PRODUCTION FACILITIES AND TECHNICAL EQUIPMENT IN THE ACCREDITATION OF TESTING LABORATORIES 30

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Volovyk A.Yu.
ADAPTIVE ESTIMATION OF THE DYNAMIC SYSTEMS STATE IN THE PRESENCE OF THE OBSERVATION CHANNEL FAULTS.....35

Ometsynska N.V., Guida O.G., Vyshemirska Ya.S., Minaieva Yu.Yu.
ANALYSIS OF THE METHODS OF INCREASE THE BAND CAPACITY OF FIBER-OPTIC LINE TRACTS USING THE TECHNOLOGIES OF TDM, WDM, UDWDM AND SOLITON SYSTEMS.....43

Rozorinov H.M., Sirchenko I.A.
AN EXPERT ESTIMATION OF EFFICIENCY OF THE INFORMATION DEFENCE SYSTEMS APPLICATION IN THE NETWORKS OF AUDIOVISUAL CONTENT DISTRIBUTION.....48

Trapezon K.O., Voinalovych O.O.
FEATURES OF USING PHOTO WAKE-UP TECHNOLOGY FOR MACHINE VISION SYSTEMS.....52

Ciapa S.M.
THE LINE-OF-SIGHT ROUTE MODEL FOR GROUND COMMUNICATION SYSTEMS.....59

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Ambrosonok A.A., Sazonov A.Yu., Cherepanska I.Yu., Lukiniuk M.V.
VICTIMS DETECTION SYSTEM IN CHEMICALLY CONTAMINATED AREA.....65

Vakaliuk T.A., Bolotina V.V.
THE NEED TO DEVELOP AN ONLINE RESOURCE FOR THE SCIENTIFIC ACTIVITIES OF EMPLOYEES IN HIGHER EDUCATION.....71

Haitan O.M., Kolesnyk D.D.
3D COMPUTER GRAPHICS IN THE DEVELOPMENT OF KNOWLEDGE CONTROL SYSTEM IN THE DGBL APPROACH.....77

Dadyverin V.V., Potapova K.R., Feshchenko I.O., Tarasenko-Kliatchenko O.V., Ivasenko D.V.
FACE RECOGNITION SYSTEM USING COMBINATION OF HAAR TA SVM METHODS.....86

Kovalevskyi V.V., Vakaliuk T.A.
THE STATE OF RESEARCH IN THE FIELD OF DEVELOPMENT AND FUNCTIONING OF PROTECTION SYSTEMS FOR E-COMMERCE SERVICES.....92

Laguta V.V., Egorov O.Yo., Domanska G.A., Tymoshenko L.S.
COMPUTER SYSTEM OF ELECTRICAL CENTRALIZATION DIAGNOSTICS USING COMPUTER TOOLS.....99

Makarova L.M., Latanska L.O., Davlatova D.H., Koltsov A.V.
A TWO-FACTOR NONLINEAR REGRESSION MODEL FOR ESTIMATING THE SIZE OF WEB APPLICATIONS DEVELOPED IN PYTHON USING DJANGO REST FRAMEWORK.....107

Marchuk D.K., Levkivskyi V.L., Marchuk G.V., Holenko M.Yu.
DACTYLIC LANGUAGE RECOGNITION SYSTEM OF THE UKRAINIAN ALPHABET.....109

Pakhomova V.M., Motylenko V.A.
STUDYING THE POSSIBILITY OF USING RBF FOR DETERMINING SMURF ATTACKS BASED ON THE KDDCUP DATABASE.....115

Rybalchenko M.O., Manachyn I.O., Potap O.Yu., Shybakinskyi V.I.
DEVELOPMENT OF A COMPLEX FOR RESEARCH OF CONTROL SYSTEMS BASED ON SCADA SYSTEM AND APPLIED VISUAL MODELING PACKAGE.....122

POWER ENGINEERING

Abdulin M.Z., Sheleshei T.V., Bednarska I.S., Budia Yu.S., Yurchuk V.S.
IMPROVEMENT OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF KVGM 100 BOILER UNITS BY MODERNIZATION OF BURNER DEVICES.....130

Belyanovskaya E.A., Sukhyy K.M., Pustovoy G.M., Yeromin O.O., Sukhyy M.K., Frolova L.A.
CHOICE CRITERIA OF WORKING PAIRS FOR ADSORPTIVE CHILLERS.....136

Kochmarskii V.Z., Kostiuk O.P., Tymeichuk O.Yu., Kuba V.V.
ALGORITHM FOR CALCULATING THE RATE OF $CACO_3$ RELEASE IN THE QUASI-STATE MODE OF RCS OPERATION.....141

Sereda V.V., Solomakha A.S., Prytula N.O., Shvets N.O.
THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THERMAL DESALINATION SYSTEM WITH OPEN AND CLOSE AIR CYCLE.....146

Cherednikov V.M., Cherednikova O.V.
TESTING FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES OF THE HELICOPTER ON THE LABORATORY STAND.....153

METALLURGY

Teslenko O.I., Kuts H.O.
STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL DIRECTIONS OF REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS BY FERROUS METALLURGY ENTERPRISES.....165

CHEMICAL TECHNOLOGY

Batyuk L.V., Kizilova N.M.
DEVELOPMENT, PREPARATION AND QUALITY CONTROL
OF MICRO/NANOSUSPENSIONS:
TECHNOLOGY OVERVIEW AND PERSPECTIVES 177

Grytsenko O.M., Baran N.M., Voloshkevych P.P., Strogan O.I.
INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE METALLIC FILLER NATURE
ON THE REGULARITIES OF COPOLYMERIZATION
OF 2-HYDROXYETHYLMETHACRYLATE WITH POLYVINYLPYRROLIDONE 18

Distanov V.B., Myronenko L.S., Porodnov A.O., Falalieieva T.V.
DEVELOPMENT OF ANTIBACTERIAL AND ANTIVIRAL DRUGS BASED
ON FORMASAN DERIVATIVES 187

Zhdaniuk N.V., Shcherban V.O.
GELCASTING OF CERAMICS 197

Koval M.G.
PLANNING AND ORGANIZATION OF EXPERIMENTAL STUDIES
OF THE CYCLICAL USE OF RESOURCES IN THE TECHNOLOGY OF DYEING TEXTILE
MATERIALS (VIA EXAMPLE OF DYE DISPERSED DARK BLUE Z) 203

**Lebedev V.V., Miroshnichenko D.V., Savchenko D.O., Matyukhov D.V.,
Lendych E.S., Solovey L.V.**
STUDY OF OPERATIONAL PROPERTIES OF HYBRID ENVIRONMENTALLY SAFE
BIODEGRADABLE HUMIN-POLYMER GELATIN HYDROGELS 210

Nudchenko L.A., Berehovy T.O., Merezhko N.V., Sviderskyi V.A.
ENERGY STATE OF THE SURFACE OF DISPERSED OXIDES 215

Savvova O.V., Zaitseva I.S., Smirnova O.L., Voronov G.K., Fesenko O.I., Pylypenko O.I.
ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF TI6AL4V TITANIUM ALLOY
IN MALIC ACID SOLUTIONS 221

Trembus I.V., Hondovska A.S., Cheropkina R.I.
CHLORINE-FREE BLEACHING AND USE OF ORGANOSOLVENT STRAW CELLULOSE 226

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

Bazhay-Zhezherun S.A., Bereza-Kindzerska L.V.
NATURAL FOOD SORBENTS GRAIN 233

Liubych V.V., Zheliezna V.V., Novikov V.V.
MACARONI CULINARY QUALITY WITH THE ADDITION OF DIFFERENT AMOUNTS
OF PUMPKIN FLOUR 239

TRANSPORT

Kirichenko H.I., Berdnychenko Yu.A., Strelko O.H., Antoniv O.S.
ENSURING COMPLIANCE WITH THE TECHNOLOGICAL PROCESS
OF THE RAILWAY WHEN USING AN AUTOMATED SYSTEM 243

Muradian A.O., Demydiukov O.V.
FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF SEA PORTS IN THE CONDITIONS
OF DIGITAL TRANSFORMATION: FOREIGN EXPERIENCE 247

Petrenko O.I.
PRINCIPLES OF ERGONOMIC ORGANIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES
OF TRANSPORTATION BY TRANSPORT 253

Petrov L.M., Kishianus I.V., Petryk Yu.M.
STUDY OF THE FORCE LOAD OF A CAR WHEEL WHEN IT RUNS
OVER AN OBSTACLE 259

Yaruta A.M.
CURRENT PROBLEMS AND PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT
OF CONTAINER FREIGHT TRANSPORTATION IN WORLD PORTS:
TECHNOLOGICAL ASPECT.....264

CONSTRUCTION

Arinushkina N.S., Grishchenko T.M.
ANALYSIS OF MODERN METHODS OF REGENERATION ROAD PAVEMENT.....273
Yesakova S.V., Chepurnyi D.O.
CALCULATION OF HORIZONTALLY LOADED PILES PRESSED
INTO THE GROUND, TAKING INTO ACCOUNT
THE DURATION OF DEFORMATION.....276
Kovernichenko L.M., Shcherba V.V., Syzyi B.S.
CHOICE OF FILLERS FOR CONCRETE.....283

ELECTRONICS

Pereverziev O.A., Trapezon K.O.
RESEARCH OF SOFTWARE ALGORITHMS FOR TRACKING THE MOVEMENT
OF OBJECTS IN ELECTRONIC SECURITY SYSTEMS.....288

INFORMATION ABOUT AUTHORS.....294

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.791.92
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/01

Бернацький А.В.
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Сіора О.В.
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Соколовський М.В.
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Лукашенко В.А.
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Данилейко О.О.
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України;
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Набок Т.М.
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Бондарєва В.І.
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Шамсутдінова Н.О.
Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СКАНАТОРУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

До недоліків лазерної обробки круглою плямою варто віднести нерівномірність часу впливу в центрі й на периферії променю, що приводить до нерівномірності фізико-механічних властивостей по ширині зони обробки. Для вирівнювання часу впливу лазерного променя й регулювання густини потужності на поверхні деталі необхідне застосування технологічних прийомів, до яких належить розгортання лазерного випромінювання за допомогою спеціалізованого устаткування, – сканаторів. Променева стійкість сучасних дзеркал, дозволяє використовувати для віддзеркалення випромінювання високопотужних твердотільних, волоконних та діодних лазерів оптичні елементи без примусового водяного охолодження. Тому актуальними постають проблеми розробки технологічного обладнання для сканування лазерного випромінювання, та дослідження їх застосування для розширення технологічних можливостей різноманітних процесів лазерної обробки (зварювання, наплавлення, легування тощо). Створено сканатор лазерного випромінювання, що представляє собою оптико-механічний пристрій, що складається з відхиляючого дзеркала і механізму переміщення (коливання) даного дзеркала. Лазерне випромінювання після фокусуючої лінзи потрапляло на дзеркало сканатора, розташоване (та таке, що здійснювало коливання) під кутом 45° до осі поширення лазерного випромінювання. За рахунок коливань дзеркала, забезпечувалося відхилення лазерного випромінювання на задану відстань в площині розташованої перпендикулярно напрямку наплавлення. За рахунок застосування сканованого лазерного випромінювання забезпечувався більш рівномірний прогрів матеріалу основи і збільшувалася продуктивність процесу наплавлення. Встановлено, що при використанні концентрованого джерела нагрі-

вання, що рухається та робить додаткові коливання щодо напрямку свого руху, можливо здійснювати такий вплив теплового потоку на поверхню заготівлі, що дозволяє рівномірно неї нагрівати по глибині до температури плавлення в межах деякої області, розміри якої перевищують розміри джерела нагрівання. При збільшенні амплітуди осциляцій джерела нагріву вище деякого значення або збільшенні кількості треків наплавлення, відбувається симетрична локалізація теплового потоку у двох граничних точках і нагрівання поверхні заготівлі в цільовій області стає нерівномірним.

Ключові слова: *лазерне наплавлення, коливання, сканатор, структура, мікротвердість, особливості процесу.*

Постановка проблеми. У теперішній час у лазерних технологіях обробки матеріалів найчастіше застосовується лазерне випромінювання з модовим складом близьким до TEM00, тому що при роботі на цій моді можливо досягнення дифракційної границі розбіжності лазерного променю [1]. Розподіл інтенсивності випромінювання по перерізу променю на виході з лазеру у цьому випадку має вигляд кривої Гаусса, а у поперечному перерізі форму близький до кола [2].

До недоліків лазерної обробки круглою плямою варто віднести нерівномірність часу впливу в центрі й на периферії променю, що приводить до нерівномірності фізико-механічних властивостей по ширині зони лазерної обробки [3]. Для вирівнювання часу впливу лазерного променя й регулювання густини потужності на поверхні деталі необхідне застосування технологічних прийомів, до яких належить розгортання лазерного випромінювання за допомогою спеціалізованого устаткування, – сканаторів [4–6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прийом розгортання (сканування) випромінювання може бути реалізований кількома способами, наприклад за рахунок застосування так званих фокусаторів (багатосегментних дзеркал, які по різному фокусують окремі частки поперечного перетину випромінювання, формуючи на оброблюваному зразку пляму певної конфігурації), шляхом механічного переміщення фокусуючої системи, безпосереднім коливанням з певною частотою фокусуючого елемента, коливанням додаткового дзеркала, яке може бути розташованим після фокусую чого елементу тощо [7-9].

У роботі [10] виконана розробка механічного сканатора, у якому розгортання лазерного випромінювання ведеться за рахунок відхилення лазерного променю фокусуючою лінзою. Конструкція сканатору забезпечує розгортання лазерного випромінювання зі швидкістю до 10 м/с, амплітудою коливань до 10 мм та частотою коливань до 200 Гц. Як показано у роботах [1, 7, 9, 10], з метою збільшення ширини отриманого поверхневого шару металу, що обробляється, можна застосувати поперечні коливання лазерного випромінювання, при цьому збільшиться ширина зони нагріву без зменшення густини потужності лазерного джерела нагріву.

Зазвичай сканатори мають рухливі оптичні елементи – дзеркала, що відхиляють лазерне випромінювання [1, 7, 10]. Сканатори розрізняються за законом сканування, типом й іншим ознакам. Найбільшого розповсюдження набули системи розгортання лазерного випромінювання на базі гальванометричних сканаторів, які застосовуються для ведення таких процесів, як прецизійне лазерне маркування різноманітної продукції в промисловому виробництві, декоративне лазерне гравірування в рекламно-сувенірному бізнесі та при виробництві ювелірних виробів.

В таких сканаторах застосовуються дзеркала, які не мають примусового охолодження. До появи високопотужних твердотільних, волоконних та діодних лазерів це унеможливлювало їх використання для ведення таких процесів як зварювання, легування, термообробка тощо. Оскільки для лазерного випромінювання 10,6 мкм, що генерували високопотужні CO2-лазери, необхідно було застосування дзеркал з примусовим охолодженням, що в свою чергу, значно ускладнювало конструкцію дзеркальних блоків та збільшувало їх масо-габаритні характеристики.

Променева стійкість сучасних дзеркал, дозволяє використовувати для віддзеркалення випромінювання високопотужних твердотільних, волоконних та діодних лазерів оптичні елементи без примусового водяного охолодження. Тому актуальними постають проблеми розробки технологічного обладнання для сканування лазерного випромінювання, та дослідження їх застосування розширення технологічних можливостей різноманітних процесів лазерної обробки (зварювання, наплавлення, легування тощо).

Постановка завдання. Метою роботи є розробка технологічного обладнання для сканування лазерного випромінювання, та вивчення особливостей його застосування для розширення технологічних можливостей процесу лазерного наплавлення.

Виклад основного матеріалу. Лазерне наплавлення здійснювали на листові зразки зі сталі

12Х21Н5Т товщиною 1,0 мм. Досліджували варіанти отримання треків різної ширини і висотою до 9 мм. Потужність лазерного випромінювання варіювалася в діапазоні 0,5...4,4 кВт; швидкість обробки 0,5...4 м/хв; величина розфокусування 0...+ 35 мм. Для наплавлення використовували наплавочні порошок фракцією "150 + 53" марки 16316 виробництва компанії "Castolin Eutectic" з наступним хімічним складом: Fe основа; 0,03% C; 17,5% Cr; 13% Ni; 2,7% Mo. Витрати газу, що транспортує порошок з дозатора в зону впливу лазерного випромінювання становили 2…7 л/хв. Витрати порошку при наплавленні становили 0,5…2,0 кг/год.

Під час проведення експериментів з лазерного наплавлення, порошок безперервно подавався в зону впливу лазерного випромінювання. Діаметр плями лазерного випромінювання на деталі становив 0,6...4,0 мм, в залежності від значення величини розфокусування лазерного випромінювання (0...+ 35 мм). Витрати порошку і витрати газу, що транспортує порошок з дозатора в зону впливу лазерного випромінювання, підбирали таким чином, щоб забезпечити стабільне формування валика наплавленого металу. Направлене формування струменя газу з наплавочним порошком в зону впливу лазерного випромінювання забезпечували за допомогою формуючого сопла з внутрішнім діаметром 2 мм, показаного на рис.1 (позиція 5). Формуюче сопло було закріплено разом з лазерною технологічною головкою на рухомий каретці маніпулятора. В ході процесу лазерного наплавлення, сопло розташовувалося під кутом 15-30° до горизонтальної площини і направляло струмінь газу з порошком безпосередньо в зону впливу лазерного випромінювання, назустріч руху лазерного випромінювання («проти ходу»), як показано на рис. 1.

При виконанні підбору режимів наплавлення, використовувався сканатор лазерного випромінювання, що представляє собою оптико-механічний пристрій, що складається з відхиляючого дзеркала і механізму переміщення (коливання) даного дзеркала. Лазерне випромінювання після фокусуючої лінзи потрапляло на дзеркало сканатора, розташоване (та здійснююче коливання) під кутом 45° до осі поширення лазерного випромінювання. За рахунок коливань дзеркала, забезпечувалося відхилення лазерного випромінювання на задану відстань в площині розташованої перпендикулярно напрямку наплавлення (переміщення каретки). За рахунок застосування сканованого випромінювання забезпечувався

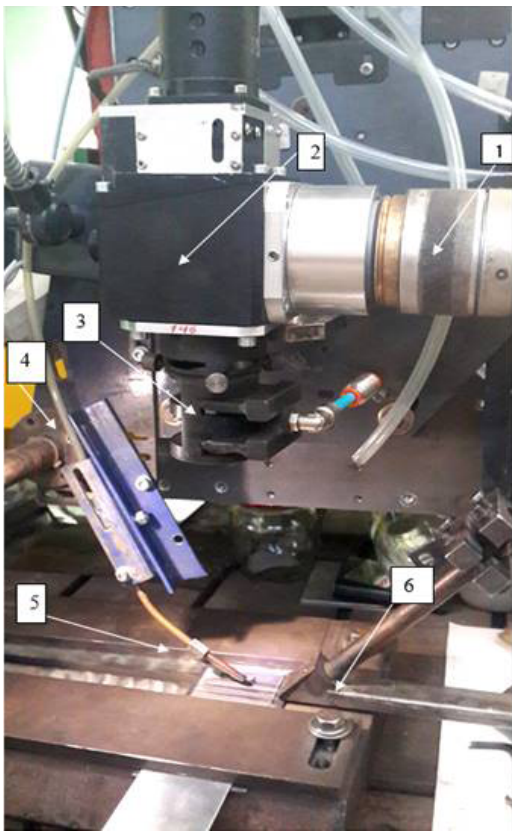


Рис. 1. Стенд для лазерного наплавлення: 1 – лазерна головка; 2 – сканатор лазерного випромінювання; 3 – «cross jet» («повітряний ніж») – система захисту оптики; 4 – канал по якому транспортується порошок; 5 – сопло, що формує потік порошку; 6 – система газового захисту наплавленого металу.

більш рівномірний прогрів матеріалу основи і збільшувалася продуктивність наплавлення. Крім того, нівелювався недолік застосування лазерного випромінювання з гаусовим розподілом інтенсивності потужності.

За допомогою оптичної мікроскопії та мікродюрометричного аналізу, були досліджені зразки, які відрізнялися параметрами технологічних режимів. Дослідження були проведені на різних ділянках кожного із зразків «наплавлений метал → ЗТВ → основний метал». За допомогою оптичної мікроскопії виконано оцінку структури (включаючи структуру і межі зерен, морфологію і орієнтацію, домішки і включення). Виконано оцінки наявності тріщин, розшарувань, пустот.

Зразки для металографічних досліджень готували на високошвидкісних полірувальних колах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Структуру металу наплавлення виявляли електролітичним травленням в 20% розчині хромової кислоти. Дослідження проводили на мікроскопі «Neophot 32», мікротвердість вимірювали

на мікротвердомірі фірми «Leco» марки М400. Фотографії отримані за допомогою фотокамери «Olympus».

Нижче наведено порівняння структури зразків, одержаних на таких режимах:

№ 1207.1. Наплавлення сканатором з ексцентриком 0,1 мм, частота сканування променя 25 Гц, одна доріжка. Потужність лазерного випромінювання Р = 3 кВт, швидкість наплавлення V = 2м/хв, фокусна відстань лінзи F = 300 мм, величина розфокусування ΔF=+35мм.

№ 1207.2. Наплавлення сканатором з ексцентриком 0,1мм, 25 Гц , 7 доріжок с кроком 2 мм; Р=3кВт, V=2 м/хв, F=300мм, Δ F=+35мм.

Наплавлення в зразку № 1207.1 має V-подібну форму з повним проплавленням основного металу (рис. 2). Проводилися вимірювання мікротвердості досліджуваного наплавлення по висоті і перпендикулярно осі наплавлення на 0,5 висоти, при навантаженні 100 г з кроком h=250 мкм.

Структура металу наплавлення в зразку № 1207.1 лита (рис. 3), мілкокомірчаста (d комірок от 5 до 12 мкм). Зустрічаються комірки рівновісної і витягнутої форми, подекуди зберігаються фрагменти дендритної структури (рис. 3). Структура наплавлення однорідна по висоті, спостерігається деяке укрупнення в корені наплавлення. Мікроструктура наплавлення – легований аустенит і δ-ферит (4–8%). Твердість металу наплавлення HV1 3090-3220 МПа.

У лінії сплавляння, з боку наплавлення, в зразку № 1207.1 спостерігається світлотравна смужка (перехідна зона) шириною від 100 до 200 мкм. Твердість смужки HV1 2680-3060 МПа. Мікроструктура смужки складається з аустеніту і фериту (рис. 4).

Структура ЗТВ в зразку №1207.1 складається з аустенітної матриці і виділень δ-фериту, витягнутих уздовж напрямку прокату. На відстані при-

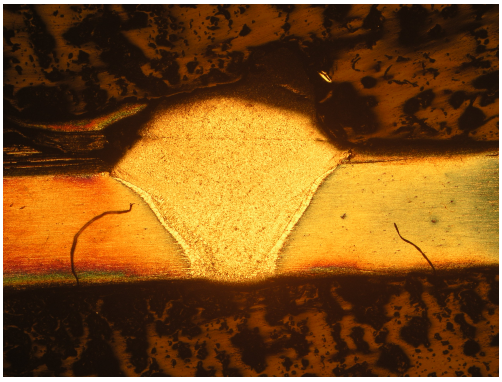


Рис. 2. Мікроструктура наплавленого зразка № 1207.1. Загальний вигляд×25

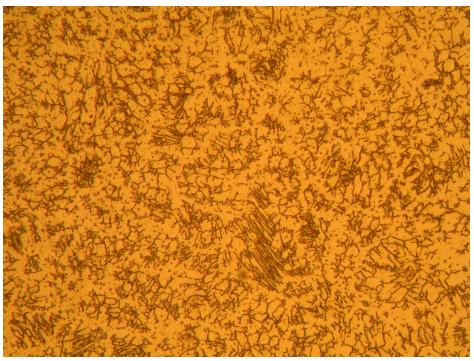


Рис. 3. Лита структура металу наплавлення в зразку № 1207.1×500

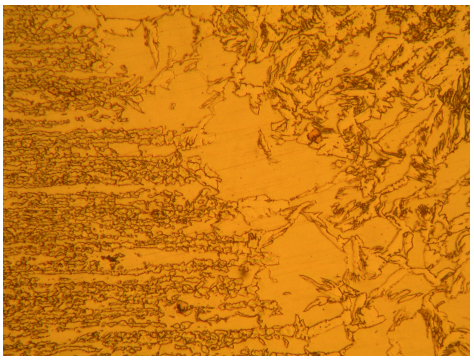


Рис. 4. Мікроструктура у лінії сплавлення в зразку № 1207.1 ×500.

близно 200 мкм від лінії сплавляння кількість аустеніту збільшується в порівнянні з основним металом. Твердість металу ЗТВ HV1 3090-3220 МПа. У наплавленому металі, на лінії сплавлення і в металі ЗТВ дефектів не виявлено.

Структура основного металу в зразку № 1207.1 складається з аустеніту і δ-фериту (до 30%) з яскраво вираженою текстурою прокату. Твердість основного металу становить HV1 3090-3220 МПа.

Структура наплавлення дрібнокомірчаста з фрагментами дендритної структури, однорідна по висоті наплавлення. Зміна твердості по висоті і ширині наплавлення незначні. Деяке падіння твердості спостерігається в білій смужці у лінії сплавлення. Дефектів в металі наплавлення і ЗТВ в зразку №1207.1 не виявлено.

У зразку №1207.2, який має зовнішній вигляд нібито з «подвійною доріжкою» режим відрізнявся від зразка №1207.1 кількістю треків наплавлення (проходів для збільшення висоти наплавлення). У зразку №1207.2 було виконано 7 окремих треків з кроком по координаті Z у 2 мм.

У зразку № 1207.2 обидві сформовані «доріжки» мають V-подібну форму з повним проплавленням основного металу. На висоті ~ ¾ «доріжки» перекриваються (рис. 5).

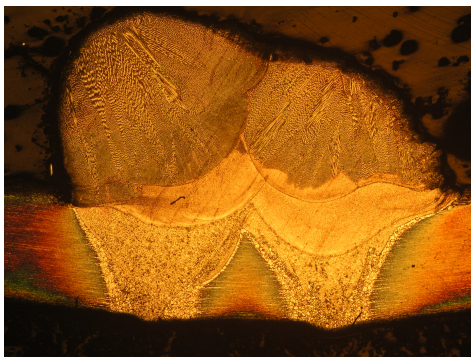


Рис. 5. Мікроструктура наплавленого зразка № 1207.2. Загальний вигляд ×25

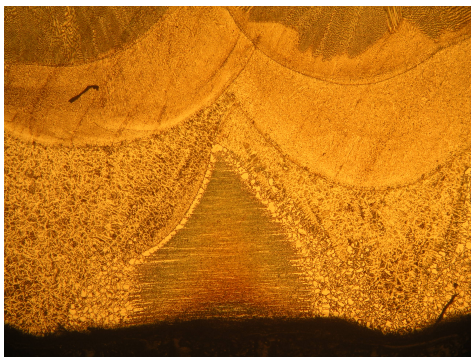


Рис. 6. Структура металу в зразку № 1207.2 в місці накладення «доріжок» ×50

У зразку №1207.2 мілкокомірчаста структура (d комірок 5–15 мкм). Форма комірок рівновісна і витягнута. Зберігаються фрагменти дендритів 2-а і 3-я області мають структуру кристалітів різного розміру і орієнтації і відрізняються травимістью (рис. 5). Середня частина наплавлення (2-а область) більше світлотравима. Мікроструктура металу наплавлення є аустенитною матрицею і виділеннями δ-фериту. Кількість δ-фериту відрізняється по висоті наплавлення: 1 область до 7%, 2 и 3 – до 1,5–2%.

Твердість шару, який зберіг елементи дендритної структури, трохи вище, ніж решти наплавлення і становить HV1 3220–3090 Мпа (1-а область). Твердість більш світлотравимої ділянки становить HV1 3220–2970 Мпа (2-а область). Твердість ділянки з більш темнотравимої структурою становить HV1 2500–2850 Мпа (3-я область).

У місці перекриття «доріжок» ділянка литої мілкокомірної структури невеликий (рис. 6). Основна частина наплавлення в місці перекриття має структуру витягнутих кристалітів різного розміру з різною орієнтацією (рис. 7).

Твердість металу наплавлення при перекритті «доріжок» змінюється по висоті від HV1 2940-3090 МПа в нижній частині (ділянка з мілкокомірчастою структурою, що зберегла фрагменти дендритів) до HV1 2740–2850 МПа у верхній частині (структура різноорієнтованих кристалітів). У місцях перетину шарів різних «доріжок» твердість становить HV1 2850–2930 МПа.

Уздовж лінії сплавлення спостерігається світла смужка (перехідна зона), структура якої складається з великих виділень аустеніту і фериту (рис. 8). Ширина смужки більше з зовнішньої сторони доріжки і в нижній її частині становить приблизно 60–120 мкм і набагато вужче в області накладення «доріжок» 30–50 мкм (рис. 6). Твердість металу світлої смужки становить HV1 2740–2800 МПа.

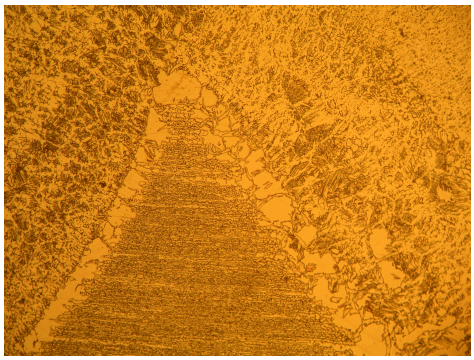


Рис. 7. Структура металу в зразку № 1 207.2 у лінії сплавлення ×200

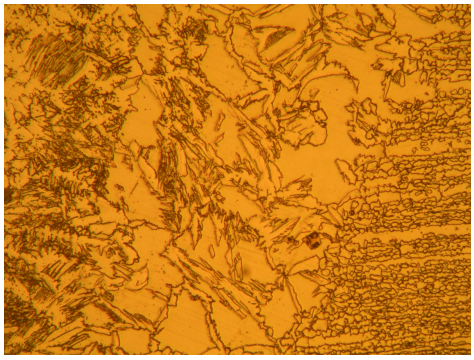


Рис. 7. Структура металу в зразку № 1 207.2 у лінії сплавлення ×200

Зона термічного впливу складається з аустенітної матриці і δ-фериту, витягнутого уздовж напрямку прокату. На відстані до 200 мкм від лінії сплавлення кількість аустеніту в структурі ЗТВ збільшено в порівнянні з основним металом (рис. 7), як із зовнішнього боку, так і в області між двома «доріжками». Твердість металу ЗТВ HV1 3050-3090 МПа.

У металі наплавлень на лінії сплавлення і в ЗТВ дослідженого зразка № 1207.2 дефектів не виявлено.

В результаті дослідження зразка № 1207.2, можна сказати наступне. Структура наплавлення

складається з 2 типів: мілкокомірчаста з фрагментами дендритної структури в корені наплавлення і кристаллітна з різним орієнтуванням кристаллітів. Різниця в структурі пов'язана з різною швидкістю охолодження по висоті наплавлень. Другий тип структури складається з ділянок з різним травленням, що може бути результатом зміни хімічного складу по висоті наплавлень. Мікротвердість в корені наплавлення вище, ніж в ділянках з з кристаллітной структурою. У білій смужці, що йде уздовж лінії сплаву, твердість нижче, ніж в наплавленні і ЗТВ.

Висновки. Встановлено, що при використанні концентрованого джерела нагрівання, що рухається та робить додаткові коливання щодо напрямку свого руху, можливо здійснювати такий вплив теплового потоку на поверхню заготівлі, що дозволяє рівномірно неї нагрівати по глибині до температури плавлення в межах деякої області, розміри якої перевищують розміри джерела нагрівання.

При збільшенні амплітуди осцилляцій джерела нагріву вище деякого значення або збільшенні кількості проходів наплавлення (треків), відбувається симетрична локалізація теплового потоку у двох граничних точках і нагрівання поверхні заготівлі в цільовій області стає нерівномірним. Це призводить до зміни геометрії та структури одержаних треків наплавлення.

Список літератури:

1. Хаскин, В. Ю., Шелягин, В. Д., Бернацкий, А. В. Современное состояние и перспективы развития технологий лазерной и гибридной наплавки (Обзор). Автоматическая сварка. 2015. № 5–6. С. 30–33.

2. Bernatskyi, A., Khaskin, V. The history of the creation of lasers and analysis of the impact of their application in the material processing on the development of certain industries. History of Science and Technology. 2021. Т. 11. № 1. С. 125–149.

3. Шелягин, В. Д., Кривцун, И. В., Борисов, Ю. С., Хаскин, В. Ю., Набок, Т. Н., Сиора, А. В., Бернацкий, А. В., Войнарович, С. Г., Кислица, А. Н. Недей, Т. Н. Лазерно-дуговые и лазерно-плазменные технологии сварки и нанесения покрытий. Автоматическая сварка. № 8. С. 49–54.

4. Shi, R., Khairallah, S. A., Roehling, T. T., Heo, T. W., McKeown, J. T., Matthews, M. J. Microstructural control in metal laser powder bed fusion additive manufacturing using laser beam shaping strategy. Acta Materialia. 2020. Т. 184. С. 284–305.

5. Gusarov, A. V., Grigoriev, S. N., Volosova, M. A., Melnik, Y. A., Laskin, A., Kotoban, D. V., Okunkova, A. A. On productivity of laser additive manufacturing. Journal of materials processing technology. 2018. Т. 261. С. 213–232.

6. Jia, H., Sun, H., Wang, H., Wu, Y., Wang, H. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Т. 113(9). С. 2413–2435.

7. Haskin, V. Y., Bernatsky, A. V., Siora, O. V., Nikulin, O. T. Study of influence of conditions of process of laser superficial processing of the loaded steel articles on structure and properties of obtained layers. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. 2011. Т. 33. С. 561–567.

8. Бернацький, А. В., Соколовський, М. В., Сіора, О. В., Лукашенко, В. А., Шамсутдінова, Н. О., Данилейко, О. О., Бондарєва, В. І. Лазерне наплавленння з використанням ручного інструменту в напівавтоматичному режимі роботи. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 2022. № 2. С. 19–25.

9. Bernatsky, A. V. Laser surface alloying of steel items. The Paton Welding Journal. 2013. № 12. С. 2-8.

10.Кравченко, Ю. К., Макортецький, В. М., Бернацький, А. В. Розробка сканатора лазерного випромінювання. Матеріали V всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», (Київ, 27–29 травня 2009 р.): тези доповіді. ІЕЗ ім. Є. О. Патона. 2009. С. 96.

Bernatskyi A.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Lukashenko V.A., Danyleiko O.O., Nabok T.M., Bondarieva V.I., Shamsutdinova N.O. SPECIFICS OF THE LASER CLADDING PROCESS USING A LASER SCANNING DEVICE

The defects of laser treatment with a round spot include the uneven exposure time in the center and on the periphery of the beam, which leads to the uneven physical and mechanical properties across the width of the treatment zone. In order to equalize the time of the effective laser emission and adjust the laser power density on the surface of the working part, it is necessary to use technological methods, that use laser radiation via a specialized installation – laser scanning devices. The radiation resistance of modern mirrors allows for reflection the radiation of high-power solid-state, fiber and diode lasers using optical elements without

forced water cooling. Therefore, the problems of development of technological equipment for scanning laser radiation, as well as research of their application to expand the technological capabilities of various laser processing processes (welding, surfacing, alloying, etc.) are becoming urgent. During the course of the study, a laser scanning device was created in the form of an optico-mechanical device consisting of a deflective mirror as well as a mechanism for oscillating the mirror. Laser radiation is then passed through the focusing lens to the scanning mirror, located (the one that radiated) at a 45° angle to the laser radiation axis. Due to the mirror oscillation, laser radiation was deflected by a set distance in a plane, perpendicular to the direction of surfacing. Due to the use of scanning modes of laser radiation, more uniform heating of the base of the material was ensured with an increase in the productivity of the surfacing process. During the course of the study, it was established that usage of a moving concentrated heating source that provides additional heating in the direction of its movement makes it possible to ensure a uniform heat flow on the surface of the workpiece that allows for creation of an in-depth area with a melting temperature, the dimensions of which exceed the dimensions of the heating source. During this, an increase of the heating source oscillation amplitude to a greater value (or a greater number of surfacing tracks) symmetrically localizes the heat flow at two extreme points, leading to an uneven distribution of heating on the workpiece surface target area.

Key words: *laser cladding, oscillations, laser scanning device, structure, microhardness, processing features.*

УДК 629.1:621.793
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/02

Казимиренко Ю.О.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Лебедєва Н.Ю.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Макруха Т.О.
Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОКРИТТЯ З 65Г, НАПОВНЕНОГО АЛЮМОСИЛІКАТНИМИ МІКРОСФЕРАМИ, У СУДНОРЕМОНТНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Стаття присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми судноремонту, пов'язаною з розробкою нових зносостійких покриттів для відновлення та ремонту суднових механізмів. Аналіз сучасних технологій показав доцільність використання електродугового напилення з додаванням у зону дуги дисперсних наповнювачів. Для дослідження обрано композиційне покриття з суцільнотягнутого дроту марки 65Г, яке нанесено на підкладку зі сталі марки Ст3. На відміну від аналогів з тугоплавкими керамічними порошками до складу покриттів додано зольні мікросфери алюмосилікатного складу. Експериментально досліджено зносостійкість та мікротвердість покриттів, для чого застосовано методи механічних випробувань за стандартними методиками. Одержані результати порівняно з покриттями без наповнювача.

Результати випробувань показали, що зносостійкість покриттів, наповнених мікросферами, приблизно на 25% вище ніж у покриттів без наповнювача, що пояснюється особливостями структури покриттів та підтверджується зростанням мікротвердості сталевої матриці приблизно 17%. Покриття композиції 65Г–АСПМ мають пористу полідисперсну структуру з рівномірно розташованими сферичними включеннями діаметром 200…400 мкм, навколо яких у сталевій матриці формуються мікронапруження. Додавання алюмосилікатних мікросфер сприятиме підвищенню об'ємної кількості пор приблизно на 10%, які під час тертя в умовах змащування заповнюються мастилом.

За допомогою методів системного аналізу, а саме SWOT-аналізу, визначено переваги та недоліки використання композиційних покриттів з 65Г, наповнених алюмосилікатними мікросферами, у сучасних технологіях судноремонту. Результати досліджень можуть бути застосовані для відновлення зношених деталей та обладнання, зокрема суднових насосів. Подальші перспективи роботи авторів пов'язані з розробкою певних технологічних процесів нанесення покриттів та практичних рекомендацій експлуатації деталей.

Ключові слова: *суднові деталі, механізми, зносостійкість, композиційні покриття, зольні мікросфери.*

Постановка проблеми. Сучасні події в Україні показали стратегічне значення суднобудівної та судноремонтної галузей, від яких залежить розвиток логістичної системи та підвищення рівня обороноздатності країни. У важких умовах роботи зруйнованих підприємств пріоритетним напрямком суднобудування слід вважати судноремонт. Проведення ремонтних заходів технічних засобів, машинних агрегатів, двигунів, суднових систем, розробка технічних рішень з підвищення ресурсу їх експлуатації є складною технічною задачею, пов'язаною з вибором і розробкою нових матеріалів, методів зміцнення та обробки поверхні. До матеріалів деталей суднових механізмів висунуто вимоги зносостійкості, витривалості, демпфірувальної здатності, корозійної стійкості, технологічності [1, с. 119–127]. Для ефективного захисту від абразивного зношування сталевих виробів застосовуються: електроерозійне легування, поверхневе пластичне деформування, наплавлення зносостійким матеріалом, напайка або приварювання твердосплавних пластин та сегментів, нанесення композиційних покриттів [2, с. 18–24]. Вибір методу безпосередньо залежить від технічних умов експлуатації, виробничих ресурсів та певних економічних чинників. Найбільшою ефективністю для захисту деталей та механізмів обладнання від корозійного та абразивного зно-

шування вважається електродугове напилення. Підвищення механічних та експлуатаційних характеристик покриттів, зокрема міцності та зносостійкості, є важливою науково-технічною проблемою судноремонту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним зі шляхів вирішення поставленої проблеми є формування на поверхні конструкційної сталі тонкого щільного шару покриття більшої твердості, ніж у металу-основи [2, с. 105–112]. Проте важливим питанням є вірний вибір матеріалу, до якого крім твердості та міцності, пред'являються вимоги термічної стабільності, корозійної стійкості та низької інтенсивності зношування. Підвищену зносостійкість у абразивному середовищі мають пружинно-ресорні сталі ферито-перлітної структури, такі як 65Г (ДСТУ 8429:2015). В роботі [4, с. 213–223] розглянуто теоретично-технологічні передумови підвищення її зносостійкості загартуванням із середнім відпуском або електроімпульсною обробкою. Автори роботи [5, с. 156–161] показали, що ефективність поверхневого зміцнення сталі 65Г пов'язана з формуванням нанокристалічної структури, що підтверджується результатами експериментальних робіт щодо впливу механоімпульсної обробки на опір контактної втоми.

Авторами робіт [6, с. 5; 7, с. 97] розглянуто технологічні питання щодо нанесення електродугових покриттів з дротів марок 65Г і Св-08Г2С, підвищену твердість яких забезпечує формування «частково термічно стабілізованої полігонізаційної структури» шляхом застосування їх додаткової деформації з термічною обробкою. Цей ефект можна посилити утворенням у структурі покриттів зміцнювальної фази. В роботі [6, с. 5; 8, с. 65] автори застосовують порошок карбіду титану TiC. Напилені електродуговим методом покриття піддаються впливу передрекристалізаційної термічної обробці в температурному діапазоні 300…500 °С, після проведення якої спостерігається значне (на 26%) підвищення твердості, що пояснюється додатковим наклепом під дією впливу частинок на сталеву поверхню підкладки. Зменшення концентрації напружень у структурно-неоднорідних композиціях можливо введенням до їх складу дисперсних наповнювачів сферичної форми. Такий досвід був викладений авторами у статтях [9, с. 82–83; 10, с. 39–41], де при напилюванні сталевого дроту марки 65Г (ДСТУ 3671-97) у зону дуги введено зольні мікросфери алюмосилікатного складу. Покриття нанесено на сталь звичайної якості марки Ст3 (ДСТУ 2651:2005), яка широко застосовується у суднобудівних технологіях, зокрема для виготовлення елементів корпусів суднового устаткування та механізмів загального призначення. В роботі [9, с. 81–86] проаналізовано фізико-хімічні процеси формування покриття на сталевій підкладці зі значним (на 8…22%) ефектом зміцнення. Вплив алюмосилікатних мікросфер на корозійну стійкість та теплозахисні властивості електродугових покриттів з 65Г проаналізовано у роботі [10, с. 38–44]. Одержані результати потребують узагальнення та доповнення дослідженнями зносостійкості, на підставі чого можна визначитись з перспективами їх подальшого застосування у технологіях судноремонту.

Мета роботи – дослідити перспективу використання електродугових покриттів з 65Г, наповнених алюмосилікатними мікросферами, у технологіях ремонту та відновлення суднових механізмів шляхом експериментального дослідження їх зносостійкості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Покриття товщиною 1,5 мм нанесено електродуговим методом на пластину розміром 140–100–3,5 мм зі сталі марки Ст3 (ДСТУ 2651:2005). Для формування покриття застосовано суцільнотягнутий дріт (d = 2 мм) марки 65Г (ДСТУ 3671-97) та зольні мікросфери «Піносфера» алюмосилікатного складу (АСМП) марки МПк200-400 (виробник – ТОВ «Виробниче об'єднання Мікросфери», Україна). Вибір мікросфер обумовлено їх здатністю гасити коливання та стримувати усадочні процеси при формуванні композиційних матеріалів [10, с. 28–34]. Режими попередньої струменево-абразивної обробки сталевої пластинки та електродугового напилення (сила струму – 80…160 А, тиск повітря – 0,4…0,6 МПа, швидкість подачі дроту – 4,2 м/хв, відстань від сопла до напилювальної поверхні – 80 мм) покриття обрано на підставі рекомендацій авторів робіт [7, с. 95; 11, с. 37; 12, с. 230]; об'ємний вміст мікросфер склав 10…25%.

Дослідження зносостійкості проводились за схемою вал–колодка (тертя ковзання) на машині тертя СМЦ-2 при обертовій швидкості 0,8 м/с, при навантаженні 4 МПа та обмеженому змащенні маслом М10Г2К. Для випробувань застосовувались зразки дискової форми (d = 20 мм, $\delta_{верх}$ = 11 мм, $\delta_{нижн}$ = 12 мм). Зношування зразків визначалося за зменшенням маси і розмірів зразків, змінами геометрії поверхні після проходження кожних 10 км шляху загальною протяжністю 40 км протягом 14 год. Для вимірювань маси

застосовано аналітичні ваги GR200; інформація щодо геометрії поверхні реєструвалася за допомогою профілограм. Зносостійкість розглянуто як величину, яка зворотна швидкості зношування і визначається у г/км. Результати вимірювань оброблено методами математичної статистики та для більшої наочності представлені на рис. 1 у вигляді гістограм, на яких нанесено значення втрати маси зразків з покриттями, наповненими АСПМ з об'ємним вмістом 20% і покриттями без наповнювача.

Результати випробувань показали, що зносостійкість покриттів, наповнених мікросферами, приблизно на 25% вище, ніж у покриттів без наповнювача, що пояснюється особливостями структури покриттів. Покриття композиції 65Г–АСПМ мають пористу (21%) полідисперсну структуру з рівномірно розташованими сферичними включеннями діаметром 200…400 мкм. Алюмосилікатні мікросфери є продуктами золоуносу ТЕС та являють собою тугоплавкі неорганічні сполуки мінералогічного складу [13, с. 28-34]. При електродуговому напиленні вони зберігають свою сферичну форму, не утворюють склофази [9, с. 81-86], мають насипну щільність 50…60 кг/м^3, тому на відміну від частинок TiC та Al2O3, які додавали до покриттів з 65Г автори роботи [7, с. 94-99], не сприяють явищу додаткового наклепу. Додавання алюмосилікатних мікросфер до складу електродугових покриттів з 65Г сприятиме підвищенню об'ємної кількості пор приблизно на 10%, які під час тертя в умовах змащування заповнюються мастилом.

Мікротвердість сталевої матриці покриття з 65Г визначили за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 за ДСТУ 3651-97 з навантаженням на індентор 50 мг: на рис. 2 наведено фотографію мікроструктури покриття композиції 65Г–АСПМ, зробленій на оптичному мікроскопі БІОЛАМ-І, можна побачити відбиток індентора. Через пористість вимірювання мають велику похибку (±14%), опосередковані результати показали, що мікротвердість покриттів композиції 65Г–АСПМ (Hμ50 = 3,59 ГПа) на 17% перевищує мікротвердість (Hμ50 = 3,47 ГПа) покриття без наповнювача.

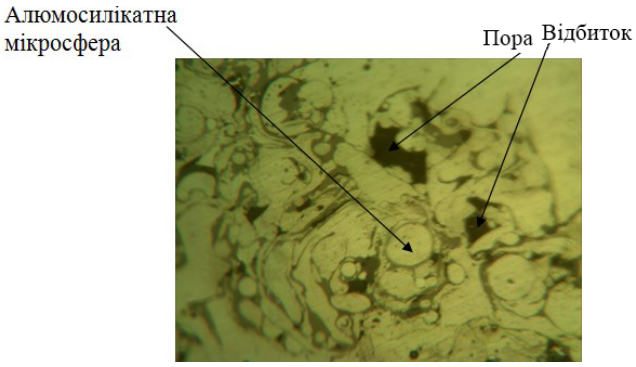


Рис. 2. Мікроструктура (оптична фотографія, ×350) покриття композиції 65Г–АСМП (20% об'ємн.)

Ефект зміцнення можна пояснити формуванням у сталевій матриці навколо сферичних включень мікронапружень, для визначення яких використано авторську методику [14, с. 90-94]. Локалізацію деформації (рис. 3) описано через співвідношення умовних модулів стискання матриці *Km* і мікросфери $\overline{K}_m$ як теоретично визначеними величинами, що враховують не тільки пружні характеристики матеріалів матриці та наповнювача, а і розміри пор, сферичних включень, товщину стінки мікросфери.

Побудована за результатами розрахунків залежність (див. рис. 3, лінія 1) свідчить про

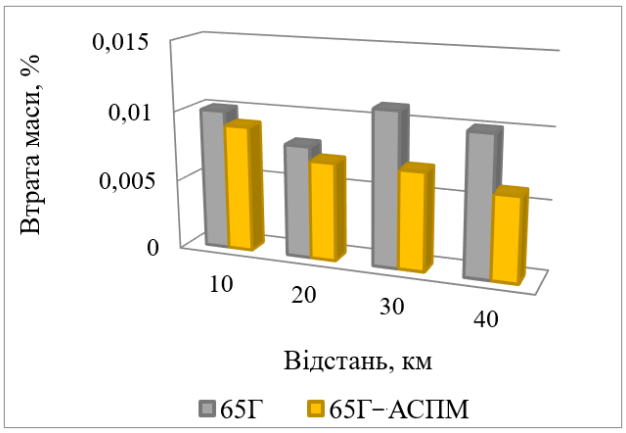


Рис. 1. Зміна маси покриттів протягом випробувань

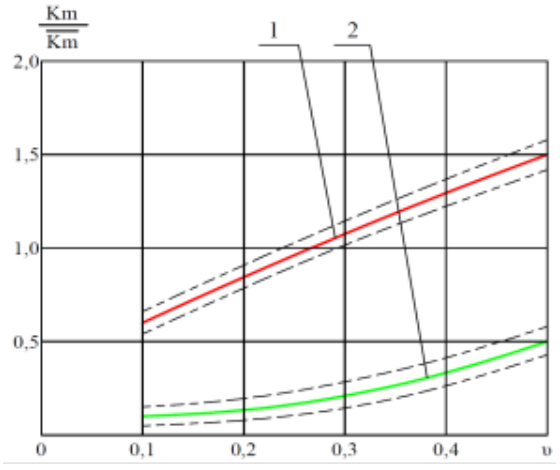


Рис. 3. Інтенсивність мікронапружень в композиційних покриттях, наповнених мікросферами

зростання напружень при збільшенні об'ємного вмісту мікросфер; пунктирними лініями показано розбіг значень в залежності від пористості сталевої матриці (10…20%). Підвищення концентрації мікронапружень обумовлює зниження міцності зчеплення композиційного покриття з підкладкою і залежить від фізико-хімічних процесів. Для порівняння на графік (див. рис. 3, лінія 2) нанесено теоретично-експериментальні значення для електродугових покриттів з Св-08Г2С, наповнених порожніми скляними мікросферами натрій-силікатного складу.

Перспективи подальшого впровадження розроблених покриттів у судноремонтні технології проаналізовано за допомогою SWOT-аналізу [15, с. 147-157]. Результати наведені у табличній формі (табл. 1) і містять оцінку слабких і сильних сторін з визначенням можливостей розвитку та ризиків.

Виконаний ситуаційний аналіз (див. табл. 1) допоможе розвинути здобуток авторів з подальшим доопрацюванням та усуненням слабких місць.

Результати досліджень спрямовані на вирішення важливої науково-технічної проблеми судноремонту, пов'язаної з розробкою нових зносостійких покриттів для відновлення механізмів і обладнання, можуть бути застосовані для ремонту зношених деталей, зокрема для суднових насосів. Подальші перспективи роботи авторів пов'язані з розробкою певних технологічних процесів нанесення покриттів та практичних рекомендацій експлуатації деталей.

Таблиця 1

Ситуаційний аналіз перспектив застосування покриттів 65Г–АСПМ у судноремонтних технологіях

Сильні сторони (Strengths)	Можливості розвитку (Opportunities)
1. Можливість виконання ремонтних робіт в порту і на судні та швидкого відновлення малогабаритних деталей. 2. Можливість поєднання комплексу цінних властивостей (зносостійкості, термостійкості, корозійної стійкості, демпфірувальної здатності).	1. Розробка нових складів композиційних покриттів поширює номенклатуру ремонтних матеріалів і спрямована на ресурсозбереження. 2. Застосування зольних мікросфер для формування покриттів як один із напрямків рециклінгу виробничих відходів.
Слабкі сторони (Weakness)	Загрози (Threats)
1. Низький коефіцієнт використання матеріалу. 2. Необхідність постійного аналізу фізико-хімічних процесів для забезпечення стабільної міцності зчеплення покриття з поверхнею деталі.	1. Зростання цін на енергоносії та здороження виконання ремонтних робіт. 2. Дефіцитність дроту 65Г. 3. Необхідність оновлення та амортизації обладнання.

Висновки

1. Експериментальні випробування показали, що зносостійкість покриттів композиції 65Г–АСМП, приблизно на 25% вище, ніж у покриттів без наповнювача, що пояснюється особливостями структури покриттів та підтверджується зростанням мікротвердості сталевої матриці приблизно 17%.

2. Покриття композиції 65Г–АСПМ мають пористу полідисперсну структуру зі сферичними включеннями, навколо яких у сталевій матриці формуються мікронапруження. Додавання алюмосилікатних мікросфер сприятиме підвищенню об'ємної кількості пор приблизно на 10%, які під час тертя в умовах змащування заповнюються мастилом.

3. За допомогою методів системного аналізу, а саме SWOT-аналізу, визначено переваги та недоліки використання композиційних покриттів з 65Г, наповнених алюмосилікатними мікросферами, у сучасних технологіях судноремонту.

Список літератури:

1. Коваленко І. В. Обґрунтування вибору двошарової сталі для виготовлення суднових допоміжних механізмів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки».* 2018. 36. С. 119–127.

2. Тарельник В. Б., Саржанов Б. О., Гапон О. О. Новий спосіб відновлення і зміцнення деталей з листової сталі, що піддаються в процесі експлуатації абразивному зносу. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів».* 2019. 1–2 (35–36). С. 18–24.

3. Савуляк В. І., Шенфельд В. Й. Вплив мікроструктури високовуглецевих шарів, отриманих методом електродугового наплавлення з використанням вуглецевих волокнистих матеріалів на параметри зносостійкості в умовах абразивного середовища. *Problems of Tribology*. 2015. Том 77, 3. С. 105–112.

4. Дворук В. І., Борак К. В., Добранський С. С. Дослідження зносостійкості сталі 65Г з різними фізико-механічними властивостями при зношуванні в абразивній масі. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* 2016. 46. С. 213-223.

5. Шалько А. В., Чайковський Б. П., Ярошович І. Г. Вплив поверхневої наноструктури на контактну втому 65Г. *Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. С. З. Їжицького*. 2015. Том 17 № 1 (61) частина 4. С. 156–161.

6. Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Бобров М. М., Шкурат С. І., Лимар О. О. Формування термічної поліганізаційної субструктури з підвищеними властивостями в електродугових покриттях. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2019. 10 (1335). С. 3–10.

7. Карпеченко А. А., Бобров М. М. Вплив передрекристалізаційної термічної обробки на фізико-механічні властивості функціональних електродугових композиційних покриттів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* 2022. 2. С. 94–99.

8. Dubovoy O. M., Karpechenko A. A., Bobrov M. M., Gerasin O. S., Lymar O. O. Electric arc spraying of cermet coatings of steel 65G-TiC system / *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu,* 2021, № 2. pp. 63-68.

9. Казимиренко Ю. О., Лебедєва Н. Ю., Макруха Т. О. Застосування зольних мікросфер для формування композиційних покриттів на сталевій поверхні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2022. Том 33 (72). 3. С. 81-86.

10. Казимиренко Ю. О., Лебедєва Н. Ю., Макруха Т. О. Корозійна стійкість і теплозахисні властивості композиційних покриттів, наповнених зольними мікросферами. *Технічні науки та технології*. 2022. 1 (27). С. 38–44.

11. Дубовий О. М., Бобров М. М., Неделько Ю. Є., Чечель О. В. Вплив параметрів режиму напилення покриттів щодо отримання наномасштабної субструктури з підвищеною стабільністю / *Зб. наук. праць* НУК. Миколаїв: НУК, 2016. № 4. С. 35–40.

12. Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Бобров М. М., Жданов О. О., Макруха Т. О., Неделько Ю. Є. Формування нанорозмірної полігонізаційної субструктури та її вплив на фізикомеханічні властивості металів і сплавів та напилених покриттів / *Металлофизика и новейшие технологии.* 2017. Т. 39, № 2. С. 209–243.

13. Демченко В. О., Сімячко О. І., Свідерський В. А. Дослідження мінералогічного складу, структури і властивості поверхні зольних мікросфер України. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. 2017. 6. С. 28–34.

14. Kazymyrenko, Y. The Effective Mechanical Properties of Metal-Glass Materials. *The advanced science journal*. 2016. 1. P. 90–94.

15. Прокопчук Ю. О. та ін. Системи прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах: монографія. Дніпропетровськ-Павлоград: АРТ-Синтез-Т, 2014. Т. 1. 456 с.

Kazymyrenko Yu.O., Lebedeva N.Yu., Makrukha T.O. PERSPECTIVES OF APPLICATION OF COATINGS OF 1066 (65Г) STEEL, FILLED WITH ALUMINOSILICATE MICROSPHERES, IN SHIP REPAIR TECHNOLOGIES

The present article is devoted to solving an important scientific and technical problem of ship repair related to the development of new wear-resistant coatings for the restoration and repair of ship mechanisms. Analysis of modern technologies showed the feasibility of using electric arc spraying with the addition of dispersed fillers to the arc zone. A composite coating made of continuously drawn wire made of 1066 (65Г) grade steel, which was applied to a substrate made of A284Gr.D (Cm3) grade steel, was chosen for the study. Unlike analogues that contain refractory ceramic powders, ash microspheres of aluminosilicate composition were added to the composition of studied coatings. Wear resistance and microhardness of coatings were experimentally investigated, for which mechanical testing methods were applied according to standard methods. The obtained results were compared with results of studies of coatings without filler.

The results of the tests showed that the wear resistance of coatings, filled with microspheres, is about 25% higher than that of coatings without filler, which is explained by the peculiarities of the structure of the coatings and is confirmed by an increase in the microhardness of the steel matrix by about 17%. Coatings of 1066 steel – ASHM (aluminosilicate hollow microspheres) composition have a porous polydisperse structure with evenly spaced spherical inclusions with a diameter of 200...400 μm, around which microstresses are formed in the steel matrix. The addition of aluminosilicate microspheres will contribute to an increase in the volumetric quantity of pores by approximately 10%, which will be filled with lubricant during friction under lubrication conditions.

Using the methods of system analysis, namely SWOT analysis, the advantages and disadvantages of using composite coatings from 1066 steel filled with aluminosilicate microspheres in modern ship repair technologies are determined. Research results can be applied in the restoration of worn parts and equipment, in particular, ship pumps. Further perspectives of the authors' work are related to the development of certain technological processes of coating as well as of practical recommendations for the operation of parts.

Key words: *ship parts, mechanisms, wear resistance, composite coatings, ash microspheres.*

Подяка. Автори висловлюють вдячність Збройним Силам України та всім захисникам України за їх мужність та силу, завдяки яким є можливість жити та працювати під мирним небом, навіть у лихоліття війни.

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.3.072–027.236:631.51
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/03

Кравченко В.В.
Уманський національний університет садівництва

Петриченко Є.А.
Уманський національний університет садівництва

Кутковецька Т.О.
Уманський національний університет садівництва

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ГАЗОДИЗЕЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАСОБІВ У СУЧАСНОМУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ ВИРОБНИЦТВІ

В статті проведені теоретичні дослідження щодо перспектив розвитку газодизельних енергетичних засобів у сільськогосподарському виробництві та їх основних параметрів роботи. В результаті виконаних досліджень нами було визначено, що пошук альтернативних, нафтовому паливу, джерел енергії приводить до використання на автомобілях і тракторах дешевого природного газу та переобладнання їх на газобалонні установки. Характерною відмінністю між тракторами, що працюють на дизельному і на газодизельному паливі, є звичайно ж наявність балонів з компримованим природним газом. Першою проблемою, яку доводиться вирішувати при переобладнанні трактора в газодизельний трактор, є проблема компонування, а саме розміщення балонів. В результаті досліджень визначено, що важливим елементом модернізації паливної системи є механізм установки запальної дози, який вмонтовується на газодизельний трактор замість кришки регулятора паливного насоса високого тиску. Такий механізм призначений для обмеження подачі дизельного палива на рівні запальної дози при роботі в газодизельному режимі. При переобладнанні газодизельних енергетичних засобів важливо враховувати, як розміщена газобалонна установка на тракторі, тому що від цього залежить можливість агрегатування трактора з необхідним набором знарядь, що виступає основним обмежуючим чинником у виборі компоновки сільськогосподарського трактора. Для забезпечення сталої роботи тракторного дизеля по газодизельному процесу при взаємній конвертації однією з головних умов є забезпечення роботи газодизеля по всережимних характеристиках. Другою необхідною умовою є можливість швидкого переходу роботи дизеля з одного виду палива на інший і навпаки. Виходячи з цих умов система регулювання газодизеля повинна базуватися на існуючій штатній паливній апаратурі з відповідною модернізацією для регулювання газодизеля.

Ключові слова: *газодизель, енергетичні засоби, альтернативне паливо, трактори, сільськогосподарське виробництво.*

Постановка проблеми. На сьогодні розвиток транспорту та удосконалення його роботи існує в тісному зв'язку з розвитком загального виробництва й виробничих зусиль країни, а також з умовами життя людей, а саме зростом їх матеріальних благ. Чим вищий рівень розвитку суспільства, тим більше і глибше проникає транспорт у всі сфери діяльності людини.

Проблема економії нафтового палива в сільськогосподарському виробництві вирішується оптимізацією режимів роботи машин, поліпшенням економічності енергетичних засобів (у сільському господарстві, це в основному трактори і автомобілі) шляхом удосконалення їх систем й механізмів, застосуванням нетрадиційних моторних палив [6, с. 27; 10].

Пошук альтернативних, нафтовому паливу, джерел енергії приводить до використання на автомобілях і тракторах дешевого природного газу, при застосовуванні якого виникають нові проблеми, пов'язані з нижчою енергощільністю газобалонних установок: доводиться миритися

з ускладненням і подорожчанням машин, двигуни яких переобладнуються (конвертуються) для роботи на газоподібному паливі, в деяких випадках суттєво змінювати будову машини. Впровадження газодизельних енергетичних засобів у сільське господарство потребує вирішення ряду специфічних проблем, пов'язаних з заправкою, технічним обслуговуванням, негативним впливом трактора підвищеної ваги на грунт та додержанням агротехнічних вимог.

Аналізостанніхдосліджень іпублікацій. Вирішенню питань, що пов'язані з переобладнанням газодизельних енергетичних засобів присвячені роботи В.І. Захарчука [6, с. 28], О.В. Захарчука [7, с. 53], О.С. Бабича [1, с. 131], П.М. Кухаренка [1, с. 130], В.О. Улексіна [1, с. 133] та ін. На сьогодні, існує ряд питань, які стосуються роботи газодизельних енергетичних засобів в сільському господарстві. Тому, дана проблема є актуальною та потребує подальших досліджень.

Постановка завдання полягає в проведенні теоретичного дослідження щодо перспектив розвитку газодизельних енергетичних засобів та їх використання у сільськогосподарському виробництві.

Виклад основного матеріалу. В сучасних складних умовах господарювання, все більшого значення набуває застосовування на автомобілях і тракторах природного газу, запасів якого більше, а вартість нижча. У сільському господарстві значному парку машин з дизельними двигунами, слід також визнати актуальними роботи, що будуть спрямовані на пристосування існуючих автотракторних дизелів для роботи на природному газі та на вирішення проблем, пов'язаних із застосуванням газодизельних енергетичних засобів [3, с. 34].

Характерною відмінністю між тракторами, що працюють на дизельному і на газодизельному паливі, є звичайно ж наявність балонів з компримованим природним газом. Першою проблемою, яку доводиться вирішувати при переобладнанні трактора в газодизельний трактор, є проблема компонування, а саме розміщення балонів. Значні габарити і маса газобалонної установки впливають на показники оглядовості й можливості агрегатування трактора з набором знарядь, на розташування центру мас трактора та його стійкість, на величину і розподіл тиску на грунт, а потім ще такі показники як: тяговий ККД, ущільнення грунту, врожайність сільськогосподарських культур.

Важливим елементом модернізації паливної системи є механізм установки запальної дози [4, с. 23], який вмонтовується на газодизельний трактор замість кришки регулятора паливного насоса високого тиску. Такий механізм призначений для обмеження подачі дизельного палива на рівні запальної дози при роботі в газодизельному режимі. Вдосконалюється також система захисту і управління режимами роботи двигуна.

Газодизельна модель трактора, як зрозуміло з назви, заправляється як дизельним, так і газовим паливом. Для нових тракторів співвідношення витрати палива складає приблизно 20% (дизпаливо) на 80% (газ); для б/у – 30% на 70% відповідно. Правила експлуатації новинки практично не відрізняються від правил експлуатації попередника: трактор заводиться в звичайному режимі, а потім за допомогою спеціального тумблера здійснюється перехід в газодизельний режим роботи.

Із проведеного огляду літературних джерел по газобалонних установках можемо сказати, що досвід експлуатації газодизельних тракторів відсутній. Значний досвід експлуатації газобалонних установок накопичено в автомобільній галузі. При розробці системи регулювання потужності двигуна, виборі оптимальної запальної дози рідкого палива, при організації постачання та заправки газом, технічного обслуговування газобалонних машин, можуть бути враховані та використані й при створенні газодизельних тракторів. На даному етапі створено лише дослідні зразки тракторів, експлуатація яких не вийшла за межі випробувань. Основні параметри, які підлягали контролю при випробуваннях, тобто співвідношення між рідким та газоподібним паливом, витрата палива, паливна економічність, потужність у режимах «дизель» – «газодизель», токсичність відпрацьованих газів, складність чи простота переобладнання машини. Поза увагою залишаються важливі експлуатаційні показники газодизельних тракторів, такі, як: тягово-зчіпні властивості, стійкість, тяговий ККД, взаємодія трактора з грунтом та його вплив на грунт, можливість агрегатування з шлейфом сільськогосподарських машин, які залежать в основному від компоновки та визначають загальну економічну доцільність використання газодизельних енергетичних засобів [8, с. 64].

При переобладнанні газодизельних енергетичних засобів важливо враховувати, як розміщена газобалонна установка на тракторі, тому що від цього залежить можливість агрегатування трактора з необхідним набором знарядь, що виступає основним обмежуючим чинником у виборі компоновки сільськогосподарського трактора. Стійкість трактора оцінюється граничними кутами підйому,

поздовжнього та поперечного схилу. Для покращення статичної стійкості трактора необхідно намагатися розміщати газобалонну установку по можливості нижче, симетрично відносно поздовжньої осі трактора, ближче до осі задніх коліс, що повинно також покращити тягові якості за рахунок довантаження ведучих коліс [2, с. 22; 7, с. 52].

Як правило, газодизелі працюють одночасно на двох видах палива: газоподібному й рідкому. Для цього вони мають дві паливні системи: звичайні дизельні та газові. У циліндри газодизеля подається газоповітряна суміш, яка запалюється від запальної дози дизельного палива, що впорскується через штатну форсунку, як в звичайному дизелі, але газодизель може працювати як і дизель, на одному дизельному паливі [1, с. 132].

Для забезпечення роботи тракторного дизеля по газодизельному процесу при взаємній конвертації однією з головних умов є забезпечення роботи газодизеля по всережимних характеристиках. Другою необхідною умовою є можливість швидкого переходу роботи дизеля з одного виду палива на інший і навпаки. Виходячи з цих умов система регулювання газодизеля повинна базуватися на існуючій штатній паливній апаратурі з відповідною модернізацією для регулювання газодизеля [9, с. 38].

Вибір запальної дози суттєво впливає на масово-габаритні показники трактора, які повинні укладатися в норми агротехнічних вимог. Якщо прийняти, що 1 м^3 газу за енергетичною цінністю заміщає 1,1 л дизельного палива, а в стандартному балоні місткістю 50 л при максимальному тиску знаходиться 10 м^3 газу, то можна сказати, що заміщення кожних 11 л дизпалива вимагає установку одного стандартного балона. При використанні балонів з легованої сталі маса заправленого балона становить 70 кг, з вуглецевої сталі – 100 кг. Отже, заміщення 110 л дизпалива за одну заправку призводить до збільшення маси трактора на 700 кг при використанні балонів з легованої сталі і 1000 кг – для балонів з вуглецевої сталі. Обмеження маси газобалонної установки і запасу газоподібного палива примушує збільшувати частку рідкого палива або ж скорочувати час роботи між дозаправками, що знижує ефективність застосування газового трактора. У разі установки на тракторі недостатньої кількості балонів можлива експлуатація трактора на дизельному паливі, що в сумі значно збільшує час роботи між дозаправками [5, с. 30].

Також важливою умовою при переобладнанні газодизелів та їх експлуатації в польових умовах є врахування техніко-експлуатаційних показників машино-тракторних агрегатів. З проведених досліджень можна припустити, що сільськогосподарські машинно-тракторні агрегати з газодизельними енергетичними засобами можуть мати кращі техніко-експлуатаційні показники, ніж машинно-тракторні агрегати з звичайними дизельними двигунами. Але, для цього необхідна система регулювання паливоподачі, як рідкого, так і газоподібного палива, яка б забезпечила формування характеристики газодизеля у відповідності з характеристикою ДПП. Крім того, як зазначалося вище, необхідно вирішити проблеми, пов'язані з збільшенням габаритів та маси енергетичного засобу, що особливо актуально для сільськогосподарських тракторів [11, с. 26].

Проте, враховуючи ж економічні, технічні та екологічні переваги перед дизельною системою подачі палива, можна сказати, що система газодизельної подачі палива знаходить все більш широкого застосування не тільки в Україні, а й в інших країнах світу. З аналітичних даних обсяг споживання газового палива в автотранспортному секторі нашої країни збільшився приблизно в 9 разів, а обсяг газобалонних автомобілів, що використовують альтернативні види палива становить 2,25 млн. од..

Висновки. Таким чином, із вище зазначеного можна зробити висновки, що переобладнання газодизельних енергетичних засобів в сучасному виробництві є досить перспективним. Тому, що газодизельні трактори, поряд з дизельними мають ряд переваг, а саме дешевше паливо, що є економічно вигідно, особливо в складних економічних умовах. З точки зору екології відбувається менше шкідливих викидів в атмосферу. Серед технічних переваг, є твердження, що сільськогосподарські машинно-тракторні агрегати з газодизельними енергетичними засобами можуть мати кращі техніко-експлуатаційні показники, ніж машинно-тракторні агрегати із звичайними дизельними двигунами. Проте, не слід забувати, що існують й недоліки у таких тракторів, які потребують подальших наукових досліджень та розробок.

Список літератури:

1. Бабич О.С., Кухаренко П.М., Улексін В.О. Регулятор подачі газу в газодизель. *Вісник Харк. держ. тех. у-ту с/г.* Харків. Випуск 8. Том 1. 2001. С. 130-133.

2. Базаров Б.А. Стационарные установки с газодизельным приводом. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1999. № 11. С. 20–21.

3. Галышев Ю.В., Магидович Л.Е. Перспективы применения газовых топлив в ДВС. *Двигателестроение*. 2001. № 3. С. 31–35.

4. Горбунов В.В., Патриархальцев Н.Н., Гомес Х.Г., Карнехо Х.О. Газодизель с внутренним смесеобразованием: зависимость показателей от сжимаемости топлива. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2001. № 2. С. 22-24.

5. Долганов К.Е., Кухтик В.В. Корректирование внешней скоростной характеристики автотракторного газодизеля. *Двигатели внутреннего сгорания. Межрегиональный научно-техн. сб.* Харьков. 1997. Вып. 56-57. С. 28-38.

6. Захарчук В.І. Застосування альтернативних палив в автотракторних дизелях. *Енергозбереження*. 2010. № 2. С. 27-28.

7. Захарчук О.В. Теоретичні дослідження показників колісного трактора з газовим двигуном. *Сільськогосподарські машини*. 2012. Вип. 23. С. 51-55.

8. Клементьев А., Федоров В. Альтернативные виды топлива: проблема выбора в ближайшей перспективе. *АГЗК+АТ*. 2006. № 3. С. 63-65.

9. Колесник Ю.И., Долганов К.Е., Лисовая А.А. Система питания и регулирования для переоборудования дизелей в газодизели. *Двигателестроение.* 1999. № 1. С. 37-40.

10. Метан – як моторне пальне. Переваги і недоліки. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.oilgasexpo.com/ru/uploads/2016.pdf

11. Основенко Н.Е., Сиянко Ю.В., Попов А.Е., Глеза А.Е. Газобалонный трактор. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1992. № 10. С. 25-27.

Kravchenko V.V., Petrychenko Ye.A., Kutkovetska T.O. PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF GAS-DIESEL ENERGY MEANS IN MODERN AGRICULTURAL PRODUCTION

The article contains theoretical research on the prospects for the development of gas-diesel power tools in agricultural production and their main operating parameters. As a result of our research, we determined that the search for alternative energy sources to oil fuel leads to the use of cheap natural gas in cars and tractors and their conversion to gas cylinder installations. A characteristic difference between tractors running on diesel and gas-diesel fuel is, of course, the presence of cylinders with compressed natural gas. The first problem that has to be solved when converting a tractor into a gas-diesel tractor is the layout problem, namely the placement of cylinders. As a result of the research, it was determined that an important element of the modernization of the fuel system is the ignition dose setting mechanism, which is mounted on a gas-diesel tractor instead of the high-pressure fuel pump regulator cover. This mechanism is designed to limit the supply of diesel fuel at the level of the ignition dose when operating in gas-diesel mode. When converting gas-diesel energy vehicles, it is important to consider how the gas cylinder installation is placed on the tractor, because it depends on the possibility of aggregating the tractor with the necessary set of tools, which is the main limiting factor in choosing the layout of the agricultural tractor. To ensure the stable operation of a tractor diesel by the gas-diesel process during mutual conversion, one of the main conditions is to ensure the operation of the gas-diesel according to all-mode characteristics. The second necessary condition is the ability to quickly switch the operation of a diesel engine from one type of fuel to another and vice versa. Based on these conditions, the gas-diesel regulation system should be based on the existing standard fuel equipment with appropriate modernization for gas-diesel regulation.

Key words: *gas diesel, energy means, alternative fuel, tractors, agricultural production.*

УДК 621.793
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/04

Лузан С.О.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ситников П.А.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

САМОПОШИРЮВАНИЙ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ СИНТЕЗ: СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Роботу присвячено одній з актуальних проблем галузевого машинобудування – підвищенню ресурсу деталей сільськогосподарської та ґрунтообробної техніки за рахунок нанесення зміцнюючих та відновлювальних покриттів на основі композиційних матеріалів. У якості перспективного методу отримання композиційних матеріалів запропоновано використання – самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС), одного з високотехнологічних, наукоємних, енерго- та ресурсозберігаючих методів. Висвітлено історичні передумови та внесок О. Г. Мержанова, І. П. Боровінської та В. М. Шкиро у відкриття нового фізичного явища «твердого полум'я», що стало основою до появи СВС, ретроспективно наведені основні етапи його формування та розвитку. На основі огляду вітчизняних наукових робіт та розробок з використанням СВС-технології висвітлено створення трибологічних матеріалів типу TiFe-xC, проаналізовано та порівняно результати з розробки пористих (фільтраційних) металокерамічних матеріалів з використанням відходів машинобудування, представлено результати математичних розрахунків СВС-реактору та деяких реакцій синтезу, окреслено можливості суміщення СВС з технологіями нанесення покриттів. Авторами статті наведено власні наукові результати щодо розробки композиційного матеріалу, отриманого з використанням самопоширюваного високотемпературного синтезу та попередньої механічної активації вихідних реагентів, що містять у якості зносостійких дисперсних фаз оксиди SiO_2 та AI_2O_3. На основі проведених досліджень підтверджено перспективність використання розробленого композиційного матеріалу зі структурою «зміцнююча фаза – матриця» {10 % (Ti–C–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3–Al– ПТ-НА-01) + 90 % (ПГ-10Н-01)} для дугового наплавлення зміцнюючих та відновлювальних покриттів деталей машин. В кінці роботи сформульовано загальні висновки та наведено перелік подальших перспективних досліджень за цим напрямом.

Ключові слова: *самопоширюваний високотемпературний синтез, композиційний матеріал, технологія, зносостійкість, ресурс.*

Постановка проблематики. Розробка матеріалів з новими властивостями, як і раніше, визначає рівень сучасної науки і техніки. В теперішній час композиційні матеріали[1] (КМ) знаходять все більше поширення в різноманітних галузях. Створення КМ, що мають комплекс нових (порівняно з металами та сплавами) властивостей, дозволяє вирішити найважливіші технічні завдання, особливо в галузях машинобудівного, військово-промислового комплексів, ракето- та авіабудування [1, 2].

Перспективним способом отримання нових матеріалів, в тому числі і композиційних, є самопоширюваний високотемпературний синтез (СВС), суть якого полягає у локальному ініціюванні екзотермічних реакцій між вихідними реагентами, що дозволяє генерувати значну кількість тепла для поширення фронту фізико-хімічних перетворень, утворюючи продукти синтезу. Розвиток СВС-технологій обумовлює докорінні зміни у традиційному виробництві порошкових та композиційних матеріалів, підвищує продуктивність праці, відкриває перспективні шляхи до створення об'єктів нової техніки, призначеної для використання у різних умовах експлуатації [3].

Починаючи з 70-х років XX ст. вітчизняними та закордонними вченими створено понад 500 видів синтезованих з'єднань, отримано чисельні тугоплавкі сполуки різного хімічного та фазового складу. Ці матеріали мають властивості, які не можливо, або досить важко отримати при традиційних технологіях металургійного виробництва матеріалів.

Основні переваги СВС-технологій перед традиційними технологіями металургійного

[1] Композиційні матеріали (КМ) – це гетерофазні матеріали, окремі фази яких виконують спеціальні задані функції. КМ вдається поєднувати в собі властивості кожного вихідного компоненту, оскільки його властивості формуються за рахунок додавання компонентів (адитивність), або за рахунок їх спільного посилення (синергізм) [1].

виробництва полягають у мінімальних втратах матеріалів під час процесу синтезу, спрощені та скороченні кількості технологічних операцій, що можуть бути сконцентровані у межах одного підприємства, чисельному зменшенні парку верстатного обладнання, а також економії електроенергії.

Постановка завдання. Аналіз вітчизняних наукових і прикладних досліджень у галузі самопоширюваного високотемпературного синтезу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нагадаємо досить коротко деякі відомості щодо відкриття СВС, потрібні для подальшого викладення основного матеріалу. В середині 50-х років XX ст., згідно рішення Ради Міністрів СРСР, при Інституті хімічної фізики АН СРСР (ІХФ АН СРСР), недалеко від с. Черноголовка (Московська обл.) було організовано науково-дослідний полігон, перед яким поставлено задачу зі створення потужної експериментальної бази для розвитку робіт з вивчення фізико-хімічних та вибухових властивостей матеріалів. Загальне керівництво колективом полігону в той період особисто здійснював тогочасний директор Інституту лауреат Нобелевської премії з хімії М. М. Семенов. Доволі швидко, головним чином враховуючи ефективні результати роботи над проблемами твердих ракетних палив, полігон, за рішенням М. М. Семенова, було трансформовано у відокремлений філіал ІХФ АН СРСР [4, 5].

Розширивши перелік наукових напрямів, у новоствореному філіалі для вирішення теоретичних та практичних задач спалаху та переходу горіння у детонацію було відкрито однойменну лабораторію, яку очолив молодий вчений-дослідник О. Г. Мержанов, один з талановитих представників наукової школи М. М. Семенова. Одним з головних наукових напрямів лабораторії, а відповідно і її керівника, стало дослідження механізмів горіння балістичного пороху. В той час, незважаючи на значну кількість наукових розробок за цим напрямом, залишалося остаточно не вирішеним питання щодо того, яка з трьох зон тепловиділення порохової суміші (конденсована, димно-газова, газова) була головною. Ця проблема потребувала нагального вирішення. Спираючись на попередній практичний досвід з порохової тематики, О. Г. Мержанов вирішує розробити та дослідити «безгазові» моделі горіння пороху.

Найпростіші класичні реакції горіння пороху передбачають хімічні реакції розкладу, при яких, як правило, з однієї складної речовини утворюються дві або декілька інших речовин. Враховуючи це, О. Г. Мержанов вирішує використати в якості вихідного реагенту ацетиленід міді Cu_2C_2, здатний до вибухоподібного розкладання хімічної системи на тверду мідь (Cu) та вуглець (C) зі значним утворенням теплоти. Однак, навіть при умові абсолютно просушеного реагенту Cu_2C_2 досить важко отримати цілком безгазовий процес. При проведенні цих дослідів відбувся вибух, що призвело до відмови від подальших досліджень цього реагенту. Тоді вчений приймає рішення спробувати замінити класичну реакцію розкладу на не класичну реакцію синтезу. У 1967 р. спільно з І. П. Боровінською та В. М. Шкиро він синтезує експериментальну модель на основі порошків титану (Ti) та бору (B). Синтез Ti – B відбувся доволі стабільно з поширенням тепла від одного шару до іншого, змінивши колір від яскраво жовтого до червоного. При цьому був відсутній процес утворення газоподібних продуктів, а сам зразок не втратив ані форми, ані розмірів, перетворившись у твердий, як «алмаз», спік. Майже одразу нове фізичне явище за рішенням його розробників отримало свою назву – «тверде полум'я».

На початку 70-х років на основі «твердого полум'я» було синтезовано системи типів Me – C, Me – Si, Me – N_2 та отримано чисельні тугоплавкі з'єднання різних типів (бориди, оксиди, нітриди та ін.), на основі чого запропоновано нові напрями досліджень конденсованих систем. В цей час був накопичений значний обсяг теоретичних і експериментальних відомостей щодо режимів нестійкого горіння, методології отримання з'єднань з вибором оптимальних умов процесу. Ці результати дали поштовх до розвитку принципово нового напряму створення матеріалів – самопоширюваного високотемпературного синтезу (офіційна назва з 1972 р.). Зазначимо, що фізичне явище «тверде полум'я» є первинною стадією СВС, за якою протікають вторинні (об'ємні) процеси, зокрема, догорання, фазо- та структуроутворення.

Враховуючи велику наукову та практичну актуальність проблематики СВС, вже з середини 70-х років відбулося створення нових цілеспрямованих дослідницьких груп у Єревані, Томську та Києві. У 1975 р. в місті Кіровакан (Вірменська РСР) було відкрито перше спеціалізоване підприємство з використанням СВС-продуктів для виробництва високотемпературних нагрівачів на основі дисиліциду молібдену.

Важливим етапом в утвердженні СВС як нового наукового напряму стала опублікована у 1982 р. стаття Джона Крайдера «Самопоширюваний високотемпературний синтез – радянський метод отримання матеріалів», яка сприяла форму-

ванню дослідницьких груп з цієї проблематики в країнах Американського континенту (США, Канада), Європи (Німеччина, Франція, Велика Британія, Польща, Італія, Іспанія) та Сходу (Японія та Китай). Нині, на основі аналізу наукових публікацій (Web of Science) можна відзначити, що дослідженнями в галузі СВС–процесів займаються вчені з 117 країн світу [6].

Виклад основного матеріалу дослідження. Залишаючи для окремого розгляду дослідження СВС результатів закордонних колег, звернемося до вітчизняних наукових напрацювань та розробок. Зрозуміло, що у контексті короткої оглядової статті не можливо охопити всі наукові доробки та отримані результати. Тому розглянемо лише ті, які є найбільш інформативними та поширеними.

Структурно-операційна схема СВС-технології базується на трьох основних операціях: підготовка вихідної шихти, безпосередньо СВС-реакція, обробка та дослідження отриманого продукту. Враховуючи це, спробуємо навести результати робіт [7 – 17] за структурно-операційними схемами.

Наукові дослідження структури та трибологічних характеристик матеріалів типу TiFe-xC, отриманих за допомогою СВС, розглянуто в роботі [7]. В якості вихідних реагентів використано чисті (≥ 99,5 % мас) порошки титану Ti, заліза Fe, вуглецю C та бору B. Підготовленні для реакції матеріали попередньо очищували розчином ацетону для видалення з їх поверхонь інших хімічних сполук та підвищення адгезії. При формуванні дослідних вихідних сумішей системи TiFe-xC здійснено варіювання кількості вуглецю, яке складало 0; 10; 20; 30 та 40 % мас. Також, для суміші 55Ti–20C–30Fe–nB здійснено варіювання вмісту бору, що складав від 0,31 до 0,50 % мас.

Змішування та механічну активацію вихідних компонентів було проведено у кульовому млині, об'ємом 2 $дм^3$ впродовж 8 хв., після чого отриману шихту спресовано під тиском у 150 МПа та завантажено до спеціалізованого реактору, де проведено СВС-процес.

За результатами металографічних досліджень встановлено, що матричною фазою для всіх дослідних зразків системи TiFe–10C, TiFe–20C та 55Ti–20C–30Fe–0,31B є феритна структура на основі заліза з включеннями інтерметалідів типу Ti_2Fe та TiFe. Додавання вуглецю впливає на структуру інтерметаліду TiFe. Так, при його збільшенні зростає кількість карбіду титану TiC та знижується вміст кисню O_2.

Додавання бору до системи TiFe-xC зменшує температуру спікання шихти за рахунок утворення легкоплавкої евтектики, а утворений борний ангідрид B_3O_3, що вступає в реакцію з оксидами заліза та титану, утворює борати титану $TiO_2B_2O_3$ та борати заліза FeB_2O_3.

Показники мікротвердості та зносотривкості отриманих зразків залежать від вмісту вуглецю та бору. Так, в суміші 45Ti–10C–45Fe, зі збільшенням бору від 0,31 до 0,50 % мас. мікротвердість зростає від HV 850 до 855. Для матеріалу з вмістом вуглецю 40 % мас. з таким збільшенням бору, цей показник складає від HV 775 до 788. Для системи TiFe-xC з підвищенням вмістом вуглецю від 0 до 40 % мас. мікротвердість зразку знижується від HV 870 до 800, що пояснюється появою значної кількості аустеніту. Таке зниження мікротвердості відповідно впливає на зменшення у 1,1 рази абразивної зносостійкості. Аналогічні дослідження виконано і для системи TiFe-xC-B, в якій зі збільшенням бору від 0,31 до 0,50 % мас. зношування зразка зростає, а показник зносостійкості зменшується. В роботі також встановлено їх оптимальне співвідношення у вихідній суміші.

Розроблені трибологічні матеріали TiFe-20C та TiFe-20C-0,31B, отримані з використанням СВС, призначені для роботи в умовах абразивного та сухого тертя. Вони рекомендовані для захисту поверхонь стулок сопел реактивних двигунів, що працюють в умовах високих температур та навантажень.

Оригінальні наукові результати зі створення металокерамічних пористих матеріалів з використанням відходів машинобудування наведено в роботі [8]. Вихідними матеріалами суміші є окалина сталі 18Х2Н4МА, порошок оксиду алюмінію Al_2O_3 (ТУ 48-5-22-87), природний матеріал – сапоніт Ташківського родовища та 6 видів пороутворювачів. Оптимальний склад компонентів шихти складав: сапоніт 30 %, Al_2O_3 30 %, окалина 30 %, пороутворювач 10 %. В якості пороутворювачів використовували: карбамід (CH_4N_2O), поліетиленгліколь ($C_2nH_4n+2On+1$), карбонат кальцію (C_nCO_2), гідрокарбонат натрію ($NaHCO_3$), карболіт ($CO(NH_2)_2$) та хлорид натрію (NaCI).

Процес змішування вихідних реагентів здійснювали у кульовому млині з набором сталевих куль діаметром 20 мм, протягом 2 годин. Після цього отриману суміш змішували з клеєм КМЦ-Н (ТУ 6-15-1077-92) та пресували під тиском 25 МПа. Отриманий зразок мав форму циліндру ø 30 мм, висотою 40 мм. СВС-реакцію здійснювали у реакторі, розробленому науковцями Луцького національного технічного університету [9].

Отримані синтезовані зразки, не залежно від виду пороутворювача, мали високу твердість, тріщиностійкість та міцність. Площа пористості зразку, визначена за мікрофотографіями шліфів за допомогою програми Smart-eye, становила 15–20 %. Основною фазою матеріалу були оксид заліза (Fe_2O_3) та оксид алюмінію (Al_2O_3). На основі аналізу одержаних структур було встановлено, що найбільш прийнятими пороутворювачами є карбамід та гідрокарбонат натрію. Отриманні зразки мали достатню міцність, пористість та фільтраційні властивості, що дозволяло рекомендувати їх у якості пористих (фільтраційних) матеріалів.

Відомі дослідження щодо використання СВС у технологіях легування хромоалітовиних захисних покриттів (ХЗП) наведені в роботі [10], де легування здійснено бором, кремнієм та титаном. При дослідженні отриманої мікроструктури багатокомпонентного хромоалітованого захисного покриття, легованого кремнієм Si, встановлено роль алюмінію у вихідній суміші до СВС-процесу. Автори роботи зазначають, що при вмісті алюмінію 7 % мас. покриття є пористим та при витримці протягом 1 год. за температури 1000 °С складає від 40 до 45 мкм, товщина та компактність покриття зростає зі збільшенням вмісту алюмінію від 11 до 15 % і досягає максимального значення у 80 мкм при вмісті 15 % мас. Основними фазами покриття, легованого кремнієм, є $(Fe_2Cr)_{23}C_6$, $(FeCr)_7C_3$, Fe_3Al, $(FeCr)_3Si$. В роботі наведено дослідження ХЗП, леговані титаном ($(Fe_2Cr)_{23}C6$, $(FeCr)_7C_3$, Fe_3Al, Cr_2Ti) та леговані бором ($(Fe_2Cr)_{23}C_6$, $(FeCr)_7C_3$, Fe_3Al, $(Fe,Cr,Al)_2B$).

На основі проведених досліджень розроблені нові леговані хромоалітовані захисні покриття і склад шихт для СВС-реакцій, застосування яких рекомендовано для підвищення міжремонтних ресурсів деталей.

Заслуговує на увагу робота [11], в якій виконано математичний розрахунок кількості теплоти для здійснення СВС-процесу в реакторі. При використанні математичних описів СВС-реакторів можливо вирішення двох головних задач: по-перше, в залежності від заданої конструкції та параметрів вихідного потоку визначити параметри процесу та характеристики теплового потоку, по-друге, в залежності від параметрів вхідного та вихідного потоків підібрати конструкцію установки та безпосередньо параметри самого СВС-процесу.

Математичне моделювання СВС-процесів гетерогенних порошкових сумішах розглянуто в роботі [12]. Авторами розроблено математичну модель та наведено результати числового дослідження поширення фронту горіння СВС-складу, коли швидкість хімічного реагування в кожній точці по довжині СВС-зразку визначається з вирішення задачі дифузії та хімічного реагування в реакційних скринях. На основі результатів досліджень отримано залежності швидкості фронту горіння від розміру середнього елементу гетерогенної структури при різних значеннях інтенсивності дифузії.

В останні роки з'явився ряд робіт, спрямованих на одночасне суміщення СВС з різноманітними технологіями нанесення покриттів. Так, авторами роботи [13] виконано аналіз відомих напрацювань з цього напряму та визначено, що одним з перспективних до подальшого опрацювання є метод суміщення СВС-реакції з електродуговим методом нанесення покриттів.

Поєднання технології поверхневого зміцнення матеріалу лазерною обробкою та СВС розглянуто в роботах [14, 15]. У якості вихідних реагентів використано суміш порошків титану Ti (68 %), вуглецю С (18 %) у вигляді сажі та заліза Fe (14 %). Дійсну суміш було розведено 2 % розчином латексу в бензині та нанесено на дослідні зразки зі сталі 10 та 20, після чого підсушено на повітрі. Утворені шари покриттів складали 80, 200 та 500 мкм. Підпал зразків здійснювали променем CO_2-лазера безперервної дії з поздовжньою накачкою типу «Кардамон». Основні показники режиму складали: потужність 850 Вт, густина 15 – 20 Вт·м^2, діаметри плями 0,3 – 1,0 мм. Швидкість сканування змінювали у межах від 10 до 20 мм·с$^{-1}$.

Згідно з результатами досліджень зміцненого шару встановлено його товщину (500 мкм) та фазовий склад (~50 % TiC та 50 % металевої зв'язки зі сталі типу У8). Заміна у вихідній суміші залізного порошку вуглецевим ферохромом (12 % Fe + 2 % FeCr замість 14 % Fe) дозволяє змінити матеріал зв'язки зі сталі У8 на сталь У12, яка має аустенітно-мартенситно-карбідну структуру. Твердість такої карбідо-сталі досягає HV 1400.

Запропонований спосіб суміщення СВС та лазеру дозволяє виконувати процес відновлювання зношених поверхонь деталей машин до 0,5 мм.

Важливо відміти, що зазначений напрям суміщення СВС з технологіями отримання покриттів, не зважаючи на вагомий комплекс робіт, потребує подальших досліджень. Це пояснюється тим, що при класичній СВС-реакції (при ідеальних умовах) відбувається повне перетворення (синтез) вихідних реагентів, які володіють більш кращими хімічними, фізичними, а відповідно і механічними властивостями.

Поглибленні наукові дослідження щодо розробки композиційного матеріалу на основі сплаву системи Ni-Cr-B-Si, модифікованого боридами титану та нікелю, наведено в роботах [16, 17]. Відомо, що сполуки металів з бором (бориди), мають високу твердість в поєднанні з пластичними властивостями, що може рекомендувати цей елемент у якості мікролегуючого. Вихідними реагентами для отримання композиційного матеріалу були порошки титану Ti марки ВТ1-0, бору B, вуглецю C (ПМ-15), з метою підсилення реакції в механічну суміш було додано термореагуючий порошок алюмінію нікелю ПТ-НА-01, алюміній Al у вигляді пудри та оксид заліза Fe_2O_3.

Вихідні компоненти змішувалися, після чого відбувалося їх механічна активація у кульовому млині АГО-2. Час механічної активації складав від 2 до 6 хв. Після механічної активації отриману суміш змішували з клеєм «Метинал», формували циліндричний зразок та здійснювали його просушування. Ініціювання СВС-реакції виконували за допомогою дугового розряду. Отриманий спік подрібнювали до порошкового стану та додавали до самофлюсованого сплаву ПГ-10Н-01, після чого виконували його повторну механічну активацію. Для отримання пастоподібної маси до композиційного матеріалу додавали рідке скло. Отриману пасту наносили на деталь зі сталі 20, після чого здійснювали процес дугового наплавлення.

В результаті проведених досліджень було встановлено, що основою композиційного покриття є матричний матеріал ПГ-10Н-01, в якому рівномірно розподілені тверді включення диборида титану, бориду нікелю, оксиду титану та заліза. Мікротвердість наплавлених покриттів, що містять 10 % модифікованого композиційного матеріалу, перевищує мікротвердість наплавленого ПГ-10Н-01 (HV 520) і становить HV 740. Розроблений композиційний матеріал рекомендовано для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин.

Авторами цієї статті було розроблено композиційний матеріал зі структурою «зміцнююча фаза – матриця» для підвищення зносостійкості деталей, що працюють в умовах абразивного зношування. Для синтезу модифікованого матеріалу були використані порошки Ti, C, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, Al, ПТ-НА-01, попередньо підібрані за стехіометричним співвідношенням. Компоненти SiO_2 та Al_2O_3 до вихідної суміші було додано у вигляді бентонітової глини (ГОСТ 28177-89), з відповідним розподілом 58,8 % та 17,6 % мас. Після змішування вихідних реагентів було здійснено їх диспергування (механічну активацію), таблетування (сформовано циліндричний зразок) та сушіння, після чого ініційовано СВС-реакцію. Отриманий спік (матеріал зміцнюючої фази) було подрібнено до порошкоподібного стану та додано у кількості від 10 до 30 % до матеріалу матриці. В якості матеріалу матриці використовували самофлюсований сплав ПГ-10Н-01. Після проведення повторної механічної активації КМ {10 % (Ti–C–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3–Al–ПТ-НА-01) + 90 % (ПГ-10Н-01)} змішували з рідким натрієвим склом для отримання пастопобіної маси. Отриману масу перед процесом наплавлення наносили шаром 3 – 4 мм на поверхню дослідного зразка зі сталі 45. Наплавлення здійснювали графітовим електродом діаметром 6,5 мм, при Ізв = 110 А на прямій полярності. В якості джерела живлення використовували зварювальний інвертор постійного струму СВ-290 НК.

За результатами випробувань на абразивне зношування в умовах тертя зі закріпленими абразивними частинками (ГОСТ 17367-71) встановлено, що зносостійкість наплавленого покриття КМ {10 % (Ti–C–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3–Al–ПТ-НА-01) + 90 % (ПГ-10Н-01)} у 1,8 рази є вищою порівняно з покриттям самофлюсованим сплавом ПГ-10Н-01.

На основі проведених досліджень підтверджено перспективність використання розробленого композиційного матеріалу КМ {10 % (Ti–C–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3–Al–ПТ-НА-01) + 90 % (ПГ-10Н-01)} для дугового наплавлення зміцнюючих та відновлювальних покриттів деталей машин.

Висновки. Наведений в роботі аналіз наукових результатів, виконаний на основі огляду напрацювань вітчизняних вчених свідчить про те, що самопоширюваний високотемпературний синтез, як окремий науковий напрям постійно поповнюється суттєвими досягненнями, які дозволять розробити принципово нові матеріали і розширити області їх практичного використання. Серед цих досягнень необхідно зазначити синтез понад 500 видів з'єднань та отримані чисельні сполуки різного хімічного і фазового складу (карбіди, нітриди, бориди, інтерметаліди та ін.); створення на їх основі матеріалів різноманітного функціонального призначення (конструкційні, функціональні та композиційні), апробацію та використання розроблених СВС-матеріалів у машинобудуванні, металургії, електроніці та ін.

Поряд з цим перспективними науковими напрямами до подальшого розвитку СВС-процесів є:

– розробка та удосконалення конструктивних механізмів діагностики і математичного моделювання СВС-процесів з побудовою їх фізико-хімічних моделей, зокрема розгляду динаміки процесів фазо- та структуроутворення;

– розширення номенклатури реагентів до ініціювання СВС-реакцій, з використанням різних типів мінеральної сировини (глини, піщаних матеріалів), твердих промислових та радіоактивних відходів (плавильні шлаки, металева стружка) та інших матеріалів у якості вихідних;

– отримання багатокомпонентних композиційних керамічних та металокерамічних матеріалів, в тому числі матеріалів з диференційними складами та властивостями в об'ємі;

– подальше освоєння нових сфер використання СВС-матеріалів у машинобудівному та військово-промисловому комплексах, космічному та авіаційному матеріалознавстві та піротехніці.

Список літератури:

1. Наука про матеріали: Досягнення та перспективи / редкол.: Л. М. Лобанов (голова) та ін. Київ : НАН України, Академперіодика, 2018. Т. 1. 652 с.
2. Физико-технические проблемы современного материаловедения / редкол: И. К. Походня (предс.) и др. Киев: НАН Украины, Академпериодика, 2013. Т. 1. 538 с.
3. Концепция развития СВС как области научно-технического прогресса. / редкол: А. Г. Мержанов (предс.) и др. Черноголовка: «Территория», 2003. 368 с.
4. Kharatyan, S. L., Merzhanov, A. G. Coupled SHS Reactions as a Useful Tool for Synthesis of Materials: An Overview. *International Journal of SHS.* 2012. Vol. 21, P. 59–73.
5. Merzhanov, A. G., Borovinskaya, I. P. Historical retrospective of SHS: An autoreview. *International Journal of SHS.* 2008. Vol. 4, P. 242–265.
6. Боровинская И. П. Академик Александр Григорьевич Мержанов: от научного открытия к промышленному производству. *Горение и взрыв.* 2018. № 4. С. 130–146.
7. Онищук О. О., Рудь В. Д. Структури та трибологічні характеристики трибологічних матеріалів TiFe-xC, отриманих самопоширюваним високотемпературним синтезом. *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 2013. № 3. С. 123–128.
8. Повстяна Ю. С., Савюк І. В., Самчук Л. М., Зубовецька Н. Т. Одержання поритих металокерамічних матеріалів із використанням відходів машинобудування в режимі самопоширюваного високотемпературного синтезу. *Журнал інженерних наук.* 2016. № 3. С. 6–12.
9. Реактор для проведення самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС-процесу): пат. 91287 Україна: UaB22F 3/23 C01G 1/00.; заявл. 11.02.14; опубл. 25.06.14, Бюл. № 12. 5 с.
10. Белоконь Ю. О., Кулинич В. Д., Драгобецький В. В., Середа Д. Б. Перспективи розвитку технологій та обладнання саморозповсюджувального високотемпературного синтезу. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського.* Кременчук, 2021. № 6. (131) С. 110–115.
11. Самчук Л. М. Розрахунок теплового балансу для СВС-реактору. *Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій та управління. Серія Нові технології*. Кременчук, 2013. № 1–2. С. 33–38.
12. Шульц Д. С., Крайнов А. Ю. Математическое моделирование СВС процесса в гетерогенных реагирующих порошковых смесях. *Компьютерные исследования и моделирование.* 2011. № 2. С. 147–153.
13. Лучак Д. Л., Криль Я. А., Пилипенко О. В. Застосування самопоширюваного високотемпературного синтезу в технологіях нанесення зносостійких покриттів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. Івано-Франківськ, 2015. № 2 (55). С. 43–50.
14. Жигуц Ю. Ю., Похмурський В. І., Скиба Ю. Ю., Легета Я. П. Матеріали синтезовані металотермією і СВС-процесами. *Науковий вісник Ужгородського університету*. *Серія Фізика*. Ужгород, 2004. № 16. С. 93–103.
15. Жуков А. О., Жигуц Ю. Ю., Шиліна Е. П., Курітник І. П. Поверхневе зміцнення матеріалів за допомогою лазерної обробки і саморозповсюджувального високотемпературного синтезу. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні.* Львів, 2002. № 442. С. 133–137.
16. Luzan, S.O., Luzan, A.S. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Deposited Materials of the Ni–Cr–B–Si System with Inclusions of Dispersed Phases. *Materials Science*, 2020. Vol. 56 (3), P. 381–388. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-020-00441-x
17. Luzan, S. A., Sidashenko, A. I., Luzan, A. S. Composite material for hardening of tillage machines working bodies containing titanium and chromium borides synthesized using SHS-process. *Metallofizika and Noveishie Tekhnologii,* 2020. Vol. 42 (4), P. 541–552. DOI: https://doi.org/10.15407/mfint.42.04.0541

Luzan S.A., Sytnykov P.A. SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS: STATE, PROBLEMS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

This work is devoted to one of the top problems of mechanical engineering – increasing the resource of parts of agricultural and tillage machinery, using the application of strengthening and restorative coatings based on composite materials. As a promising method of obtaining materials used self-propagating high-temperature synthesis (SHS), one of the high-tech, science-intensive, energy- and resource-saving methods, is proposed. The historical background and the contribution of O. G. Merzhanov, I. P. Borovinska and V. M. Shkyro to the discovery of a new physical phenomenon «solid flame», which became the basis for the appearance of SHS, are highlighted and the main stages of its formation and development are retrospectively shown. Based on a review of domestic scientific works and developments using SHS -technology, the creation of tribological materials of TiFe-xC type is reflected, results of development of porous (filtration) cermet materials using machine-building waste are analyzed and compared, and results of mathematical calculations of SHS reactor and some synthesis reactions are presented, possibilities of combining SHS with coating technologies are determined. The authors present their own scientific results of development of a composite material obtained using SHS and preliminary mechanical activation of initial reagents containing SiO_2 and AI_2O_3 oxides as wear-resistant dispersed phases. On the basis of the conducted research, the prospects of using the developed composite material with the structure «strengthening phase – matrix» {10 % (Ti–C–SiO_2–Al_2O_3–Fe_2O_3–Al– PT-NA-01) + 90 % (PG-10H-01)} for arc welding of strengthening and restoring coatings of machine parts. The article formulates general conclusions and a list of further promising studies in this area.

Key words: *self-propagating high-temperature synthesis, composite material, technology, wear resistance, resource.*

УДК 620.179.11
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/05

Павленко В.Я.
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки
та судових експертиз Служби безпеки України

ЗАХИСНЕ ПОКРИТТЯ ЯК ЗАСІБ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ КЛИНКІВ ХОЛОДНОЇ ЗБРОЇ. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ

Стаття присвячена проблемі покращення якості холодної зброї. Якість та надійність клинків холодної зброї залежить не тільки від фізико-механічних властивостей матеріалів, що застосовуються, але й від функціональних покриттів, показниками якості яких є товщина та рівномірність розподілу їх на поверхні. Покриття клинків за призначенням поділяються на: спеціальні, захисні та захисно-декоративні в залежності від цілей їх застосування. Зазвичай покриття клинків має спеціальне призначення, яке наноситься для отримання таких властивостей як підвищена зносостійкість та збільшення характеристик твердості. Захисне покриття ізолює металеві клинки від дії агресивних середовищ та механічних пошкоджень. Метою захисно-декоративного нанесення є отримання високих естетичних характеристик, захисту клинків від руйнівних факторів, та усунення надмірного блиску. Однак, така класифікація є значною мірою умовною, тому що неможливо виділити випадки, коли одна з цих властивостей виступає у чистому вигляді. У деяких випадках покриття використовують для відновлення початкового вигляду клинка після тривалого використання. В статті розглянуто види та способи нанесення покриттів на клинки при виготовленні бойових, армійських, рибальських або мисливських ножів. Визначено основні відомості про покриття з точки зору функціональних властивостей. Узагальнено практику із різних методів протикорозійного захисту а саме: створення антикорозійних сплавів (легування); збільшення чистоти індивідуального металу; механічну та хімічну пасивацію металів; покриття поверхні металу різними захисними плівками. Плівки поділяють на: неметалічні (фарби, лаки, мастильні матеріали) ; металічні (нікель, хром, цинк та ін.); анодні та катодні [6].

Ключові слова: *холодна зброя, захисне покриття, корозія, оксидна плівка, металеві та неметалеві покриття.*

Постановка проблеми. Покриття це спеціально створювані на фізичних поверхнях покривні плівки із різноманітних металевих та неметалевих матеріалів. Зброярі повинні володіти знаннями про основні функціональні властивості покриттів та вміти обирати оптимальні, з урахуванням функціонального призначення та застосування холодної зброї у кожному окремому випадку. Психологи стверджують, що в бою перевагу має той боєць, клинок якого має сліпучо сяючий вигляд, створюючи відчуття неймовірної гостроти леза та легкості, яка лякає противника. На психологічному рівні така зброя має деморалізуючу дію на ворога, і тим самим дає власнику тактичну перевагу. В ситуації, коли холодна зброя не повинна привертати уваги і дії з її застосуванням не потрібно афішувати, знадобиться клинок з матовим покриттям, який не спровокує власника своїм блиском [5]. Такі клинки вкрай необхідні для використання під час тактичних воєнних операцій. Тому при виготовленні холодної зброї спецпризначення виробники знаходять все більше винаходів по відношенню до *обробки поверхні клинка.* Разом зі звичайним матуванням клинка сьогодні все більшу популярність набуває гартування поверхневого шару та його обов'язковий захист від корозії. І серед усіх способів обробки переважає удосконалення поверхні за рахунок механічної обробки та спеціального *покриття клинка*.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням проблемних питань аналізування методів та засобів нанесення захисних покриттів займалися багато вітчизняних та зарубіжних вчених. Так А.М.Степанчук та І.І.Білик у своїй книзі «Матеріали для напилювання покриттів» [10] детально розглядають теорії та технології отримання порошків металів і сплавів, композиційних порошків, порошкових дротів та шнурів, які використовуються для напилювання покриттів газо термічними методами.

М.В. Бик, О.І. Букет, Г.С. Васильєв у своїй публікації «Методи захисту обладнання від корозії» [11] узагальнюють знання із різних методів протикорозійного захисту і визначають оптимальні рішення для захисту об'єктів різних галузей.

При огляді використаних джерел інформації простежується лінія, що в основному, розглядається використання захисного покриття в нафтогазовій, машинобудівній, харчовій промисловості, в електроприладобудуванні, турбобудуванні і майже немає публікацій, щодо важливості захисних покриттів при виготовленні холодної зброї. Тому варто приділити увагу саме цій галузі.

Постановка завдання. На американських та європейських сайтах в числі параметрів, які вказують продавці або виробники ножів та холодної зброї майже не зустрічаються такі параметри, як твердість та захисне покриття сталі. Законодавством ці параметри ніяк не регулюються. Вважається, що це не потрібно звичайному мисливцю, рибалці або туристу. Але при придбанні бойової або армійської зброї, необхідно мати поняття як про твердість металів так і про захисне покриття. Зрозуміло, що різні матеріали мають різну твердість та покриття і, в залежності від цих параметрів володіють певними властивостями. Придбана бойова холодна зброя обов`язково повинна бути сертифікована. Тобто необхідно мати «Висновок» який передбачає розгляд, аналіз та випробування холодної зброї у спеціальних випробувальних лабораторіях. В цих лабораторіях наряду з параметрами, притаманними ознакам належності до холодної зброї [3], проводяться випробовування на корозійну стійкість, якість металевого покриття (міцність зчеплення його з основним металом) та товщину покриття. Метою статті є ознайомлення зброярів з основними властивостями матеріалів, які використовуються для покриття клинків, обґрунтування необхідності правильного їх підбору а також аналізування засобів та методів контролю захисних покриттів.

Виклад основного матеріалу. Саме слово «клинок» асоціюється з блискучою полірованою поверхнею. Але не важко помітити, що деякі бойові ножі відрізняються чорними або темно-сірими клинками, що суперечить такому стереотипному образу. Зрозуміло, що на клинок нанесено якесь покриття. Але яке? Та навіщо клинку додаткове покриття? Саме ці питання розглянуто у статті.

Виробництво клинків із легованої сталі повинно було виключити проблему іржі, корозії та інші проблеми. Але дива не сталося і ми, в черговий раз переконуємося, що нічого ідеального в світі не існує. Так, новий асортимент сталей може показувати певну (іноді значну) стійкість проти корозії, але вона ніколи не буває абсолютною. До того ж, в наш час, багато зброярів вважають, що сталь 440С (з найвищим вмістом вуглецю в 400 серії нержавіючої сталі та термічно оброблена для досягнення твердості 58–60 HRC) вже недостатньо гарна для них. Тим більше, що багато із найбільш сучасних інструментальних сталей для клинків, таких як D2 навіть рекламою визначається як «напів нержавіюча сталь», що відразу дає зрозуміти, що про стійкість до іржі не може бути й мови. Таким чином високо вуглецеві сталі мають високі ріжучі властивості, але мінімально захищені від іржі та корозії. До того ж , дамаські сталі і булати, які інтенсивно іржавіють додали актуальності в пошуках засобів по захисту від іржі та корозії. Як наслідок – корозійну стійкість багатьох сталей для клинків непогано було б підвищити. Ідея полягає у створенні своєрідного бар'єру між сталлю та оточуючим середовищем. При цьому, бажано, щоб бар'єр цей був із якогось міцного нержавіючого матеріалу. Ну і, ясна річ, цей матеріал повинен міцно «триматися на клинку» – не стиратися та не осипатися при користуванні. Тобто повинен мати міцне *додаткове покриття*.

Розглянемо які способи покриття клинків використовуються в наш час [1]. А почнемо з далекої давнини. Найдавніші засоби та методи захисту клинків – *це полірування або шліфування, змащування та вороніння*. Перевагами полірування та шліфування є покращення якості поверхні, тому що шорсткість має найбільш сильний вплив на експлуатаційні характеристики. А недоліком є те, що шліфовані та полірованні поверхні потребують постійного догляду. Змащуванню також необхідна профілактика, тобто періодичне поновлення. Всі ці процедури затратні і по часу і по витратним матеріалам, та і потребують вміння спеціалістів. Вороніння – це спосіб отримання на поверхні шару оксидів – саме цей шар оберігає метал від оточуючих факторів. Досягається це, як дією кислот (електролітів, які розчинені в іонізуючому розчиннику) та лугів, так і шляхом спеціальної термічної обробки. В цілому, вороніння – це ,відносно, дешевий метод обробки. Але цей метод не так ефективно захищає клинки від іржі та старіння, як сучасні і більш технологічні методи. Вороніння застосовують для простих і не дуже дорого вартісних металевих виробів (наприклад деталей, заготовок для тих же клинків). І, часто, не стільки для захисту, скільки для дизайну (має матовий чорний або темно-сірий колір). Перевагами цього захисного покриття є доступність здійснення його навіть в кустарних умовах.

XX століття стало віком науки. Фізика і хімія рухались вперед, відкриваючи людству більш нові принципи технологічних процесів. Однією із самих відомих технологій покриття заснованих на електрохімічних реакціях є анодування. При анодуванні клинок занурюють в електроліт і з'єднують з позитивним полюсом джерела струму. В результаті електрохімічної реакції на металевій *поверхні осідає міцна оксидна плівка, яка має, як декоративне так і захисне* значення. З 20-х років XX століття подібні методи стали витісняти попередні способи захисту сталі для клинків. З`явилося багато різних методів нанесення металевих покриттів на металеву поверхню деталей, а саме: гарячий метод (занурення в розплав), термомеханічний метод (плакування); напилення; гальванічні і хімічні методи. Для захисного покриття клинків широко застосовувалось *хромування*, яке надавало виробам зносостійкості, високих механічних властивостей, та корозійної стійкості. Цей метод захисту стальних поверхонь отримав особливе поширення саме в історичний період 20-х років і полягає в наступному – плівка хрому до 15 мікрон наноситься на клинок за допомогою електролітичного осаду. Хром надає клинку дзеркального блиску та сріблястого кольору. Іноді, навіть, інтенсивність цього блиску доводиться знижувати, для чого клинки не полірируються, а шліфуються. З цією ж метою використовується нікель та інші метали.

Основними технологіями XX–XXI століття стали *порошкові та лакові* покриття. Вони не настільки зносостійкі, як покриття із твердих матеріалів, зате набагато дешевші. Без перебільшення можна сказати, що порошкові покриття – це вороніння сучасності. Немало всесвітньо відомих виробників клинків застосовують «порошок» багато років. Процес нанесення такий: електростатичний заряд діє на частинки порошку, вони, в свою чергу, налипають на поверхню, після чого відбувається спікання з використанням високої температури. EDP – фінішне покриття клинка, різновид анодування.

Абревіатура EDP розшифровується як Electro Deposit Primer. Це покриття є різновидом порошкового та тефлонового покриття, яке наноситься на клинок за допомогою електричного заряду та високої температури, за рахунок чого частинки покриття з'єднуються разом.

Трьома найбільш поширеними *лакофарбовими покриттями* для лез клинків є *DuraCoat, GunKote, CeraKote*. Фактично, усі ці способи фарбування не зовсім звичайні. При правильному догляді така фарба не відшаровується дуже довго, але її відносно легко подряпати.

Також добре відомі порошкові текстуровані покриття клинків ESEE. Такі покриття наносяться за допомогою електростатичного розпилення, в процесі якого відбувається з'єднання частинок порошку зі сталлю. Часто в якості порошкового напилення використовуються епоксидні матеріали та тефлон. Політетрафторетилен, або фторопласт-4, більш відомий під торговою маркою «Teflon» – це полімер тетрафторетилену (ПТФЕ), пластмаса, що має рідкісні фізичні та хімічні властивості і широко застосовується в техніці, в побуті а також як покриття для клинків. Тефлон дійсно має мінімальний коефіцієнт тертя в порівнянні з іншими відомими твердими матеріалами, запобігає утворенню іржі, відрізняється стійкістю до кислот. Головний його мінус – схильність до подряпин (порушення тефлонової плівки).

В якості *лакових покриттів* найчастіше за все використовують кальгард. Він наноситься на клинок струменевим методом та також запікається в печі.

В будь-якому разі, в результаті всіх вищеперерахованих технологій на поверхні клинка утворюється *твердий захисний шар*, який захищає поверхню клинка від впливу факторів оточуючих чинників.

Головною перевагою порошкових та лакових способів обробки є відносно невисока вартість та можливість для серійного виробництва. Але при виготовленні тактичної бойової холодної зброї майже не застосовується.

Варто розглянути *тверді покриття*. PVD (Physical Vapor Deposition, вакуумний метод покриття) – це технологія, яку винайшли в 90-х роках минулого століття і яка швидко набула широкої популярності і використовується до наших днів. В результаті цього способу обробки на клинку утворюється плівка із титано-карбонового нітриду (TiCN), титано-алюмінієвого нітриду (TiAIN) або хром-нітриду (CrN). Ці покриття відрізняються високою стійкістю, чудово захищають метал клинка від вологи, агресивних хімічних речовин та подряпин. PVD-покриття мають кращу стійкістю, ніж порошкові чи лакові.

Алмазоподібне покриття (DLC, Diamond-Like Coating) винайдено в США в 60-ті роки XX століття. DLC-покриття стійке до впливу абразивів, основ, лугів, кислот та мастил і не схильне до корозії. А по твердості воно перевищує навіть деякі марки сталей і більш міцне, ніж звичайні типи PVD-покриттів.

Покриття *з додатком «нітрид»* в назві широко застосовується для створення зносостійких покриттів не тільки для клинків, а й металорізального інструмента.

Нітрид титанове покриття наноситься в спеціальних камерах дифузним методом. Це означає, що під впливом високої температури та тиску, титан і азот вступають в реакцію, в результаті якої дифундують в саму структуру металевої поверхні виробу. Тобто, в даному випадку, покриття не просто наноситься, а стає частиною сталі, що покривається. Звісно, в даному випадку вкрай важливо мати якісне обладнання, а також чітке дотримання технології виробництва. Порушення технології не забезпечить бажаного результату. Нітрид титанове покриття збільшує стійкість до корозії (з цим покриттям клинок, не тьмяніє та не окислюється), збільшується його зносостійкість, а втрати при терті зменшуються. Холодна зброя з цим покриттям здатна знаходитись в робочому стані десятки років.

Від якості покриттів залежить надійність та тривалість використання холодної зброї, тому необхідно проводити суворий контроль за дотриманням режимів технологічних процесів і відповідності покриттів технічним вимогам. Методи контролю якості покриттів встановлені ДСТУ ISO 1463:2015 [2], де передбачена перевірка зовнішнього вигляду, товщини, пористості, міцності зчеплення, захисної здатності та деяких спеціальних властивостей покриття (мікротвердість, питомий електричний опір, пробивна напруга, ступінь блиску та ін.).

Перевірка зовнішнього вигляду (*візуальний контроль*) включає огляд клинка – при цьому відбувається якісна оцінка відхилень захисних покриттів у порівнянні з еталонними зразками по їх кольору, чистоті поверхні, ступеню блиску або тьмяності та корозійному стану.

Корозійна стійкість покриття, а відповідно і можливість його застосування залежить від його пористості. *Пористість* (не суцільність покриття клинка або мікро тріщини) значно погіршують властивості металевих покриттів [7]. Пори можуть бути наскрізними (доходити до основного металу або підшару) або замкнутими; вони можуть мати різноманітну форму та мікроскопічні розміри, тому їх не можна розрізнити неозброєним оком. Є багато різних методів контролю пористості : обробка спеціальним розчином, який, не діючи на метал покриття, реагує через пори з основним металом і утворює добре видимі продукти реакції; метод контактних відбитків, який полягає в обробці покриття спеціальною пастою та подальшому копіюванні поверхні покриття на фотопапері. Є і інші методи (газопроникність, фотографічний, радіохімічний, адсорбційний), які не отримали широкого поширення і можуть бути рекомендовані лише для спеціальних досліджень і для перевірки еталонів. Для перевірки пористості клинків зазвичай використовується електрографічний метод, який є різновидом методу корозійного випробування. Принцип його полягає в наступному. При певному потенціалі метал основи розчиняється через пори покриття, і продукти розчинення утворюють при взаємодії з проявником пофарбований відбиток, що характеризує розподіл мікротріщин по поверхні.

Контроль міцності зчеплення (адгезії) проводиться механічним адгезиметром. Механічний адгезиметр відривного типу використовується для визначення адгезії матеріалів, а також для оперативного неруйнівного контролю зчеплення різних промислових покриттів. Завдяки простоті конструкції та легкості у роботі цей прилад є незамінним щоденним помічником для оперативного контролю якості адгезії. Методика виміру механічним адгезиметром здійснюється наступним способом. На покриття наклеюється грибок, який згодом відривається пружинним механізмом пристрою. Зусилля, що застосовується для відриву приклеєного грибка, виражається у чисельній величині, що відображається індикатором на шкалі пристрою. Це – і є величина адгезії.

При визначенні *твердості покриття* (мікротвердості) використовується прилад для визначення міцності плівок при ударі. Відмінною особливістю пристрою є його універсальність. Він застосовується для випробувань металевих та інших покриттів. Вимірює максимальну висоту, при вільному падінні з якої бойок (тягар) певної маси не викликає видимих механічних пошкоджень на поверхні клинка з металевим, лакофарбовим та іншим покриттям. Міцність покриттів при ударі виражається значенням максимальної висоти в сантиметрах, з якої бойок масою 1 кг вільно падає на випробувану поверхню.

Але основним параметром якості покриття, яке повинно відповідати певним технічним і економічним вимогам, є його *товщина*. У зв'язку з цим визначення товщини покриття є основою оцінки його якості. Іноді необхідно вибирати для вимірювання найбільш оптимальну методику і прилади. Вибір залежить від багатьох чинників: форми і металу покриття, основного металу, необхідної точності і тривалості вимірювання. Цікавим є той факт, що товщина покриття визначається згідно

з даними про середні товщини отриманого шару і залежить від умов, в яких буде експлуатуватися зброя. Ці умови діляться на три групи: *легкі умови*, де товщина одношарового покриття становить близько 7 мкм, багатошарового – 15 мкм; *середні умови* – відповідно 25 мкм і 30 мкм; та *жорсткі умови*, де товщина складає відповідно 30 мкм, і 45 мкм. Як правило, бойова холодна зброя експлуатується в жорстких умовах, тому контроль товщини покриття клинка є одним із основних факторів і непотрібно нехтувати його перевіркою.

При виборі методу вирішальним може бути допустимість або неприпустимість руйнування покриття або й основного металу клинка. Розглянемо руйнівні та неруйнівні методи контролю.

Руйнівні методи. Крапельний метод заснований на розчиненні покриття краплями розчину, що наносяться на поверхню деталі і витримуються певний проміжок часу. *Струменевий метод* є різновидом крапельного методу і заснований на розчиненні покриття розчином, що подається на поверхню контрольованої деталі у вигляді струменя з певною швидкістю із застосуванням електроструменевого приладу. *Кулон метричний метод* заснований на анодному розчиненні ділянки покриття з каліброваною поверхнею стабілізованою струмом. Товщину розраховують за кількістю електричної енергії, необхідної для зняття з металу покриття. Ознакою закінчення процесу служить стрибок потенціалу в момент оголення основного металу. Прилади, засновані на вимірі товщини покриттів кулон метричним методом мають можливість визначати товщини багатошарових покриттів. У цьому їх перевага.

Всі вищеперераховані руйнівні методи актуальні на стадії виготовлення клинків (відпрацювання технологічних процесів; нанесення необхідних покриттів на вимогу замовника) [7, 8]. І контролюються вони у спеціальних випробувальних лабораторіях із залученням фахівців.

Використання *неруйнівних методів* контролю та технічної діагностики набуває все більшого значення, особливо при неможливості пошкодження дорого вартісних виробів. Зрозуміло, що недостатність контролю або його недостовірність можуть приводити до економічних втрат. В наш час існує ряд неруйнівних методів контролю товщини захисного покриття, а саме: магнітні, електромагнітні, радіаційні, електричні, радіохвильові, оптичні, теплові та акустичні [9]. Кожен із цих методів має свою специфіку вимірювань та залежить від основного металу та покриття. Наприклад магнітні методи не можуть застосовуватись для немагнітних матеріалів, а радіохвильові не забезпечують локальності, що не дозволяє їх використовувати для контролю малогабаритних виробів. Оптичні призначені лише для контролю прозорих та дуже тонких покриттів, а теплові не можуть застосовуватись для покриттів стійких до нагріву.

Найбільш перспективними та універсальними приладами неруйнівного контролю товщини покриттів є магнітний товщино мір тензометричного типу та товщино мір покриттів з електромагнітом. Ці прилади можуть використовуватись як в процесі виробництва так і при контролі готових клинків [9]. Отже успіх впровадження неруйнівних методів контроля товщини покриттів може бути забезпечений тільки при умові правильного вибору методів та засобів для кожної конкретно поставленої задачі.

Висновки. Узагальнюючи вищезазначене можна зробити висновок, що вибір захисного покриття холодної зброї полягає у формуванні умінь та компетенцій використання характеристик матеріалів покриттів, що забезпечують довговічність служби клинків. І тут визначальну роль відіграють твердість**,** зносостійкість, та стійкість до корозії робочих поверхонь.

Варто згадати і ще одну із вагомих причин нанесення на клинки різного роду покриттів: – це маркетинг. На жаль існує сумна практика, коли деякі не зовсім відповідальні компанії по виготовленню ножів та холодної зброї реалізують продаж своєї продукції за допомогою реклами, а не якості. Тому процес оцінки вибору є складним – необхідно дуже уважно аналізувати з ким і з чим маєш справу. Якщо ж виробник виконує всі вимоги технологічних процесів та проводить належний контроль якості – покриття клинка може значно підвищити цінність холодної зброї та надовго захистити її від перетворення в іржаве залізо. З цього випливає, що для придбання холодної зброї, пов'язаної з виконанням складних оперативних завдань необхідно отримати сертифікат «Висновок» який передбачає випробування клинків у спеціальних лабораторіях [4].

Список літератури:

1. Виды покрытий ножевой стали – клинок – Grand URL Wayhttps://grandway.ua › vidy-pokrytij-nozhevoj-stali

2. ДСТУ ISO 1463:2015 Покриття металеві та оксидні. Вимірювання товщини покриття. Метод із використанням мікроскопа (ISO 1463:2003, IDT)

3 Сертифікація холодної зброї. Кузьменко Т.М. «Вчені записки Таврійського університету імені Вернадського», серія «Технічні науки», том 33(72) № 1, 2022.

4. Вибір матеріалу клинка при виготовленні холодної зброї. Шорнікова С.В., Кузьменко Т.М. «Вчені записки Таврійського університету імені Вернадського», серія «Технічні науки», 33(72) № 4, 2022.

5. Боевой нож особенности боевого ножа боевые ножи. Современные боевые ножи. Конструкция. URL: https://knife.kiev.ua › boevie-nozhi

6. Конспект. Покриття та їх властивості. URL: https://btpm.nmu.org.ua › lecture-course ›

7. Контроль товщини покриттів при ВТК Obrobka URL: http://obrobka.pp.ua ›

8. Способи визначення товщини покриття – реферати URL: http://um.co.ua ›

9. А.М. Степанчук, І.І. Білик «Матеріали для напилювання покриттів – Yakaboo. URL: https://www.yakaboo.ua › mat

10. Г.С. Васильєв «Методи захисту обладнання від корозії» URL: https://ela.kpi.ua › Metody_zahystu_obladn_vid_kor

Pavlenko V.Ya. PROTECTIVE COATING AS A MEANS OF IMPROVING THE QUALITY OF BLADES OF COLD WEAPONS. METHODS AND MEANS OF CONTROL

The article is devoted to the problem of improving the quality of cold weapons. The quality and reliability of blades of cold weapon hangs not only from the physical and mechanical properties of the applied materials, but also from the functional covers, by showing the quality of which there is a thickness and equal distribution of them to the surface. Coatings of blades for their intended purpose are divided into: special, protective and protective-decorative, depending on the purpose of their use. Usually, the coating of blades has a special purpose, which is applied to obtain such properties as increased wear resistance and increased hardness characteristics. Protective coatings isolate metal blades from the action of an aggressive environment and mechanical damage. The purpose of protective and decorative application is to obtain high aesthetic characteristics, protect blades from destructive factors and eliminate excess shine. However, this classification is conditional, because it is very difficult to isolate cases when one of these properties appears in its pure form. In some cases, the coating is used to restore the original appearance of the blade or after prolonged use. The article discusses the types and methods of coating blades, in the manufacture of combat, army or hunting knives. It generalises knowledge from different methods of corrosion protection and determination of optimal solutions for protecting blades from environmental influences. These factors include: the formation of anti-corrosive alloys (alloying); mechanical and chemical passivation of metals; coating the surface of metals with different protective films. Films are divided into: non-metallic (paints, varnishes, lubricants); anode and cathode. Basic information about the coating in terms of functional properties is defined.

Key words: *cold steel weapons, protective coating, oxide film, corrosion, metal coating.*

УДК 006.91: 006.3/.8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/06

Павленко В.Я.
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки
та судових експертиз Служби безпеки України

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО ТА ОРГАНІЗАЦІЙНОГО РІВНЯ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ ТА ТЕХНІЧНОГО ОСНАЩЕННЯ ПРИ АКРЕДИТАЦІЇ ВИПРОБУВАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРІЙ

Сталий розвиток нашої країни напряму залежить від конкурентоспроможності вітчизняної продукції, яка, в свою чергу, залежить від якості контролю, тобто від рівня випробувальних лабораторій (далі ВЛ). Специфіка ВЛ вимагає спеціальної системи визнання їх компетентності. Інструментом, який з цією метою використовується – є "акредитація". Кожна ВЛ повинна бути конкурентоспроможною, підтверджувати якість проведених нею випробувань і відповідати певним вимогам, тобто бути незалежною, неупередженою, недоторканною і технічно компетентною [3]. Для досягнення цієї мети необхідно мати достатню нормативну базу, досконале технічне оснащення та відповідні виробничі приміщення. Виробниче приміщення для випробувань повинно мати необхідне обладнання та джерела енергії, а при необхідності пристрої для регулювання умов, в яких проводяться випробовування. Тобто випробувальна лабораторія повинна бути оснащена засобами вимірювань, випробувань і контролю, а також витратними матеріалами (хімічними реактивами, речовинами та ін.) для правильного проведення випробувань та вимірювань, що необхідно для визнання її компетентності. В статті розглянуто методи оцінювання показників якості діяльності випробувальної лабораторії та шляхи виконання поставлених завдань а також сучасні вимоги до випробувального обладнання (далі ВО), засобів вимірювальної техніки (далі ЗВТ) та організації і забезпечення контролю. Стверджено необхідність перевірки (атестації) випробувального обладнання з метою визначення нормованих характеристик показників обладнання, їх відповідності вимогам нормативно-технічної документації та встановлення придатності обладнання до використання.

Визначено, що формування державної метрологічної системи в узгодженні з аргументованими напрямками створює умови для ефективної конкурентоспроможності вітчизняної продукції та охорони інтересів покупців і країн від недостовірних результатів вимірювань. Проаналізовано технологію проведення метрологічної атестації засобів вимірювальної техніки відповідно до вимог законодавчої процедури.

Ключові слова: *акредитація, технічне оснащення, випробувальне обладнання, метрологічна атестація.*

Постановка проблеми. Оскільки метою акредитації є підвищення професійної компетентності й поліпшення якості робіт ВЛ та органів по сертифікації а також забезпечення конкурентоспроможності і визнання продукції й результатів випробувань на світовому ринку, необхідно привести у відповідність всю документальну базу ВЛ та провести навчання співробітників щодо вивчення ДСТУ ISO 17025 (п.п. 6.3; 6.4; 6.5) [1] та ДСТУ ISO 10012 [2].

Важливим чинником є метрологічне підтвердження, яке гарантує відповідність метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки вимогам щодо їх використання за призначенням а також формулювання принципів щодо обстеження виробничих приміщень на відповідність умовам безперебійної роботи персоналу (атестації, транспортування, контролю, зберігання та обслуговування усього ВО та ЗВТ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В ході роботи теоретичною та методологічною базою стали публікації фахівців та науковців, законодавчі документи, стандарти України та Міжнародні стандарти, що впроваджуються на підприємствах. Питанням дослідження необхідності перевірки (атестації) ВО та проведення метрологічної атестації присвячені роботи вітчизняних науковців: В.О. Федоровича [4], Р. В. Бичківського, П. Г. Столярчука, П. Р. Гамула [5] та ін. У методичних вказівках щодо акредитації ВЛ [3] у розділі Настанова з якості наведені практичні приклади оформлення документації щодо приміщення та умов довкілля, обладнання та метрологічної простежуваності. Але цей матеріал потребує роз’яснень.

Постановка завдання. Технічне оснащення це сукупність усіх необхідних технічних засобів підприємства в певній галузі (обладнання; устаткування; пристрої для регулювання кліматичних умов; засоби, необхідні для оснащення конкретних лабораторій; засоби вимірювальної техніки та ін.). Інформація щодо технічного оснащення надається у Настанові з якості та у Положенні про лабораторію в розділах: про випробувальне обладнання ВЛ; про засоби вимірювальної техніки ВЛ та про приміщення ВЛ. Метою роботи є пояснення вимог щодо існуючих стандартів та змісту документів для акредитації в розділі виробничих приміщень та технічного оснащення робочих місць для досягнення визнання результатів випробувань і сертифікації.

Виклад основного матеріалу. Відповідність вимогам ISO/IEC 17025 [1] дає можливість отримати акредитацію. Стандарт складається з двох частин: частини, яка стосується управління лабораторією, і частини технічної, яка містить технічні вимоги для методів випробувань або вимірів. Розглянемо саме другу частину стандарту, яка охоплює:

– ***підготовку документації щодо обстеження виробництва***, а саме: вивчення переліку, форми та змісту документів, які необхідні для обстеження виробництва під час сертифікації продукції. Цей етап включає обстеження виробництва під час сертифікації продукції та регламентується ДСТУ 3957-2000 [8].

– *підготовку документації щодо атестації виробництва*, а саме: вивчення переліку, форми та змісту документів, необхідних для атестації виробництва під час сертифікації продукції. Порядок атестації виробництва під час сертифікації продукції викладено у ДСТУ 3414-96 [9]

– *документацію на засоби вимірювань*, яка містить реєстраційні документи на ВО та ЗВТ;

– інформацію щодо ***стану виробничих приміщень;***

– перелік ***основного випробувального обладнання.***

Розглянемо детально кожний із цих етапів.

Обстеження виробництва включає: попередню оцінку; перевірку і оцінку виробництва; оформлення результатів обстеження виробництва. На етапі попередньої оцінки комісія, що призначена, направляє заявнику опитувальну анкету та перелік матеріалів і документів щодо продукції, які потрібно надати комісії разом із заповненою опитувальною анкетою. Після отримання від заявника заповненої опитувальної анкети та матеріалів комісія здійснює їх аналіз. Проведення перевірки на підприємстві включає: вступну нараду; обстеження виробництва відповідно до затвердженої програми; заключну нараду. Під час обстеження виробництва збирають фактичні дані про виробництво та систему управління якістю шляхом: опитувань персоналу підприємства та аналізу його діяльності; аналізу документів, що використовуються на підприємстві; аналізу технологічних процесів та оцінки виробництва; здійснення спостережень за діяльністю функціональних підрозділів та аналізу цієї діяльності; аналізу заходів щодо забезпечення якості на виробництві. Результати перевірки, висновки та рекомендації комісії оформлюють у вигляді акту обстеження виробництва [3].

Порядок проведення робіт з **атестації виробництва** в загальному випадку передбачає виконання наступних етапів: подання заявки (якщо атестація запроваджується за ініціативою підприємства); попередньої оцінки; складання програми та методики атестації; перевірки виробництва і атестації його технічних можливостей; технічного нагляду за атестованим виробництвом. Попередня оцінка вміщує експертизу вихідних матеріалів, наданих підприємством та складання висновку щодо готовності підприємства до проведення атестації виробництва. Програма та методика атестації повинні вміщати об'єкти перевірки, процедури перевірки та правила прийняття рішень. Перевірка виробництва й атестація його технічних можливостей здійснюється комісією експертів, яка призначається керівником органу з сертифікації продукції. За результатами перевірки комісія протягом місяця складає звіт, який містить аналіз результатів перевірки та надає обґрунтовані висновки [3].

Документація на засоби випробувань містить реєстраційні документи на ВО та ЗВТ. Це журнали, картки, листи та ін., що містять такі відомості: назва та вид обладнання; підприємство-виробник (фірма), тип (марка), заводський та інвентарний номери; дата виготовлення, отримання та введення до експлуатації обладнання; стан на час закупівлі (нове; те, що було у вжитку; після ремонту та ін.); дані щодо несправності, ремонтів, технічного обслуговування; дані щодо перевірки* (атестації) та повірки; документи з експлуатації та технічного обслуговування випробувального обладнання та ЗВТ; паспорт на кожну одиницю ВО та ЗВТ; методики проведення повірок ЗВТ, а також «Програми та методики атестації ВО»; порядок атестації та затвердження

нестандартизованої методики випробувань та вимірювань; документи з обліку повірок засобів вимірювальної техніки та атестації випробувального обладнання; графіки атестації ВО та повірок ЗВТ [3].[1]

ВЛ повинна бути оснащеною засобами вимірювань, випробувань і контролю а також необхідними витратними матеріалами. В окремих випадках можна, на договірних умовах, застосовувати обладнання, яке не належить ВЛ (тільки в тому випадку, якщо це обладнання атестоване, а засоби вимірювань перевірені у встановленому порядку). Інформація щодо оснащеності ВЛ технічними засобами випробувань приведені в Настанові з якості. Паспорт ВЛ (який необхідний для взаємодії зі сторонніми організаціями) також містить дані щодо оснащеності лабораторії приміщеннями та їх стану; наявності ЗВТ, випробувального і допоміжного обладнання.

Обладнання ВЛ, в тому числі і ЗВТ, повинні використовуватись за призначенням. Документація щодо їх експлуатування та технічного обслуговування повинна бути доступною. Несправне обладнання, на якому при випробуваннях мають місце сумнівні результати, повинно бути зняте з експлуатування та зазначено відповідним чином (мати помітку щодо його непридатності). Таке обладнання необхідно зберігати в спеціально відведеному місці до тих пір, поки воно не буде відремонтоване і його придатність не буде підтверджена випробуваннями (повіркою, калібруванням). *Калібрування або повірка* ЗВТ та ВО є обов'язковою умовою. З'ясуємо яка ж різниця між калібруванням та повіркою. При *калібруванні* ми встановлюємо дійсні параметри показників, притаманних тому чи іншому виду вимірювальної техніки. *Повірка* ж – це технічна процедура, в результаті якої визначають і підтверджують відповідність вимірювальної техніки встановленим вимогам на підставі результатів контролю їхніх метрологічних характеристик.

Калібрування або повірка вимірювального та випробувального обладнання* при необхідності, проводиться перед введенням його в експлуатацію, а в подальшому, у відповідності зі встановленою програмою. [2]

ВЛ перебуває під постійним контролюванням, тому повинна мати чітко відрегульовані та документально оформлені *робочі процедури* щодо обслуговування та проміжного перевіряння обладнання (ЗВТ/ВО) [7]. Випробувальне обладнання, зокрема апаратні засоби і програмне забезпечення охороняється від регулювання, яке може зробити недійсними результати випробування: – вхід в програмне забезпечення здійснюється тільки через пароль, – вхід до ВЛ стороннім заборонено та обмежено кодовими замками. В стандарті [10], процедурам, які суттєво впливають на результати випробувань, приділена особлива увага, а саме:

– ***«Безпечне поводження, транспортування, зберігання обладнання»*** -обладнання та його програмне забезпечення, яке використовується для випробувань, здатне досягти необхідної точності та відповідати технічним вимогам щодо випробувань;

– ***«Програма калібрування обладнання ВЛ»***[3] **–** розроблено для основних параметрів або характеристик обладнання, характеристики якого значно впливають на результати випробувань;

– *«Контроль калібрування обладнання»* * – ВЛ проводить роботи з оцінки відповідності продукції підприємства, тому на все випробувальне обладнання (в тому числі на ЗВТ) поширюється «Сфера державного метрологічного контролю і нагляду» згідно «Закону про метрологію і метрологічну діяльність»;**[13][4]

– ***«Графік калібрування обладнання ВЛ».*** Відображає терміни калібрування;

– ***«Уповноваження на виконання випробувань та роботу з обладнанням».*** Містить актуалізовані інструкції з використання та обслуговування обладнання;

– ***«Журнал технічного обслуговування та проміжного перевіряння обладнання (ЗВТ/ВО) ВЛ.*** Передбачає періодичне технічне обслуговування та проміжне перевіряння*;

[1] Для впевненості у придатності ВО та ЗВТ до експлуатації необхідно здійснити сукупність операцій, які дозволять визначити його точнісні характеристики, встановити його відповідність вимогам експлуатаційних та/або нормативних документів щодо його застосування, і встановити придатність до застосування. Така сукупність операцій називалася «атестацією». Однак, після впровадження в Україні ДСТУ EN ISO/IEC 17025 [1], та скасування ГОСТ 24555-81 (використовується як довідковий) [6], який встановлював процедуру атестації ЗВТ, цю процедуру слід називати «перевіркою ЗВТ»

[2] Включає обладнання різних видів: для вимірювання та випробування; обробляння й аналізування даних випробувань.

[3] **Примітка**. Програма калібрування обладнання повинна забезпечувати простежуваність вимірювань, які проводяться ВЛ на відповідність національним та міжнародним еталонним зразкам (якщо такі є в наявності). Якщо ж подібну простежуваність здійснити неможливо, то ВЛ повинна надати переконливі докази кореляції або точності результатів випробувань (наприклад участь у відповідній програмі міжлабораторних випробувань).

[4] Все обладнання ВЛ, що потребує калібрування або має обмежений термін використання, знаходиться під контролем, ідентифіковане і марковане (позначено статус обладнання та термін (початкову та кінцеву дати) його придатності). Якщо з якої-небудь причини обладнання ВЛ виходить з-під його прямого контролювання, ВЛ шляхом перевірки наявності документів про калібрування забезпечує, щоб функціонування і статус випробування обладнання виявились задовільними перш, ніж воно буде залучене до експлуатації. Використовуване обладнання (ЗВТ та ВО) у поширенні «Сфери державного метрологічного контролю і нагляду» підлягає калібруванню. Калібрування проводять державні установи або лабораторії, які мають на це право (тобто акредитовані, як калібрувальні лабораторії згідно ДСТУ ISO/IEC 17025).

В нормативній, технічній і експлуатаційній документації встановлюється періодичність та вид технічного обслуговування з періодичним чи безупинним контролем, в залежності від технічного стану приладів. В технічне обслуговування обладнання входить: візуальний огляд; перевірка захисту від перенавантаження; регулювання параметрів; контроль своєчасного проведення метрологічного контролю; перевірка комплектності і справності запчастин; змащування; перевірка захисту від поразки електричним струмом.

Проміжне перевіряння обладнання проводиться з періодичністю, що обумовлена частотою використання ВО і ЗВТ.

– ***«Оснащення стандартними зразками»****. В даній формі зазначаються типи, діапазони відтворення, точністні характеристики та реквізити свідоцтв та сертифікатів стандартних зразків, які використовуються в якості еталонних для кожного з видів вимірювання.[5]

– ***«Наявність допоміжного устаткування»**** – це все те устаткування, яке застосовується для відтворення та стабілізації контрольованих фізичних величин, та контролю і реєстрації факторів, що впливають на процес вимірювання з метою їх аналізу та, за потреби, внесення коригуючих поправок до результатів вимірювання. [6]

Стан виробничих приміщень. Ця інформація надається в «Положенні про ВЛ», паспорті ВЛ та «Настанові з якості» і описує приміщення які використовує ВЛ для проведення робіт. В цій формі вказується площа, кліматичні умови, наявність електромагнітних полів, наявність вібрацій, рівень освітленості, та інші фактори, що можуть впливати на процес вимірювань. Вказуються також виміряні значення тих параметрів, які відображені в формі. Робиться це для того, щоб продемонструвати відповідність приміщення вимогам, які необхідно забезпечити для виконання калібрувальних та випробувальних робіт з певного виду вимірювань. В цьому розділі також є робочі процедури, які сприяють правильному проведенню випробувань та забезпечують необхідні умови довкілля з метою уникнення негативного впливу на результати роботи та на потрібну якість випробувань, а саме:

– ***«Технічні вимоги до приміщень ВЛ».*** Важливими факторами є вологість та температура повітря, атмосферний тиск, якість електропостачання, відсутність пилу стосовно відповідної технічної діяльності. Випробування припиняються, якщо умови довкілля ставлять під загрозу результати випробувань. З метою запобігання аварійних ситуацій (аварій водопостачальних комунікацій, теплових та електромереж), які можуть негативно вплинути на обладнання, проводяться профілактичні, планово-попереджувальні та капітальні ремонти в приміщеннях. ВЛ встановлює ступінь контролювання на основі конкретних обставин: на випробувальні дільниці не допускаються особи, які не мають безпосереднього відношення до проведення випробування; особи, які не є співробітниками ВЛ, можуть знаходитись в ВЛ лише у супроводі керівника або його заступника; регулярно виконується прибирання штатними технічними робітниками у робочий час та у присутності співробітників ВЛ. У випадку невідповідності технічних вимог до приміщень та умов довкілля вимогам НД випробування призупиняються розпорядженням керівника ВЛ до приведення параметрів до норми (в тому числі на ділянках, які не перебувають під постійним контролем).

«Журнал реєстрації кліматичних умов довкілля у приміщеннях ВЛ». Передбачає періодичне внесення показників вологості та температури повітря, атмосферного тиску, якості електропостачання.

Висновки. На підставі вищевикладеного чітко видно, що процедура оцінки технічного та організаційного рівня виробничих приміщень та технологічного оснащення при акредитації процес зовсім не творчий, а навпаки, дуже суворо та жорстко регламентований. Але саме цей жорсткий регламент і дає замовникам впевненість в надійності продукції (виробів) та сприяє конкурентоспроможності на міжнародному ринку [12].

В статті стверджено, що основною ціллю атестації ВО та ЗВТ є підтвердження можливості відтворення умов випробувань в границях допустимих відхилень та встановлення можливості застосування ВО у відповідності з його призначенням. Отже ЗВТ, які використовуються в сферах державного метрологічного контролю і нагляду та застосовуються для контролю параметрів продукції, що випробовується а також для характеристик умов випробувань та для умов і параметрів безпеки праці і стану оточуючого середовища – повинні бути повірені, а використовуване ВО повинно бути атестоване. Технологічне, лабораторне,

[5] Еталонним вважається в конкретній лабораторії той засіб вимірювальної техніки, який має найвищу точність в межах даної лабораторії, і з результатами вимірювання якого порівнюють результати інших засобів при проведенні калібрування. Дана форма є особливо важливою, оскільки саме вона вказує на вимірювальні можливості лабораторії.

[6] До складу допоміжного обладнання входять термостати, центрифуги, вібростенди, генератори струму, напруги, та електромагнітних полів, установки для створення потоку рідин та газів, освітлювальні стенди, тощо. Фахівцями ВЛ згідно стандарту [11] розраховуються міжкалібрувальні інтервали для кожної конкретної одиниці устаткування на підставі яких складається програма/графік калібрування допоміжного устаткування ВЛ.

допоміжне та ін. обладнання, яке не відноситься до випробувального, повинно проходити періодичну повірку технічного стану у відповідності із вказівками, які містяться в інструкціях щодо експлуатування цього обладнання, в паспортах на них або встановлюються фахівцями ВЛ.

Список літератури:

1. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій».

2. ДСТУ ISO 10012:2015 «Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання».

3. Акредитація випробувальних лабораторій URL: https://learn.ztu.edu.ua › mod › resource › view

4. Федорович В.О. Сертифікація та метрологічне забезпечення якості. Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету. 2014. № 1. С. 50–78.

5. Метрологія, стандартизація, управління якістю і сертифікація : Підруч. для вищ. навч. закл. / Р. В. Бичківський, П. Г. Столярчук, П. Р. Гамула; Нац. ун-т «Львів. Політехніка». Л., 2002. 560 с.

6. ГОСТ 24555-81 Система государственных испытаний продукции. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения.

7. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ – ХНАДУ URL: https://dspace. khadi.kharkov.ua › bitstream › ER

8. ДСТУ 3957-2000 «Державна система сертифікації. Порядок обстеження виробництва під час проведення сертифікації продукції».

9. ДСТУ 3414-96 «Державна система сертифікації. Атестація виробництва. Порядок проведення».

10. ДСТУ 3412-96. Система сертифікації УкрСЕПРО. Вимоги до випробувальних лабораторій та порядок їх акредитації.

11. ДСТУ ILAC – G24/OIML D 10:2013

12. Топчій Н. В. Акредитація випробувальних лабораторій в сфері науково-технічної діяльності. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, (4) 2022, с. 20–27.

13. Закон України : Про метрологію та метрологічну діяльність «Про забезпечення єдності вимірювань»

Pavlenko V.Ya. SSESSMENT OF THE TECHNICAL AND ORGANIZATIONAL LEVEL OF PRODUCTION FACILITIES AND TECHNICAL EQUIPMENT IN THE ACCREDITATION OF TESTING LABORATORIES

The sustainable development of our country directly depends on the competitiveness of domestic products, which, in turn, depends on the quality of control, that is, on the level of testing laboratories. The specificity of the TL requires a special system for recognizing their competence. The tool that is used for this purpose is "accreditation". Each TL must be competitive, confirm the quality of its tests and meet certain requirements, that is, be independent, impartial, inviolable and technically competent. To achieve this goal, it is necessary to have a sufficient regulatory framework, perfect technical equipment and appropriate production facilities. The production room for testing should have the necessary equipment and energy sources, and, if necessary, devices for regulating the conditions in which the tests are carried out. That is, the testing laboratory must be equipped with means of measurement, testing and control, as well as consumables (chemical reagents, substances, etc.) for the correct conduct of tests and measurements, which is necessary for the recognition of its competence. The article considers the methods of assessing the quality indicators of the testing laboratory and the ways to perform the tasks, as well as modern requirements for testing equipment and the organization and provision of control tools. The need to check (certify) the test equipment in order to determine the normalized characteristics of the equipment indicators, their compliance with the requirements of regulatory and technical documentation and the establishment of the suitability of the equipment for use was approved. It is determined that the formation of the state metrological system in coordination with reasoned areas creates conditions for the effective competitiveness of domestic products and the protection of the interests of buyers and countries from unreliable measurement results. The technology of metrological certification of measuring instruments in accordance with the requirements of the legislative procedure is analyzed.

Key words: *accreditation, technical equipment, testing equipment, metrological certification.*

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396.96
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/07

Воловик А.Ю.
Вінницький національний технічний університет

АДАПТИВНЕ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ЗА НАЯВНОСТІ НЕСПРАВНОСТЕЙ У КАНАЛІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

На практиці не виключені випадки раптових змін у динаміці фізичних систем, які є причиною погіршення їх якісних показників. Такі зміни прийнято класифікувати як несправності або відмови. Зазвичай, для підтримання постійної працездатності системи, застосовують процедуру компенсації впливу несправностей за рахунок апаратно-архітектурної або функціональної надлишковості. У представленій роботі увага зосереджена на проблемі своєчасного виявлення несправностей та їх розпізнавання шляхом застосування в рамках байєсового підходу методів сукупного оцінювання як параметрів системи, так і її вектора стану. З цією метою була скорегована модель каналу спостережень, яка не виключала появу результатів різної точності включно з аномальними, а результат синтезу представлений у вигляді фільтра з пониженою чутливістю до дії аномальних похибок. Стійкість синтезованого фільтра до аномальних похибок досягається за рахунок вагового осереднення оцінок пари паралельно працюючих фільтрів, кожен з яких налаштований на відповідну гіпотезу про стан каналу спостережень. У якості вагових множників використовуються апостеріорні ймовірності справного стану каналу спостережень та його альтернативи. Оскільки обчислення апостеріорних ймовірностей вимагають результатів поточних спостережень, то по відношенню до результатів спостережень синтезований фільтр є нелінійним. У зв'язку з цим, його практична реалізація потребує попереднього прискіпливого статистичного моделювання за методом Монте–Карло.

Для подолання апріорної невизначеності щодо ймовірності появи аномальних похибок був запропонований варіант побудови адаптивного фільтра, у якому замість апріорно заданих значень ймовірностей появи аномальних похибок використовувалось їх середні значення. Приводиться демонстративний приклад, який доказує працездатність синтезованого фільтра, визначені межі його застосування з точки зору якості оцінювання та тривалості процесу адаптації. Дана оцінка точності поточних результатів фільтрації.

Ключові слова: *адаптація, аномальні похибки, псевдобайєсові оцінки, результати спостережень різної точності, фільтр Калмана.*

Вступ. У практичній діяльності нерідко трапляються випадки, коли динаміка фізичних систем зазнає раптових змін, що призводить до погіршення їх якісних показників. Часто ці зміни класифікують як несправності або відмови, причиною яких може бути некоректна робота окремих пристроїв або підсистем. Для підтримання постійної працездатності системи користуються інтуїтивно зрозумілою ідеєю – компенсації впливу несправностей за рахунок апаратно–архітектурної або функціональної надлишковості [1]. Головна увага у представленій роботі зосереджена на проблемі виявлення несправностей та їх розпізнавання шляхом модифікації методів оптимальної лінійної фільтрації за Калманом. Останнім часом сформувались декілька базових підходів до розв'язку зазначеної проблеми [2–6]. Перший з них заснований на роботі Фрідланда [7], що запропонував апроксимувати фільтр Калмана, у якому уводився додатковий векторний вхід асоційований з впливом діючих несправностей та збурень, паралельною діючою структурою меншої розмірності. На сьогоднішній день основні зусилля у цьому напрямку спрямовані на пошуку методів апроксимації, що поєднують прийнятну точність з обмеженнями, не занадто обтяжливими для практичних втілень [8, 9]. Основою альтернативного, другого підходу є припущення, що будь-якої апріорної інформації щодо динамічних властивостей діючих несправностей не існує. Кітанідіс [10] був першим, хто вирішував цю проблему з метою одержання лінійних незміще-

них оцінок з мінімальною дисперсією за рахунок уведення обмежень, що накладались на структуру системних матриць. Гіллінз, Мур та ін. [11–13] узагальнили результати [10], застосувавши при цьому параметричний підхід для отримання оптимальних оцінок. Основу третього напрямку, куди відноситься представлена робота, складають публікації, пов'язані з використанням елементів параметричної або (та) структурної адаптації системи у темпі реального часу. У такому разі стохастична постановка задачі передбачає застосування методів сукупного виявлення, оцінювання та ідентифікації, як параметрів системи, так і її структури. Тут, серед робіт академічного плану [14–16] слід відзначити роботи прикладного характеру [17–19].

Постановка задачі. Ефективність використання методів синтезу пристроїв відновлення вектора стану системи за результатами спостережень, розмірність яких є меншою від розмірності відновлюваного вектора стану, певною мірою залежить від повноти апріорної інформації щодо математичної моделі процесів, що мають місце у об'єкті контролю та механізму утворення вихідних даних. У разі стохастичного варіанту постановки задачі апріорі передбачається наявність: рівняння, яке описує динаміку процесів у об'єкті контролю $\boldsymbol{s}(k+1) = \boldsymbol{\Sigma}(k+1,k)\boldsymbol{s}(k)+\boldsymbol{w}(k),\ \boldsymbol{s}(0)=\boldsymbol{s}_0$ та алгебраїчного рівняння, яке описує механізм утворення вихідних даних $\boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{s}(k) + \boldsymbol{v}(k)$, де $\boldsymbol{s}(k) \in \Re^n$ – вектор стану системи; $\Sigma(k+1,k)$ – перехідна системна матриця; $(m < n)$ – вектор спостережень $(m < n)$; $\boldsymbol{H}(k)$ – матриця спостережень. Окрім того, передбачається що випадкові процеси $\boldsymbol{w}(k)$, $\boldsymbol{v}(k)$ некорельовані, мають нульові середні значення та відповідно задані коваріаційні матриці $\boldsymbol{Q}(k), \boldsymbol{R}(k)$. Якщо дані, що стосуються поточного стану сенсорної підсистеми відсутні, або малодостовірні і не відповідають прийнятим моделям, то задача синтезу відноситься до класу некоректно поставлених [20]. У цьому разі, доцільно змінити постановку задачі і перейти до пошуку більш розширених методів обробки сигналів з одночасним розв'язанням задачі статистичного оцінювання, як параметрів системи так і стану каналу спостережень. Першим кроком на цьому шляху є корекція математичної моделі механізму утворення вихідних даних, яка б враховувала ймовірність появи спостережень різної точності включно з аномальними.

Обґрунтування моделі несправностей у каналі спостережень. Пропонується описувати скореговану модель каналу спостережень як

$$\boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{s}(k) + \boldsymbol{\varphi}(k)\boldsymbol{v}(k);\ \boldsymbol{\varphi}(k) = 1,...,N \quad (1)$$

де $\boldsymbol{\varphi}(k)$ – параметрична змінна, що характеризує статистичні властивості можливих несправностей сенсорної підсистеми у рамках гаусово–марківської апроксимації випадкових процесів. Пропозиція базується на факті [21], що оптимальний пристрій відновлення вектора стану системи у вигляді фільтра Калмана у будь-який момент часу забезпечує компроміс між швидкістю процесу відновлення та стійкістю до шумів спостережень. Баланс досягається за рахунок певного співвідношення між коваріаційними матрицями шумів збурень $\boldsymbol{Q}(k)$ та спостережень $\boldsymbol{R}(k)$ незалежно від їх абсолютних значень. Це співвідношення часто називають відношенням «сигнал/шум у фільтрі Калмана», розуміючи під «корисним сигналом» шумовий процес $\boldsymbol{w}(k)$. Баланс можна змінювати, підтримуючи $\boldsymbol{Q}(k)$ постійним, а $\boldsymbol{R}(k)$ змінювати, наприклад, за правилом $\boldsymbol{R}(k) = \boldsymbol{R}_0(k) + \boldsymbol{\Delta R} = \boldsymbol{R}_0(k)\left[1 + \boldsymbol{\rho}(k)\boldsymbol{M}\right]$, де $\boldsymbol{R}_0(k)$ – номінальне значення коваріаційної матриці шумів спостережень, яке визначає регламентовану точність сенсорної підсистеми; $\boldsymbol{\rho}$ – параметр невизначеності стану каналу спостережень, $\boldsymbol{M}$ – постійна, позитивно означена матриця симетричного типу, що описує масштаб змін коваріаційної матриці. Зазначене правило [22, с. 222–233] дає змогу описувати появу спостережень різної точності включно з аномальними похибками у вигляді мультиплікативної складової, вплив якої на результуючу точність, у першому наближенні, можна описувати шляхом уведення у номінальну модель адитивної добавки [5, с. 9–13], де слід покласти $\boldsymbol{\varphi}(k) = i,\ i = 1,...,N;\ \boldsymbol{M} = \boldsymbol{I}_m$. Цю пропозицію можна реалізовувати в рамках байєсового підходу або з залученням принципів адаптивної обробки сигналів. У разі застосування байєсової методології результатом синтезу є сукупність модельно-умовних фільтрів Калмана, відповідно налаштованих на кожну з прийнятих до розгляду гіпотез $\boldsymbol{R}(k) = \boldsymbol{\varphi}^2(k)\boldsymbol{R}_0(k)$. Величину $\boldsymbol{N}$ можна оцінювати, наприклад, з таких міркувань. Зазвичай, точність спостережень характеризується значенням регламентованої середньоквадратичної похибки σ_0 проте інколи наводяться характеристики точності на рівні $2\sigma_0$ або навіть $3\sigma_0$. У останньому випадку це означає, що у смузі $\pm 3\boldsymbol{\sigma}_0$ повинно знаходитись не менше 99 % усіх спостережень, а ті що виходять за ці межі дають підставу вважати їх аномальними. Таким чином, число конкуруючих гіпотез $\boldsymbol{N}$ загалом не перевищує трьох-п'яти, а ймовірність появи аномальних

похибок визначається «хвостами» нормального розподілу розташованих за межами смуги. У тому разі, коли цікавляться лише впливом аномальних похибок на результуючу точність можна обмежитись двома гіпотезами. Гіпотезі H_1 відповідає ситуація $\varphi(k)=1$, тобто канал спостережень справний, а ситуація $\varphi(k)=N \quad (N \gg 1)$ означатиме наявність аномальних похибок (гіпотеза H_N). Саме така ситуація розглядається у наступному підрозділі.

Модифікація рівнянь оптимального фільтра, стійкого до несправностей у каналі спостережень. Синтез фільтра малочутливого до порушень працездатності сенсорної підсистеми будемо виконувати на основі байєсової методології з використанням скорегованих математичних моделей

$$\boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{s}(k)+\boldsymbol{\varphi}(k)v(k), \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{s}(k+1) = \boldsymbol{\Sigma}(k+1,k)\boldsymbol{s}(k)+\boldsymbol{w}(k); \quad \boldsymbol{s}(0)=\boldsymbol{s}_0 \qquad (3)$$

Щодо системи позначень та апріорних даних, то будемо вважати, що вони уже визначені у попередньому підрозділі, а несправності сенсорної підсистеми, що проявляються у вигляді випадкових зникань окремих результатів вимірювань або їх спотворенні будемо враховувати еквівалентним зростанням коваріаційної матриці похибок спостережень до величини $N^2\,\boldsymbol{R}_0(k)$ при $N>>1$. Оптимальна оцінка, яка мінімізує байєсовий ризик являє собою апостеріорне середнє [21]

$$\boldsymbol{s}_0^*(k/k) = \boldsymbol{E}\left\{\boldsymbol{s}(k)/Y_1^k\right\} = \int \boldsymbol{s}(k)\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/Y_1^k\right]d\boldsymbol{s}(k) \qquad (4)$$

де $\boldsymbol{Y}_1^k=\{y(1),y(2),\ldots,y(k)\}$ – певна реалізація послідовності спостережень. Зважаючи на те, що $\boldsymbol{Y}_1^k$ залежить від параметричної послідовності, а процеси $\boldsymbol{s}(k)$,$\boldsymbol{y}(k)$ являють собою процеси Маркова, неважко показати, що апостеріорна густина розподілу ймовірностей $\boldsymbol{\pi}[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k]$ може бути апроксимована зваженою сумою 2^κ гаусових густин розподілу для усіх k=0,1… . Для цього скористаємось методом математичної індукції та властивостями згладжування умовного середнього. Це дозволяє для записати для першого кроку:

$$\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k\right] = \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{\varphi}(1)}\left\{\boldsymbol{s}(k)/Y_1^k, \boldsymbol{\varphi}(1)/Y_1^k\right\} =$$

$$= \sum_i \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/Y_1^k, \boldsymbol{\varphi}(1)/Y_1^k\right] p\left[\boldsymbol{\varphi}(1)=i/Y_1^k\right], \; i=1,N$$

У аналогічний спосіб запишемо густину розподілу для другого кроку:

$$\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(1)\right] = \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{\varphi}(2)}\left\{\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(2), \boldsymbol{\varphi}(1)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(1)\right\} =$$

$$= \sum_i \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/Y_1^k, \boldsymbol{\varphi}(2), \boldsymbol{\varphi}(1)\right] p\left[\boldsymbol{\varphi}(2)=i/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(1)\right], \; i=1,N$$

Поєднання двох кроків дає результат:

$$\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k\right] = \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{\varphi}(2)}\left\{\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{\varphi}(1)}\left\{\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(1), \boldsymbol{\varphi}(2)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(1)/\boldsymbol{Y}_1^k\right]\right\}\right\} =$$

$$= \sum_i \left\{\sum_i \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(2), \boldsymbol{\varphi}(1)\right] p\left[\boldsymbol{\varphi}(2)=i/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(1)\right]\right\} p\left[\boldsymbol{\varphi}(1)=i/\boldsymbol{Y}_1^k\right], \; i=1,N$$

Подальше застосування методу індукції до k-го моменту часу включно утворює гілковий процес, а апостеріорну густину розподілу можна розглядати як зважену суму, що складається з 2к доданків

$$\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k\right] = \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{\varphi}(k)}\{\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{\varphi}(k-1)},\ldots\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{\varphi}(2)},\{\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{\varphi}(1)}$$

$$\{\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(k),\ldots,\boldsymbol{\varphi}(2), \boldsymbol{\varphi}(1)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(k),\ldots,\boldsymbol{\varphi}(2)/,\ldots,/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k\right]\}\}\} =$$

$$= \sum_i^{2^k}\ldots\ldots\sum_i \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(k), \boldsymbol{\varphi}(k-1),\ldots,\boldsymbol{\varphi}(2), \boldsymbol{\varphi}(1)\right] p \left[\boldsymbol{\varphi}(k), \boldsymbol{\varphi}(k-1),\ldots,\boldsymbol{\varphi}(2), \boldsymbol{\varphi}(1)/\boldsymbol{Y}_1^k\right] \qquad (5)$$

Аналіз виразу (5) показує, що строго оптимальне обчислення оцінки $\boldsymbol{s}^*_0(k/k)$ потребує знаходження зваженої суми 2^κ локально-умовних оцінок $\boldsymbol{s}(k)$, і призводить зі зростанням дискретного часу k до перевантаження пристрою обробки. Виходячи з чисто прагматичної точки зору, припустимо що густина розподілу ймовірностей (5) допускає задовільну апроксимацію для кожного k одним еквівалентним гаусовим розподілом. Тоді з урахуванням проведеного осереднення $\boldsymbol{\pi}[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}]$ маємо еквівалентні параметри $E\{\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}\} = \boldsymbol{s}^*_0(k/k-1)$, $Cov\{\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}\} = \boldsymbol{P}(k/k-1)$, знайдені з попереднього обчислювального циклу, або для $k=0$ повинні задаватись апріорі. Оцінки отримані у такий спосіб не є строго оптимальними з математичної токи зору і отримали назву псевдобайєсових [21]. На відміну від оптимальних оцінок $\boldsymbol{s}^*_0(k/k)$ їх будемо позначати як $\boldsymbol{s}^*(k/k)$. Отже, у підсумку $\boldsymbol{\pi}[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k]$ допускає спрощену форму обчислень

$$\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k\right] = \sum_{i=1}^N \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(k)=i\right] p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^k\right] \qquad (6)$$

а співмножники цієї суми можна обчислювати рекурентно, якщо скористатись формулою Байєса та марковими властивостями моделей (2)– (3). Застосувавши формулу Байєса до $\boldsymbol{\pi}[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k, \varphi(k)]$ отримуємо:

$$\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k, \boldsymbol{\varphi}(k)=i\right] = \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k), \boldsymbol{y}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k)=i\right]\left\{\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k)=i\right]\right\}^{-1} =$$

$$= \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k)=i\right]\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{s}(k), \boldsymbol{\varphi}(k)=i\right]\times$$

$$\times\left\{\sum_{i=1}^N \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k), \boldsymbol{y}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k)=i\right]\right\}^{-1} \qquad (7)$$

Оскільки модель динаміки (3) не передбачає явної залежності $\boldsymbol{s}(k)$ від $\boldsymbol{\varphi}(k)$, то

$$\boldsymbol{\delta}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \varphi(k)=i\right] = \boldsymbol{\delta}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right] =$$

$$= \boldsymbol{N}\left[\boldsymbol{s}^{*}(k/k-1),\ \boldsymbol{P}(k/k-1)\right]$$

Використання властивостей скорегованої моделі (2) дає:

$$\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1},\boldsymbol{s}(k),\boldsymbol{\varphi}(k)=i\right]=\boldsymbol{N}\left[\boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{s}(k),\ \boldsymbol{\varphi}^{2}(k)\boldsymbol{R}_0(k)\right] \quad (8)$$

Відповідно до формули Байєса, ймовірність $p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right]$ можна записати як

$$p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right]=p\left[\boldsymbol{y}(k),\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]\left\{p\left[\boldsymbol{y}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]\right\}^{-1}=$$

$$=p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1},\boldsymbol{\varphi}(k)=i\right]\left\{\sum_{i=1}^{N}p\left[\boldsymbol{y}(k),\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]\right\}^{-1}$$

Складова $\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1},\boldsymbol{\varphi}(k)=i\right]$ уже була визначена, а другий множник знаходимо, використовуючи властивості умовних ймовірностей

$$p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]=\sum_{i=1}^{N}p\left[\boldsymbol{\varphi}(k-1)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]$$
$$p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k-1},\boldsymbol{\varphi}(k-1)=i\right],\quad i=1,N \quad (9)$$

де $p\left[\boldsymbol{\varphi}(k-1)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]$ відома з попереднього циклу обчислень, а величина

$p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k-1},\boldsymbol{\varphi}(k-1)=i\right]=p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{\varphi}(k-1)=i\right]$ відома як елемент матриці перехідних ймовірностей, заданої апріорно. Вищенаведені викладки вказують, що отримання оцінок $\boldsymbol{s}^{*}(k/k)$ спричиняє певні труднощі через громіздку систему розрахунків. Ситуацію з розрахунками можна дещо спростити, якщо увести додаткові обмеження на параметричну послідовність $\varphi(k)$, а саме будемо вважати її як такою, що некорельована і приймає значення *1, N* при *N>>1* з наперед заданими ймовірностями $p[\varphi(k)=1]=q_1(k)$; $p[\varphi(k)=N]=q_N(k)$. Мотивом уведення такого обмеження може слугувати той факт, що аномальні похибки з'являються настільки рідко, що апріорні дані щодо частоти їх появи відсутні або малодостовірні, а фізичні чинники діють, як правило, у незалежний спосіб. Слід наголосити, що накладені обмеження не порушують справедливості попередньо отриманих співвідношень, а стосуються лише до спрощень процедур обчислення вагових співмножників $p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right]$, які тепер матимуть вигляд:

$$p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right]=q_i(k)\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1},\boldsymbol{\varphi}(k)=i\right]\left\{\sum_{i=1}^{N}q_i(k)\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k-1},\boldsymbol{\varphi}(k)=i\right]\right\}^{-1} \quad (10)$$

Структура синтезованого фільтра показана на рис. 1, практична реалізація якого потребує використання мікро-ЕОМ.

Поєднання функцій виявлення аномальних похибок та оцінювання надає представленій структурі адаптивних рис, проте на жаль усі обчислення повинні виконуватись у темпі надходження результатів спостережень. Це пояснюється тим, що кореляційна матриця похибок оцінювання $\boldsymbol{D}(k/k)$ через обчислення апостеріорних ймовірностей $p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right]$ залежить від поточних результатів спостережень $\boldsymbol{y}(k)$:

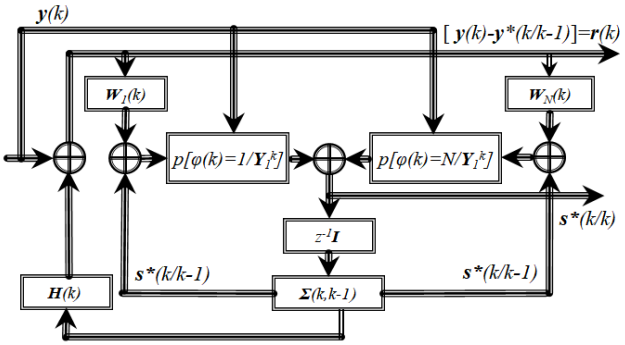


Рис. 1. Схема формування псевдобайєсових оцінок

$$\boldsymbol{P}(k/k)=\left\{\boldsymbol{P}_1(k/k)+\left[\boldsymbol{s}^{*}{}_1(k/k)-\boldsymbol{s}^{*}(k/k)\right]\left[\boldsymbol{s}^{*}{}_1(k/k)-\boldsymbol{s}^{*}(k/k)\right]^{T}\right\}p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=1/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right]+$$
$$+\left\{\boldsymbol{P}_N(k/k)+\left[\boldsymbol{s}^{*}{}_N(k/k)-\boldsymbol{s}^{*}(k/k)\right]\left[\boldsymbol{s}^{*}{}_N(k/k)-\boldsymbol{s}^{*}(k/k)\right]^{T}\right\}p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=N/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right]. \quad (11)$$

У справедливості виразу (11) можна переконатись, якщо згадати, що точність оцінювання за означенням описують формулою

$$\boldsymbol{E}\left\{\left[\boldsymbol{s}(k)-\boldsymbol{s}^{*}(k/k)\right]\left[\boldsymbol{s}(k)-\boldsymbol{s}^{*}(k/k)\right]^{T}/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right\}=$$
$$=\int\left[\boldsymbol{s}(k)-\boldsymbol{s}_1^{*}(k/k)\right]\left[\boldsymbol{s}(k)-\boldsymbol{s}_1^{*}(k/k)\right]^{T}\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right]d\,\boldsymbol{s}(k)$$

де густина розподілу $\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right]$ являє собою зважену суму (6).

Узагальнення рівнянь фільтрації на випадок апріорної невизначеності щодо ймовірностей появи несправностей. Даний підрозділ присвячено питанням оцінки величини $\boldsymbol{y}$ темпі реального часу з використанням принципів адаптивного прийому та елементів самоорганізації.

Модель каналу спостережень (2) залишається працездатною і у тому випадку, коли апріорні дані про ймовірність аномальних похибок повністю відсутні. Проте, неявно вважається, що послідовність $\boldsymbol{\varphi}(k)$ залишається незалежною на кожному кроці, а ймовірність справної роботи каналу спостережень є величина постійна, але невідома для спостерігача. Для того, щоб залишатись у рамках байєсової методології робиться припущення про рівномірний закон розподілу величини $q_1(k)$ у діапазоні [0, 1]. Як і у попередньому підрозділі, $\boldsymbol{s}^{*}(k/k)$ буде обчислюватись у вигляді зваженої суми

$$\boldsymbol{s}^{*}(k/k)=\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{s}^{*}{}_i(k/k)p\left[\boldsymbol{\varphi}(k)=i/\boldsymbol{Y}_1^{k}\right]. \quad (12)$$

Різниця полягає у тому, що замість апріорно заданої величини $q_i(k)$, яка входить до виразу (10) необхідно підставляти середнє значення цієї

імовірності $\overline{q_i(k)}$. Покажемо, що його можна обчислювати за формулою

$$\overline{q_i(k)} = \int_0^1 q_1 \boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right] \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1},\ q_1\right] \left\{\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]\right\}^{-1} dq_1. \quad (13)$$

Для цього представимо апостеріорну ймовірність $p\left[\boldsymbol{\varphi}(k) = 1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right]$ як

$$p\left[\boldsymbol{\varphi}(k) = 1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right] = \int_0^1 \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{\varphi}(k) = 1,\ q_1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right] d\, q_1 = \quad (14)$$

$$= \int_0^1 \boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right] p\left[\boldsymbol{\varphi}(k) = 1 / \boldsymbol{Y}_1^k, q_1\right] dq_1.$$

Результат застосування формули Байєса до $\boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right]$ дає формулу першого

$$\boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right] = \boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right] \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, q_1\right] \left\{\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]\right\}^{-1}, \quad (15)$$

де $\boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]$ – функція, відома з попереднього циклу обчислень. Другий співмножник у (14) за умови фіксованого значення q_1 можна представити як

$$\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{\varphi}(k) = 1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right] = \frac{q_1 \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k) = 1, q_1\right]}{q_1 \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k) = 1, q_1\right] + (1 - q_1) \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k) = N, q_1\right]}. \quad (16)$$

Оскільки результат спостережень $\boldsymbol{y}(k)$ явно не залежить від q_1, то

$$\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k) = 1, q_1\right] = \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k) = 1\right].$$

Знаменник (16) являє собою густину розподілу $\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, q_1\right]$. Об'єднання (14)–(16) дає результат:

$$p\left[\boldsymbol{\varphi}(k) = 1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right] = \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k) = \right.$$

$$\left. = 1\right] \left\{\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right]\right\}^{-1} \int_0^1 q_1 \boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right] dq_1, \quad (17)$$

а подвійне осереднення знаменника (16) по q_1 та $\boldsymbol{\varphi}(k)$ дозволяє виразити його через q_1 та $\boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right]$, $\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k) = i\right]$, тобто

$$\boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right] = \int_0^1 \boldsymbol{\pi}\left[q_1, \boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right] dq_1 = \int_0^1 \boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right] \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, q_1\right] dq_1 =$$

$$= \int_0^1 \left\{q_1 \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k) = 1\right] + (1 - q_1) \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k) = N\right]\right\} \boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}\right] dq_1 =$$

$$= \sum_{i=1}^{N} \overline{q_i}(k) \boldsymbol{\pi}\left[\boldsymbol{y}(k) / \boldsymbol{Y}_1^{k-1}, \boldsymbol{\varphi}(k) = i\right],\ i = 1, N;$$

де $\overline{q_1}(k) = \int_0^1 q_1 \boldsymbol{\pi}\left[q_1 / \boldsymbol{Y}_1^k\right] dq_1$; $\overline{q_N}(k) = 1 - \overline{q_1}(k)$.

Результати моделювання. Оскільки розроблені пристрої відновлення мають якісні показники, що залежать від результатів поточних спостережень, а взаємодіючі інформаційні потоки, за фізичною природою – стохастичні, то у основу оцінювання ефективності розроблених фільтрів слід покласти можливість виконання цифрового статистичного моделювання за методом Монте–Карло. У якості ілюстративного прикладу розглянемо процес посадки повітряного судна (ПС) у фазі планерування. Суть цієї фази полягає у спрямуванні ПС за допомогою посадкового радіомаяка уздовж вибраної траєкторії посадки під кутом приблизно у -3^0 до площини злітно-посадкової смуги. У якості математичної моделі зміни кута місця ПС вибрана модель Зінгера [23] другого порядку, згідно якої перехідна матриця $\boldsymbol{\Sigma}(k+1,k)$ у (3) має вигляд $\boldsymbol{\Sigma}(k+1,k) = \begin{bmatrix} 1 & \dot{O} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, де T – інтервал дискретизації, який становить 0.0247 с, що відповідає частоті сканування радіомаяка у *40.5 Гц*. Інші необхідні апріорні дані наведені у табл. 1.

У даному обчислювальному експерименті апостеріорний розподіл $\boldsymbol{\pi}[\boldsymbol{s}(k)/\boldsymbol{Y}_1^k]$ апроксимувався на інтервалі [0, 1] рівномірною сіткою, яка складалась з 50 точок. Середнє значення ймовірності справного стану каналу спостережень на кожному такті обчислювалось на основі співвідношення (16). На рис. 2а показана одна з можливих реалізацій потоку первинних вимірювань кута місця ПС з аномальними похибками і результат її обробки адаптивним фільтром, а на рис. 2б представлена поточна точність оцінювання.

Теоретичні значення $\boldsymbol{P}_{11}(k/k)$ розраховувались за формулами (11), (13), а фактичні значення $\boldsymbol{P}_{11}(k/k)$ отримувались шляхом осереднення 50-и реалізацій оцінок, що вироблялися адаптивним фільтром. Розходження між теоретичними та експериментальними значеннями на перших 50–60 тактах обчислювального процесу можна пояснювати ефектом самонавчання адаптивного фільтра з метою подолання початкової апріорної невизначеності, про що свідчать рис. 3 та рис. 4. На рис. 3а представлена апостеріорна ймовірність появи аномальних похибок, а її середнє значення змінюється у часі так, як показано на рис. 3б.

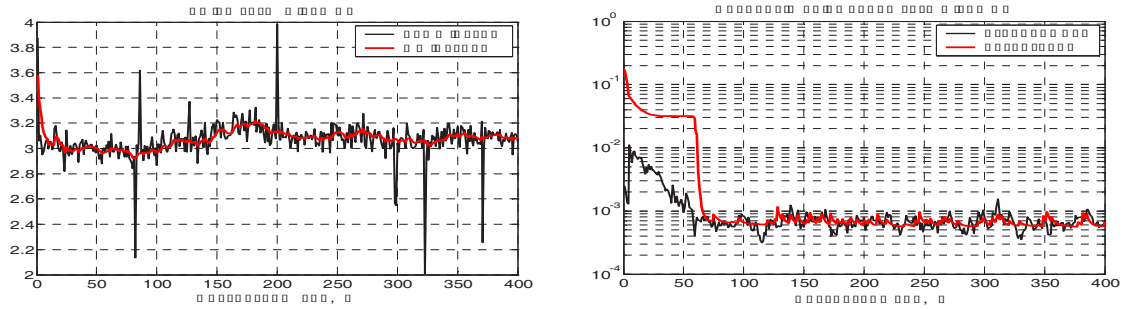
Таблиця 1

Апріорні дані для обчислювального експерименту

$T = 0.0247,\ M = 50,\ \mathrm{q}_1(k) = 0.80,\ \boldsymbol{R}(\mathrm{k}+1) = 0.0036,\ \boldsymbol{Q}(\mathrm{k}) = 0.0001,\ N = 1,\ 25$

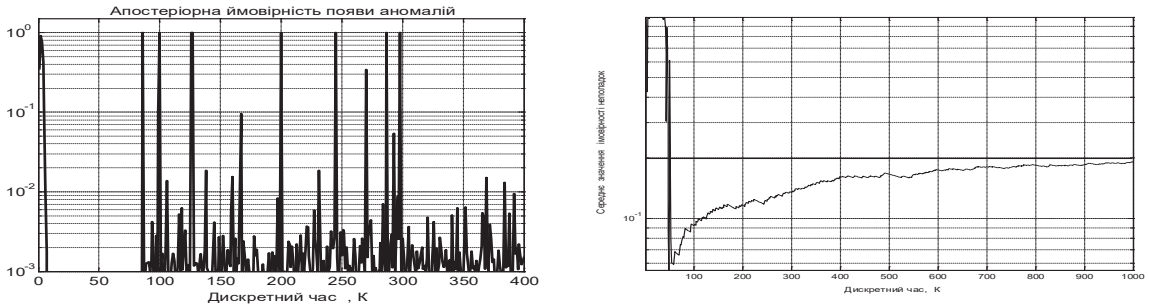
$\boldsymbol{H} = [1 \quad 0]$,

$$\boldsymbol{s}(0) = \begin{bmatrix} 3.000 \\ 0.000 \end{bmatrix}, \qquad \boldsymbol{s}^*(\%) = \begin{bmatrix} 2.900 \\ 0.006 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{P}(\%) = \begin{bmatrix} 0.640 & 0.000 \\ 0.000 & 0.040 \end{bmatrix}.$$



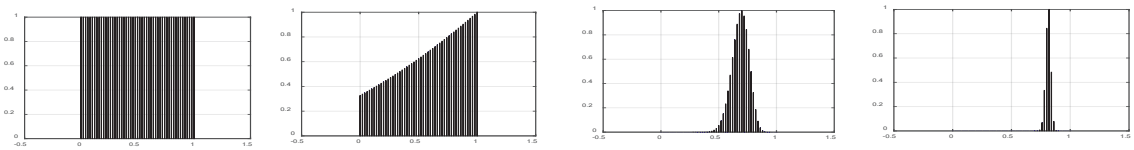
а) б)

Рис. 2. Результат обробки потоку первинних спостережень адаптивним фільтром



а) б)

Рис. 3. Часові характеристики процесу адаптації



k=0 *k=2* *k=50* *k=400*

Рис. 4. Зміна у часі густини розподілу π[s(k)/Y1k] у процесі адаптації

На рис. 4 показана еволюція густини розподілу ймовірності справного стану каналу спостережень у процесі адаптації.

З наведених результатів неважко помітити, що після того як статистика аномалій вивчена, процес збіжності до істинного значення ймовірності справного стану каналу спостережень 0.8 проходить вельми повільно. Це означає, що адаптивні схеми фільтрації слід використовувати у тих випадках, коли питання оптимізації перехідного процесу не стоїть на порядку денному, а динаміка зміни у часі інформаційного параметру значно повільніша за динаміку адаптивного фільтра.

Висновки. За результатами представленої роботи можна стверджувати, що за характеристиками точності адаптивний фільтр близький до оптимального фільтра, який генерує псевдобайєсові оцінки вектора стану системи, але на відміну від останнього не потребує апріорних даних щодо ймовірності появи аномалій. Проте його реалізація потребує значних обчислювальних ресурсів, що пов'язано з апроксимацією неперервної густини розподілу $\boldsymbol{\pi[s(k)/Y_1^k]}$ значеннями у дискретних точках та подальшим зберіганням цих значень у процесі поточних обчислень.

Вельми повільна збіжність оцінок ймовірності справного стану каналу спостережень означає, що представлену адаптивну схему фільтрації доцільно використовувати у тих випадках, коли динаміка інформативних параметрів значно повільніша за динаміку адаптивного фільтра.

Список літератури:

1. Blanke M., M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki. Diagnosis and Fault Tolerant Control. Springer, –Verlag, Berlin, Heidelberg. 2016. p. 695.

2. Thirumarimurugan M., Bagyalakshmi N., Paarkavi P. Comparison of fault detection and isolation methods: A review. 10th International Conference Intelligent Systems and Control (ISCO). 2016. P. 1–6.

3. Escobet T., Bregon A.B, Puig P. Fault Diagnosis of Dynamic Systems Quantitative and Qualitative Approaches. Springer International Publishing, 2019. p. 462.

4. Zolghadri A., Henry D., Cieslak J., Efimov D., Goupil P. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control and Guidance for Aerospace Vehicles, From Theory to Application. Springer-Verlag, London, 2014.

5. Varga. A. Solving Fault Diagnosis Problems. Linear Synthesis Techniques. Studies in Systems, Decision and Control. Springer International Publishing. Vol. 84. 2017, p. 394.

6. Ossmann D., Varga A. Detection and identification of loss of efficiency faults of flight actuators. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 25: 53-63, 2015.

7. Friedland B. Treatment of bias in recursive filtering / B. Friedland // IEEE Trans. Autom. Contr. 1969. Vol. AC. 14. № 4. P. 359–367.

8. Kim K. H., Lee J. G., Park C. G. Adaptive two-stage Kalman filter in the presence of unknown random bias, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 20, no. 7, P. 305–319, 2006.

9. Chen F. C., Hsieh C. S. Optimal multistage Kalman estimators, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 45, no. 11, P. 2182–2188, 2000.

10. Kitanidis P. K. Unbiased minimum-variance linear state estimation, Automatica, vol. 23, no. 6, P. 775–778, 1987.

11. Gillijns S., Moor B. Unbiased minimum-variance input and state estimation for linear discrete-time systems. Automatica, vol. 43, no. 1, P. 111–116, 2007.

12. Hsieh C.S. Optimal minimum-variance filtering for systems with unknown inputs, in Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA ’06), vol. 1, P. 1870–1874, Dalian, China, June 2006.

13. Volovyk A., Kychak V. Detection Filter Method in Diagnostic Problems for Linear Dynamic Systems. Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia, 2021, Iss. 84, P. 30–39.

14. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления. Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1980. 400 с.

15. Kim Pyung Soo. A Fault Detection Algorithm using Multiple Residual Generation Filters Journal of Telecommunication Electronic and Computer Engineering 2017 Vol. 9, No 3. P. 12–17.

16. Tipaldi Massimo, and Bruenjes Bernhard. Survey on Fault Detection, Isolation, and Recovery Strategies in the Space Domain, Journal of Aerospace Information Systems, Vol. 12, No. 2 (2015), P. 235–256.

17. Baranowski Jerzy, Bania Piotr, Prasad Indrajeet, Cong Tian. Bayesian fault detection and isolation using Field Kalman Filter. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing 2017

18. Кичак В. М. Методи та пристрої обробки радіосигналів бортових авіаційних систем посадки: монографія / В.М. Кичак, Ю.М. Воловик, А.Ю. Воловик. Вінниця : ВНТУ, 2011. 208 с.

19. Volovyk A.Yu., Kychak V.M., Havrilov D.V. Discrete Kalman Filter Invariant to Perturbations. Acta Polytechnica Hungarica, 2021? Vol. 18, No. 10, pp. 21–41.

20. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления. Пер. с англ. / Под ред. Я.З. Цыпкина. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1980. 400 с.

21. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами. Пер. С англ. Под ред. Б.Р. Левина. М. : Радио и связь, 1982. 392 с.

22. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Рапопорт Л.Б. Математическая теория автоматического управления: учебное пособие. М. : ЛЕНАНД, 2019. 500 с., ISBN 978–5–9710–6486–2.

23. Зингер Р.А. Оценка характеристик и выбор фильтров сопровождения в реальном масштабе времени для тактических систем вооружения / Р.А. Зингер, М. С. Бенке. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1971. № 1. С. 17–26.

Volovyk A.Yu. ADAPTIVE ESTIMATION OF THE DYNAMIC SYSTEMS STATE IN THE PRESENCE OF THE OBSERVATION CHANNEL FAULTS

In practice, there are cases of sudden changes in the physical systems dynamics, that are the reason for the deterioration of their quality factors. Such changes are usually classified as malfunctions or failures. As usual, to maintain the constant performance of the system, a procedure is used to compensate for the faults influence due to hardware-architectural or functional redundancy. For this purpose, the model of the observation channel was corrected. The model doesn’t exclude the appearance of different accuracy results, including anomalous ones. The synthesis result is presented as a filter with reduced sensitivity to anomalous errors. The resistance of the synthesized filter to anomalous errors is achieved by weight averaging the estimates of a filter pair operating in parallel. Each of the filters is tuned to the corresponding hypothesis about the observation channel state. The a posteriori probabilities of the operational condition of the observation channel and its alternatives are used as weight factors. Since the calculation of a posteriori probabilities requires the results

of current observations, the synthesized filter is non-linear with respect to the results of observations. In this regard, its practical implementation requires preliminary statistical modeling using the Monte Carlo method.

To overcome a priori uncertainty about the probability of anomalous errors occurrence, a variant of constructing an adaptive filter was proposed. In this filter, instead of a priori given values of the anomalous errors occurrence probabilities, their average values were used. A demonstrative example is given that proves the operability of the synthesized filter. The limits of its application are determined in terms of the assessment quality and the duration of the adaptation process. This is an estimate of the accuracy of the current filtering results.

Key words: *adaptation, anomalous errors, pseudo-Bayesian estimates, observation results of different accuracy, Kalman filter.*

УДК 691.7.068.4
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/08

Омецинська Н.В.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Гуйда О. Г.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Вишемірська Я.С.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Мінаєва Ю.Ю.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙНИХ ТРАКТІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ТЕХНОЛОГІЙ TDM, WDM, UDWDM ТА СОЛІТОННИХ СИСТЕМ

Поряд з основними чинниками, що викликають спотворення оптичних імпульсів при високошвидкісній передачі цифрових даних, таких як згасання потужності оптичного сигналу, поляризаційна дисперсія моди, нелінійні ефекти, вагомим чинником є хроматична дисперсія.

Актуальною проблемою, що потребує систематичного вирішення при модернізації існуючих та розбудові нових ВОЛЗ, є попередній вибір лінійного оптичного волокна (ОВ) з потрібними передавальними характеристиками. Постачальник пропонує різні типи одномодових ОВ, які істотно різняться за своїми характеристиками та вартістю. При виборі ОВ потрібно враховувати не тільки дисперсійні характеристики волокна (хроматична дисперсія і нахил хроматичної дисперсії), але й такі характеристики як діаметр поля моди та ефективну площу, коефіцієнт згасання оптичної потужності та локальні втрати потужності сигналу за рахунок оптичного випромінення на макровигинах волокна. Передавальні характеристики оптичного волокна залежать від його конструктивних параметрів – профілю показника заломлення (ППЗ) в поперечному перерізі волокна. Оптичні волокна із заданим профілем показника заломлення (ПЗ) виготовляються із компонентного кварцового скла за добре відпрацьованими на даний час технологіями. Однак, через високу вартість технологічного пошуку конструктивних параметрів волокон з наперед заданими передавальними характеристиками, важливим є попереднє математичне моделювання потрібного волокна. Повний аналіз передавальних характеристик одномодового ОВ може бути виконаним за відомої спектральної залежності коефіцієнта фази напрямленої волокном моди та розподілу в поперечному перерізі волокна її електромагнітного поля. Ці величини знаходяться в результаті розв'язання хвильових рівнянь, для яких немає точного аналітичного розв'язку, за довільного профілю ПЗ, тому застосовуються наближені методи їх розв'язання. Ефективність попереднього математичного моделювання волокна з наперед заданими передавальними характеристиками суттєво підвищується, якщо при числовому програмному підході до аналізу передавальних характеристик ООВ застосовується методика багатофакторного перебору параметрів профілю ПЗ.

Ключові слова: *одноxвильовий волоконно-оптичний канал, технологія WDM, ТДМ-сигнал, щільного хвильового мультиплексування*

Постановка проблеми. Як відомо, одним із способів збільшення пропускної здатності одноxвильового волоконно-оптичного каналу, організованого за технологією TDM розділення різних сигналів в часі (Time Division Multiplexing – накладання розділене в часі), є збільшення швидкості передавання даних, значення якої обмежується дисперсійними явищами у волоконно-оптичному світловоді (дисперсія хроматична і дисперсія поляризованої моди) та швидкодією електронних компонент системи передачі.

У технології WDM (Wavelength Division Multiplexing – ущільнення за довжинами хвиль, або Спектральне ущільнення каналів передачі),

немає багатьох обмежень і технологічних труднощів, властивих технології TDM. Для підвищення пропускної здатності, замість збільшення швидкості передавання в однохвильовому каналі, як це реалізовано в технології TDM, в технології WDM збільшують число каналів (кожний канал на своїй довжині хвилі), які використовують для одночасного передавання різних сигналів по одному і тому самому волокну. Отже, на кожній носійній довжині хвилі в системі WDM може передаватися ТДМ-сигнал. Системи передачі, побудовані за цим принципом, гібридними системами TWDM. На практиці вживають також і термін: ВОСП зі спектральним ущільненням каналів (ВОСП СРК).

В основі технології спектрального розділення – створення сукупності каналів, кожен з яких передається на своїй довжині носійної хвилі з використанням за середовище передавання одного й того самого оптичного волокна та наступним розподілом сигналу кожного каналу на свій приймач.

Система WDM багато в чому схожа на традиційну систему TDM. Сигнали різних довжин хвиль, що генеруються декількома оптичними передавачами, об'єднуються оптичним мультиплексором (ОМ – Optical Multiplexer, MUX (Multiplexer)) в багатоканальний груповий оптичний сигнал. При великих відстанях передачі групового сигналу, на лінії зв'язку встановлюється один або декілька оптичних підсилювачів. Демультиплексор DEMUX (Demultiplexer) приймає об’єднаний сигнал, виділяє з нього початкові канали різних довжин хвиль і спрямовує їх на відповідні фотоприймачі. На проміжних вузлах деякі канали можуть бути додані або виділені з об’єднаного сигналу за допомогою мультиплексорів введення/виведення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження способів підвищення пропускної здатності волоконно-оптичних лінійних трактів при застосуванні технологій tdm, wdm, udwdm та солітонних систем висвітлюється в рабатах І.-В. О. Сергієнко, О.О. Манько.

Постановка завдання. Провести аналіз способів підвищення пропускної здатності волоконно-оптичних лінійних трактів при застосуванні технологій tdm, wdm, udwdm та солітонних систем.

Виклад основного матеріалу дослідження. Теоретично можлива передача в будь-якому оптичному діапазоні довжин хвиль, проте тривалий час практичні обмеження залишали для використання в системах WDM порівняно вузький діапазон в околі довжини хвилі 1550 нм, оскільки оптичні підсилювачі на волокнах, легованих ербієм (EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier), працюють саме в цьому діапазоні. У разі використання EDFA відбувається підсилення групового WDM сигналу без корекції його форми. Підсилювачі EDFA забезпечують безпосереднє посилення оптичних сигналів, без їх перетворення в електричні сигнали та в зворотньому напрямку (демодуляція), мають низький рівень шумів, а їх робочий діапазон довжин хвиль практично точно відповідає вікну прозорості кварцового оптичного волокна. Саме завдяки появі підсилювачів з таким поєднанням якостей, лінії зв'язку і мережі на основі систем DWDM (стали економічно привабливими.

Підсилювач EDFA складається з відрізка волокна, легованого ербієм. В такому волокні сигнали певних довжин хвиль можуть посилюватися за рахунок енергії зовнішнього випромінювання накачування.

В простих конструкціях EDFA посилення відбувається в достатньо вузькому діапазоні довжин хвиль – приблизно від 1525 нм до 1565 нм. В ці 40 нм уміщається декілька десятків каналів DWDM.

Розробка різних схем накачування потужності дозволила створити підсилювачі EDFA з розширеним робочим діапазоном від 1570 нм до 1605 нм (L-діапазон). Такі підсилювачі також називають довгохвильовими підсилювачами LWEDFA (Long Wavelength EDFA).

Необхідність ефективно використовувати прокладений кабель привела до значного збільшення числа каналів, що передаються по одному волокну, і до зменшення частотного інтервалу між ними. Системи з частотним інтервалом Δ між каналами, що дорівнює 100 ГГц ($\Delta\lambda \approx 0{,}8$ нм на довжині хвилі 1550 нм) і менше називають системами щільного хвильового мультиплексування DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). При цьому системи з більшим інтервалом частот між каналами називають системами CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) або системами грубого хвильового мультиплексування; зазвичай до них застосовують також і назву – системи WDM. Сучасні WDM системи на основі стандартного частотного плану (ITU-T Rec. G.692) можна підрозділити на три групи:

– грубі WDM (Coarse WDM – CWDM) – системи з шириною каналу не менше 200 ГГц, що дають змогу мультиплексувати не більше 16 каналів.

– щільні WDM (Dense WDM – DWDM) – системи з шириною каналу не меншого 100 ГГц, що дають змогу мультиплексувати не більше 32 каналів.

– високощільні WDM (High Dense WDM – HDWDM) – системи з шириною каналів 50 Ггц і менш, що дають змогу мультиплексувати не менше 64 каналів. (ITU-T Rec. G.692, ITU-T Rec. G.694.1, ITU-T Rec. G.694.2).

В стані лабораторних випробовувань та сертифікації перебуває UDWDM (Ultra Dense Wave Division Multiplexing) – для яких є можливою пропускна здатність до1Tbit/s по єдиному волокну використовуючи тільки одне спектральне вікно С.

В лабораторних умовах досягнуто використання 84 каналів з шириною розділення 1,5 Ггц. Подібні результати свідчать про можливість подальшого спектрального ущільнення каналів, яка відповідає 1/64 прийнятої на сьогодні 100 ГГц частотної сітки. Однак, подібне UDWDM ущільнення ставить вимогу надзвичайно високої стабільності до збереження довжини хвилі, що і є основним предметом нашої дисертації.

Сучасні тенденції розвитку телекомунікацій свідчать про перспективність волоконнооптичних систем передачі, в яких поєднуються часове мультиплексування TDM одного з рівнів: STM-16 на 2,5 Гбіт/с; STM-64 на 10 Гбіт/с; STM-256 на 40 Гбіт/с – який на сьогоднішній день у сукупності з попередніми стандартами є широко застосованим в індустрії; а також і STM-1024 на 160 Гбіт/с в межах однієї довжини хвилі, і хвильове мультиплексування WDM. На систему передачі, що використовує ці технології, накладаються їхні сумарні обмеження. З одного боку, швидкість передачі окремої TDM системи, що входить складовою частиною у WDM систему, визначає максимальну довжину лінійного тракту (дистанцію між передавачем та приймачем), для конкретного типу лінійного оптичного волокна з конкретними дисперсійними характеристиками. При цьому використання WDM технології дозволяє у N разів збільшити пропускну здатність одного волокна, де N – кількість спектральних каналів у об'єднаному сигналі.

Зауваження (для усунення неоднозначності трактування терміна). Пропускна спроможність волоконно-оптичного тракту оцінюється величиною добутку швидкості передачі бітів, B, на дистанцію передачі L між оптичним передавачем та приймачем. Вимірюється відповідно в км*Гбіт/с. Це для однієї носійної хвилі. За передачі по одному оптичному каналу сигналу TDM із швидкістю передачі SDH-системи (Synchronous digital hierarchy – синхронна цифрова ієрархія), що використовує рівень STM-64 (Synchronous transport module – синхронний транспортний модуль рівня STM-64), тобто 10 Гбіт/с, на відстань 100км, маємо величину пропускної спроможності лінійного тракту в 1000 (км*Гбіт/с). Для порівняння: для лінійного тракту на багатомодовому волокні вибором оптимального градієнтного профілю показника заломлення (цей профіль описується розподілом вздовж діаметра поперечного перерізу ОВ показника заломлення і формується процесі промислового виробництва волокна) мінімізують міжмодову дисперсію і досягають найбільших значень пропускної спроможності до 2 (км*ГГц). Якщо передається груповий сигнал з розділенням каналів за довжиною носійних хвиль, то говорять лише про сумарну швидкість передачі по одному волокну, яка збільшується пропорційно до числа цих каналів: 128 каналів х 10 Гбіт/с дають сумарну швидкість 128 Тбіт/с.

Для підвищення пропускної спроможності лінійного тракту необхідно використовувати оптичне волокно з меншим коефіцієнтом D [пс/(нм·км)] хроматичної дисперсії. І в одноканальних TDM системах це застосовується. Зокрема, використовують оптичне волокно з якомога меншим коефіцієнтом хроматичної дисперсії на робочій довжині хвилі.

Однак, у WDM системах має місце нелінійна взаємодія між окремими каналами (її інтенсивність сягає максимуму при нульовому коефіцієнті хроматичної дисперсії волокна), а також й нелінійні ефекти хроматичної, фазової та поляризаційної дисперсії.

Серед нелінійних ефектів у першу чергу слід виділити чотирихвильове змішування: якщо система WDM використовує носійні частоти f1, f2, f3, …, fn, чотирихвильове змішування викликає появу нових сигналів на частотах 2fi – fj, та fi + fj – fk. Ці сигнали виникають як перехресні перешкоди по відношенню до існуючих сигналів та збільшуються зі зменшенням інтервалів між каналами, причому у волокнах з меншою дисперсією вплив перехресних перешкод підсилюється. Ці комбінаційні складові можуть стати причиною підвищення коефіцієнта помилок на приймачі сигналу. Окрім цього, за рахунок нелінійних перетворень зменшується енергія корисного сигналу, і ці втрати можуть призвести до зменшення довжини регенераційної дільниці за потужністю.

Таким чином, хроматична дисперсія відіграє ключову роль в ослабленні впливу нелінійних явищ, – її збільшення веде до зменшення нелінійних перетворень, які характеризуються появою «паразитних» сигналів. З іншого боку – збільшення дисперсії призводить до зменшення максимальної

довжини лінійного тракту. Отже, системи WDM потребують застосування оптичних волокон з компромісними дисперсійними характеристиками, при цьому значення дисперсії в робочому діапазоні хвиль WDM системи повинне бути досить малим, але не дорівнювати нулю. Такі типи оптичних волокон були створені і отримали назву волокон з ненульовою зміщеною дисперсією, NZDSF (non-zero dispersion shift fiber). Як приклад можна навести волокно True Wave фірми Lucent Technologies та волокна SMF-LS і LEAF™ фірми Corning. В цих волокнах довжина λ_{0*} хвилі нульової дисперсії (величина D коефіцієнта хроматичної дисперсії має нульове значення) зміщується за межі вікна 1550 нм (до 1565, 1565-1620), внаслідок чого дисперсія стає достатньо великою, щоб подавити впливу чотирихвильового змішування, і разом з тим достатньо малою, щоб не накладати жорсткого обмеження на дистанцію передачі, спричиненого розширенням імпульсу в часі.

У технології TDM пропускна здатність збільшується виключно за рахунок збільшення швидкості передачі бітів. Наскільки великою може бути зроблена ця швидкість – в межах певних фундаментальних обмежень оптичного волокна – залежить від електронних компонентів, що використовуються. Щоб одержувати дані від кожного джерела, зберігати їх, передавати протягом відповідних часових інтервалів, зчитувати і коректно доставляти користувачу, потрібне застосування цифрових інтегральних схем. Переважна більшість цих цифрових компонент повинна працювати зі швидкістю, що дорівнює або є близькою до швидкості передачі системи TDM. Не зважаючи на те, що швидкодія електронних пристроїв продовжує рости, технологія TDM завжди матиме обмеження через необхідність установки найсучаснішого устаткування.

До термінального електронного устаткування для каналів на окремих довжинах хвиль системи WDM висуваються певні вимоги, як і в системах TDM. Однак, електронне устаткування в окремому спектральному каналі повинне підтримувати тільки швидкість передачі по цьому каналу, а не сумарну швидкість групового сигналу. Таким чином, повна пропускна здатність лінії зв'язку не обмежена явно швидкістю роботи електронних пристроїв, що використовуються. За необхідності, повну пропускну здатність можна збільшити у будь-який момент, додавши в існуючу систему WDM декілька додаткових спектральних каналів.

Отже, максимально швидкісну лінію зв’язку TDM, яку тільки можна створити з використанням найсучаснішого електронного обладнання, в системі WDM можна впровадити як один з багатьох спектральних каналів.

На останок варто згадати спроби використати властивість солітонного розповсюдження хвильового пакету та спроби їх використання в ВОЛЗ.

Зі збільшенням швидкості передачі вчені зіткнулися з низкою технологічних складностей, подолання яких мусіло задовольняти ряд взаємовиключних вимог, щодо ширини (12 пс), стійкості одиночного імпульсу, а також потужності такого генерованого імпульсу, з метою його передавання на десятки кілометрів без частого підсилення та корекції. Солітони, відкриті в 19-тому столітті, як явище в пружному середовищі – хвильові пакети спеціальної форми, які розповсюджуються в сильно-дисперсному середовищу на великі відстані без істотних втрат в потужності та формі. Подібні хвильові пакети стало можливо створювати і для оптичних хвиль, з застосування світлодіодних лазерів накачки. На початку 90-х років 20-го століття були отримані результати 320 Гб/с на довжині реґенераційного відрізку більше ніж тисяча кілометрів. При чому досягалося не лише збереження форми і потужності, але і відсутність спотворення характеристик імпульсів при зіткненні солітонів, що демонструвало властивості, характерні для частинок.

Висновки. По при видатні властивості солітонних імпульсів були виявлені декілька обмежень, які призвели до гальмування розробок оптосолітонних ліній зв’язку.

При збільшенні швидкості передачі, відстань між інфомаційними імпульсами, якими в даному випадку є солітон, зменшується. При малій відстані не вдається уникнути взаємодій між солітонами, що призводить до колапсу останніх. Іншими перешкодами застосування солітонів є притаманні їм явища шуму когерентного підсилення (ефект Гордона–Хауса), та акумуляція підсиленого спонтанного випромінювання (ASE).

Без застосування спеціальних заходів вдалося забезпечити передачу солітоннимим системами імпульсів шириною дл 2пс, зі швидкістю 40 Гб/с без істотного ефекту взаємодії. Застосовуючи спеціальні заходи, як то модуляцію амплітуди сусідніх солітонів, та їх поляризацію в ортогональних площинах, можна довести характеристики до 160 Гб/с на 250 км. Що не перевищує показників для стандартних волокон зіз використанням супергаусового, чи нюквістового імпульсу.

На додачу, широке розповсюдження методики попередньої частотної модуляції (ПЧМ, або чір-

пування), порушує порушує баланс між дисперсійними та нелінійними ефектами, які необхідні для існування солітонів. Таким чином ці два підходи на сьогоднішній день є взаємовиключними, з очевидною перевагою методів чірпування та пасивної компенсації дисперсії.

Список літератури:

1. Власов О. М. Підвищення пропускної спроможності волоконно-оптичних лінійних трактів на одномодових світловодах / О. М. Власов, Н. В. Омецинська, Іван-В. О. Сергієнко // Матеріали VII наукової конференції ДУІКТ «Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті», Харків, 25–26 листопада, 2010. С. 132–137.

2. Манько А.А. Методы улучшения дисперсионных характеристик спектрально-селективных оптических элементов на основе рассеяния света // Зв'язок. 2012. № 4. С. 32–35

3. Sergijenko Ivan-V. Optimal values of chirp parameter of optical transmitters to compensation of the chromatic dispersion in tracts / Ivan-V. Sergijenko, Natalia Ometsyns'ka // Материалы 6-й Международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2010», 19–24 апреля 2010. Севастополь. 2010. С. 47.

4. О.М. Власов, Н.В.Омецинська, І.О. Сергієнко. Дисперсія поляризованої моди у волоконно-оптичних лініях зв'язку // Зв'язок. Київ, 2011 р. № 4. С. 15–22.

Ometsynska N.V., Guida O.G., Vyshemirska Ya.S., Minaieva Yu.Yu. ANALYSIS OF THE METHODS OF INCREASE THE BAND CAPACITY OF FIBER-OPTIC LINE TRACTS USING THE TECHNOLOGIES OF TDM, WDM, UDWDM AND SOLITON SYSTEMS

Along with the main factors that cause the distortion of optical pulses during high-speed digital data transmission, such as optical signal power attenuation, polarization mode dispersion, nonlinear effects, chromatic dispersion is an important factor.

An urgent problem that requires a systematic solution in the modernization of existing and construction of new optical fiber lines is the preliminary selection of a linear optical fiber (OL) with the required transmission characteristics. The supplier offers different types of single-mode OBs, which differ significantly in their characteristics and cost. When choosing an OB, it is necessary to take into account not only the dispersion characteristics of the fiber (chromatic dispersion and the slope of the chromatic dispersion), but also such characteristics as the diameter of the mode field and the effective area, the attenuation coefficient of the optical power and local losses of the signal power due to optical radiation at the macrobends of the fiber. The transmission characteristics of an optical fiber depend on its design parameters – the profile of the refractive index (RI) in the cross-section of the fiber. Optical fibers with a given refractive index (RI) profile are manufactured from component quartz glass using currently well-proven technologies. However, due to the high cost of the technological search for design parameters of fibers with predetermined transmission characteristics, preliminary mathematical modeling of the desired fiber is important. A complete analysis of the transmission characteristics of a single-mode OV can be performed based on the known spectral dependence of the phase coefficient of the mode directed by the fiber and the distribution of its electromagnetic field in the cross section of the fiber. These quantities are the result of solving wave equations for which there is no exact analytical solution, for an arbitrary profile of the software, therefore, approximate methods of their solution are used. The effectiveness of the preliminary mathematical modeling of the fiber with predetermined transmission characteristics is significantly increased if the method of multifactor selection of the parameters of the PZ profile is used in the numerical program approach to the analysis of the transmission characteristics of the fiber optic cable.

Key words: *single-wave fiber optic channel, WDM technology, TDM signal, dense wave multiplexing.*

УДК 004.621.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/09

Розорінов Г.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сірченко І.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ В МЕРЕЖАХ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АУДІОВІЗУАЛЬНОГО КОНТЕНТУ

Пропонується методика і тести для експертної економічної оцінки ефективності застосування систем захисту інформації в мережах розповсюдження аудіовізуального контенту.

Показано, що при економічній оцінці системи крім витрат на неї необхідно також враховувати взаємодію між підсистемами, що входять в її склад (рівні захисту, рубежі захисту і таке інше).

Відповідно до цієї методики необхідно відповісти на сім груп питань, на підставі яких експертна система ухвалює рішення про доцільність прийняття системи захисту інформації. Аналіз вимог до системи захисту інформації проводиться відповідно до аналізу спрямованості її діяльності, функціями і процедурами захисту інформації на об'єкті.

Проте при аналізі цих питань виникають такі основні проблеми: контроль доступу до вразливої і секретної інформації; профілі секретності доступу: забезпечення і створення свідомого відношення до секретності в організації, розробка документації, що визначає політику відносно секретності на підставі нормативних документів, При цьому необхідно враховувати специфічні труднощі й в першу чергу до них слід віднести розподіл пріоритетів для інформації, що вимагає захисту, шляхом визначення відносної уразливості і секретності інформації. Крім цього, до основних проблем, які виникають при отриманні відповідей на поставлені питання, можна віднести зміни в технології захисту, які можуть бути використані як зловмисниками, так і захисниками інформації, а також встановити вимоги до фінансування заходів по захисту інформації.

Складнощі, які виникають при вирішенні цих питань зв'язані також з необхідністю уникнення конфліктів із-за ресурсів, розробки планів реалізації і запобігання конфліктам при розвитку системи захисту.

Аналіз відповідей на поставлені питання показує, що вони не мають чіткої межі. На питання можна дати декілька однотипних відповідей, що може привести до неякісної оцінки. Суворі правила, закладені в експертні системи, не дають оптимального рішення.

Прийнявши припущення, що відповідь несе в собі деяку нечіткість, зроблено висновок, що для експертної системи необхідно використовувати апарат нечіткої логіки. Тоді відповідно до отриманих відповідей, використовуючи апарат нечіткої логіки, експертна система ухвалює оптимальне і обгрунтоване рішення.

Використовуючи нечітку множину, визначається узагальнена відносна відстань Хеммінга, потім – індекс нечіткості, по якому видається експертна оцінка.

Ключові слова: *захист інформації, мережа, нечітка множина, оцінка ефективності.*

Постановка проблеми. В даний час найчастіше застосовуються економічні критерії для оцінки ефективності застосування систем захисту інформації (СЗІ) в мережах розповсюдження аудіовізуального контенту (МР АВК) [1, 2].

Як критерії економічності наводяться приведені витрати і обчислювана на їх основі економія витрат. Такі критерії не мають яких-небудь принципових переваг, за винятком фактору зручності застосування. Разом з цими критеріями отримав поширення і так званий критерій повних витрат [3–5]. При використанні цього критерію і параметрів: $C_к$ – одноразові капітальні витрати, що мають місце у момент встановлення системи захисту; $C_р$ – експлуатаційні витрати в одиницю часу; $E_Т$ – позитивний ефект в одиницю часу, отриманий від впровадження системи захисту, – ефективність системи захисту оцінюється таким чином:

$$T_o = \frac{C_к}{E_T - C_p} \text{ – термін окупності,} \quad (1)$$

$$C_{пр} = C_к + O_н C_p \text{ – приведені витрати,} \quad (2)$$

де $O_н$ – нормативний термін окупності;

$$C = C_к + T_c C_p \text{ – повні витрати,} \quad (3)$$

де T_c – термін служби або передбачуваний термін використання системи захисту.

Витрати по виразах (2) і (3) є функціями часу, а відмінність між приведеними і повними витратами полягає в тому. що перші обчислюються за час, який дорівнює нормативному терміну окупності, а другі – за повний час використання системи захисту.

Окрім відмічених вище критеріїв, при економічній оцінці системи крім витрат на неї необхідно також враховувати взаємодію між підсистемами, що входять в її склад (рівні захисту, рубежі захисту і таке інше) [6, 7].

Тому можна припустити, що повна вартість системи захисту інформації буде сумою вартостей її підсистем:

$$C_п = \sum_{i=1}^{i=n} C_i \,. \quad (4)$$

Також при економічній оцінці СЗІ необхідно враховувати в якій категорії систем з обмеженим доступом зберігається, обробляється і функціонує об'єкт захисту, а також до якої категорії відноситься сам об'єкт.

Метою роботи є експертна економічна оцінка ефективності застосування систем захисту інформації в мережах розповсюдження аудіовізуального контенту.

Виклад основного матеріалу. Найбільш поширеними в даний час є дві методики економічної оцінки СЗІ [8].

Забезпечення необхідного рівня захисту $P_з$ при мінімальних витратах $C_{мін}$:

$$\begin{cases} C_{мін} \to \min \\ P \ge P_з \end{cases}. \quad (5)$$

Забезпечення максимального рівня захисту при обмежених витратах C_o:

$$\begin{cases} P \to \max \\ C_o \le C \end{cases}. \quad (6)$$

На підставі цього проведемо оцінку економічної доцільності побудови системи захисту інформації.

Одразу встановимо, що $C_o \le kQ$, де Q – величина, що характеризує витрати із-за просочування інформації або несанкціонованих дій зловмисників (розмірність така ж, як $P_з$; k – статистичний коефіцієнт, який враховує витрати на СЗІ).

Відповідно до [5, 8] k знаходиться у діапазоні значень 0,05…0,20. Отже, співвідношення між C_o і Q, коли C_o в системі захисту інформації відповідає від 5 до 20% величини збитку, що обумовлений просочуванням інформації, вважаються за оптимальні. Інколи вважають, що витрати на систему захисту інформації повинні складати 20–30% від вартості інформаційної системи і локальної мережі об'єкту в цілому. Якщо вказані витрати менше 5%, тоді є ризик несанкціонованого отримання інформації зловмисником, якщо ж витрати перевищують 20%, тоді доцільно переглянути заплановані заходи і структуру системи захисту інформації.

Для точнішої і об'єктивнішої економічної оцінки ефективності системи захисту інформації в роботі пропонується комп'ютерна експертна методика і тести.

Відповідно до цієї методики необхідно відповісти на сім груп питань, на підставі яких експертна система ухвалює рішення про доцільність прийняття системи захисту інформації. Аналіз вимог до системи захисту інформації проводиться відповідно до аналізу спрямованості її діяльності, функціями і процедурами захисту інформації на об'єкті.

Відповідно до ***першої*** групи визначається інформація, що підлягає захисту. При цьому необхідно виділити інформацію, яку необхідно захистити від небажаної дії або не допускати її витоку. Аналізуючи наочну область в процесі пошуку рішення необхідно відповісти на такі питання:

– Які дані можуть збиратися?

– Хто може цікавитися цими даними?

– Чому вони цікавляться ними?

– Коли ці дані потрібні?

– Чи проходять через мережу об'єкту нові дані та нові користувачі даних?

– Які принципи використовуються для оцінки цінності інформації?

– Яка законодавча і соціальна відповідальність?

– Який захист необхідний для інформації кожного виду?

У ***другій*** групі питань здійснюється з'ясування можливих каналів просочування інформації. При цьому аналізується:

– Які конкретні співробітники мають доступ до конфіденційних даних?

– Хто повинен змінити інформацію, чому, коли?

– Чи проходили ці співробітники перевірку?

– Чи організуються й реалізуються в повному обсязі комп'ютерні заходи?

– Чи добре документуються і реалізуються комп'ютерні заходи?

– Чи є програми навчання, підготовки і перепідготовки персоналу?

Проте при аналізі цих питань виникають такі основні проблеми: контроль доступу до вразливої і секретної інформації; профілі секретності доступу: забезпечення і створення свідомого відношення до секретності в організації, розробка документації, що визначає політику відносно секретності на підставі нормативних документів, та ін.

Третя група питань це – оцінка уразливості й ризику. На цьому етапі оцінюється:

– Які специфічно вразливі точки має об'єкт, що треба оцінити?

– Наскільки може бути зменшений ризик при заданому збільшенні об'єму заходів захисту інформації?

При цьому необхідно враховувати проблеми і в першу чергу до них слід віднести розподіл пріоритетів для інформації, що вимагає захисту, шляхом визначення відносної уразливості і секретності інформації.

До ***четвертої*** групи питань відноситься визначення вимог до системи захисту інформації. Потрібно сформулювати і оцінити необхідний рівень захисту і на підставі цього визначити основні економічні характеристики системи захисту. При цьому необхідно відповісти на такі питання:

– Які технічні заходи безпеки використовуються?

– Яка вартість технічних заходів захисту?

– Наскільки ефективні доступні заходи захисту?

– Наскільки уразливі елементи системи захисту інформації?

– Який ризик (аналіз і прогнозування можливих наслідків, які можуть, викликати ці проблеми)?

До основних проблем, які виникають при отриманні відповідей на ці питання, можна віднести зміни в технології захисту, які можуть бути використані як зловмисниками, так і захисниками інформації, а також встановити вимоги до фінансування заходів по захисту інформації.

У ***п'ятій*** групі питань проводиться вибірка засобів захисту і визначення їх характеристик.

У цій групі необхідно відповісти перш за все на такі питання:

– Які загрози мають бути прибрані і в якій мірі?

– Які зони об'єкту мають бути захищені і якою мірою?

– За допомогою яких засобів має бути реалізований захист?

– Яка має бути повна вартість реалізації захисту і витрати на експлуатацію з урахування потенційних загроз?

– Які спільні функції зачіпаються?

– Який новий персонал потрібний?

– Яка кваліфікація потрібна для виконання цих обов'язків?

– Яка вартість доступна?

– Який виграш в безпеці буде отриманий при збільшенні бюджету?

Основні проблеми, які вирішують при цьому: проведення організаційної роботи для підвищення ефективності, працездатності реалізованих програм, систем, які реалізуються, та їх функціонування; розробка організаційних схем; розробка правил робіт.

Шоста група питань відноситься до впровадження і використання вибраних заходів захисту. При вирішенні цих питань необхідно відповісти на три основних питання:

– Який пріоритет секретних об'єктів?

– Як буде впливати реалізація програми захисту інформації на плани підприємства?

– Які додаткові ресурси будуть потрібні?

Складнощі, які виникають при вирішенні цих питань наступні: необхідність уникнення конфліктів із-за ресурсів, розробка планів реалізації і запобігання конфліктам при розвитку системи захисту.

Сьома група питань – контроль й управління системою захисту.

Управління захистом – це контроль за розподілом інформації у відкритих системах і каналах. Він здійснюється для забезпечення функціонування засобів і механізмів захисту: фіксація виконання функцій і стану механізмів захисту, фіксація подій, пов'язаних з порушенням захисту.

При цьому необхідно постійно вирішувати такі питання:

– Який має бути склад фахівців для ефективної роботи групи контролю?

– Чи є стандарти безпеки і секретності інформації?

– Чи ідентифіковані всі вразливі точки об'єкту?

– Які покращення можна провести, аби зробити систему захисту більш працездатною і ефективною?

– Яка періодичність контролю?

Проведені дослідження відповідей на поставлені питання показують, що вони не мають чіткої межі. На питання можна дати декілька однотипних відповідей, що може привести до неякісної

оцінки. Суворі правила, закладені в експертні системи, не дають оптимального рішення.

Прийнявши припущення – відповідь несе в собі деяку нечіткість, можна прийти до висновку, що для експертної системи необхідно використовувати апарат нечіткої логіки [9, 10]. Тоді відповідно до отриманих відповідей, використовуючи апарат нечіткої логіки, експертна система ухвалює оптимальне і обгрунтоване рішення.

Вихідними даними експертної системи будуть наступні рекомендації:

– СЗІ можна не застосовувати.

– Застосовувати слабкі СЗІ.

– Застосовувати сильні СЗІ.

– Застосовувати особливі СЗІ.

Ці рекомендації також є нечіткими поняттями, і кожна має свою приналежність (функцію приналежності) до нечіткої множини.

Тоді приналежність рекомендацій до нечіткої множини визначається за допомогою індексу нечіткості (рис. 1).

Як згадувалося вище, всі питання згруповані по темах. Питань в темі є декілька, на питання може бути декілька відповідей (по умові приймається лише одна відповідь). Відповіді мають свою приналежність до нечіткої безлічі відповідей. Відповіді типу «Важко відповісти» мають приналежність μ=0, 1, решта відповідей мають приналежність μ=0, 0,33, 0,66, 1.

Із відповідей на питання складається нечітка множина, в якій кількість стовпців дорівнює кількості питань, а кількість рядків дорівнює кількості тем.

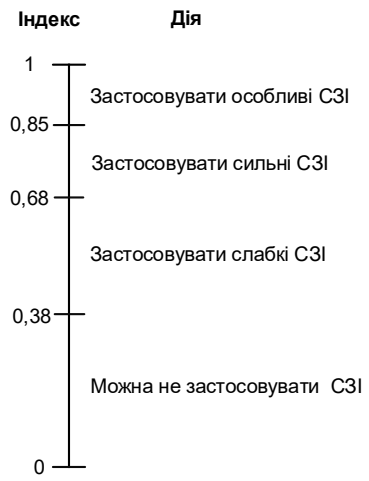


Рис. 1. Рекомендації до нечіткої множини

Використовуючи нечітку множину, визначається узагальнена відносна відстань Хеммінга [10, 11], а потім – індекс нечіткості, по якому видається експертна оцінка.

Висновки

1. Запропоновано комп'ютерну експертну методику і тести, що дозволяють точніше і об'єктивніше оцінювати економічну ефективность системи захисту інформації.

2. Визначено сім груп питань, на підставі яких експертна система ухвалює рішення про доцільність прийняття системи захисту інформації.

3. Використовуючи апарат нечіткої логіки визначається узагальнена відносна відстань Хеммінга, а потім – індекс нечіткості, по якому видається експертна оцінка.

Список літератури:

1. Яремчук Ю. Є., Павловський П. В., Катаєв В. С., Сінюгін В. В. Комплексні системи захисту інформації : навч. посібник. Вінниця: ВНТУ, 2017. 120 с.

2. Толюпа С.В., Самохвалов Ю.Я., Цьопа Н.В. Комплексні системи захисту інформації спеціальних об'єктів та методика їх оцінки. *Сучасний захист інформації.* 2014. № 1. С. 81–88.

3. Богуш В.М., Кудін А.М. Моніторинг систем інформаційної безпеки. Київ : ДУІКТ, 2006. 414 с.

4. Толюпа С.В., Іванова О.М., Демченко І.О. Підходи до проектування та оцінки ефективності системи захисту інформації в автоматизованих системах обробки та передачі даних. *Сучасний захист інформації.* 2013. № 1. С. 25–30.

5. Толюпа С.В., Борисов І.В. Методика оцінки комплексної системи захисту інформації на об'єкті інформаційної діяльності. *Сучасний захист інформації.* 2013. № 2. С. 43–48.

6. Сірченко Г.А. Задачі забезпечення цілісності та доступності інформаційних об'єктів в комунікаційних мережах. *Захист інформації.* 2010. № 2. С. 49–54.

7. Браіловський М.М., Лазарєв Г.П., Хорошко В.О. Захист інформації у банківській діяльності. Київ: Поліграф Консалтинг, 2004. 216 с.

8. Хорошко В.О., Кудінов В.А. Методичний підхід до формалізації задачі оцінювання ефективності системи захисту інформаційної системи ОВС України. *Захист інформації.* 2004. № 4. С.11–18.

9. Потій О.В., Лєншин А.В. Основні положення математичного апарату суб'єктивної логіки та його застосування для оцінки рівня зрілості систем забезпечення безпеки інформації. *Радіотехніка.* 2005. Тематичний випуск *Інформаційна безпека*. Харків : Харківський національний університет радіоелектроніки. С. 144–160.

10. Ус С.А. Методи прийняття рішень : навч. посібник. Донецьк : Національний гірничий університет, 2012. 212 с.

11. Волошин О.Ф., Мащенко С.О. Моделі та методи прийняття рішень : навч. посібник. 3-є вид., перероб. Київ: Видавництво Людмила, 2018. 292 с.

Rozorinov H.M., Sirchenko I.A. AN EXPERT ESTIMATION OF EFFICIENCY OF THE INFORMATION DEFENCE SYSTEMS APPLICATION IN THE NETWORKS OF AUDIOVISUAL CONTENT DISTRIBUTION

Methodology and tests are offered for the expert economic estimation of efficiency of application of the information security systems in the networks of audiovisual content distribution.

It is shown that at the economic estimation of the system except charges on the system it is necessary also to take into account cooperation between subsystems that is included in the composition (levels of defence, borders of defence and all that).

In accordance with this methodology it is necessary to answer on seven groups of questions, on the basis of that a consulting model makes decision about expedience of acceptance of the information security system. The analysis of information security system requirements is conducted in accordance with the analysis of orientation of the activity, by functions and procedures of information defence on an object.

However at the analysis of these questions there are such basic problems: access control to vulnerable and secret information; profiles of access secrecy: providing and creation of conscious attitude toward secrecy in organization, development of documentation that determines politics in relation to secrecy on the basis of normative documents. It is thus necessary to take into account specific difficulties and first of all to them it follows to take distribution of priorities for information that requires defence, by determination of relative vulnerability and secrecy of information. Except it, to the basic problems that arise up at the receipt of answers for by the set questions, it is possible to take changes in technologies of defence, that can be used by both malefactors and defenders of information, and also to set requirements to financing of events on information security.

Complications that arise up at the decision of these questions related also to the necessity of avoidance of conflicts from resources, developments of realization plans and prevention of conflicts at development of the defence system.

The analysis of answers for by the set questions shows that they do not have a clear limit. On a question it is possible to give a few of the same type answers, that can result in an off-grade estimation. The severe rules stopped up in consulting models do not give an optimal decision.

Accepting supposition, that an answer carries in itself some unclearness, drawn conclusion, that for a consulting model it is necessary to use the vehicle of fuzzy logic. Then in accordance with the got answers, using the vehicle of fuzzy logic, a consulting model accepts an optimal and reasonable decision.

Using a fuzzy set, the generalized relative distance of Hamming is determined, and then is an index of unclearness, on that an expert estimation is given out.

Key words: *information security, network, fuzzy set, estimation of efficiency.*

УДК 621.396.967(075.8)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/10

Трапезон К.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

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

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ PHOTO WAKE-UP ДЛЯ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗОРУ

Системи машинного навчання за своїм функціональним призначенням дозволяють визначати положення людини на двовимірному зображенні на основі певних характерних ознак. Але ситуація ускладнюється, коли необхідно "оживити" зображення людини зі створенням відповідної точної 3D-фігури. При цьому все частіше впроваджують процедури навчання системи машинного зору з використанням комп'ютерних процедур риггінгу та текстурування. В роботі розглянуто базові математичні співвідношення, які дозволяють виділити особливості створення 3D-моделі людини з анімацією її руху на основі лише наявного статичного фотозображення. Показано, що ключова ідея при цьому полягає у тому, що потрібно використати шаблонний прототип 3D-моделі (SMPL-прототип) і далі просто необхідно контролювати, щоб ця обрана структура відповідала силуету на зображенні. Створення ж руху цієї моделі пропонується на основі генерування карт глибини, нормалі та скінінгу. При цьому слід відмітити, що точність руху моделі напряму залежить від створення ще і карти міток моделі тіла людини. Додатково в роботі наголошено, що на точність створення рухомої 3D-моделі на основі технології Photo wake-up, впливає точність пози моделі голови людини, напряму погляду, куту повороту голови, тощо. При цьому відмічено, що при використанні моделі SMPL через недостатню точність щодо орієнтирів обличчя на зображенні, рекомендовано при формуванні 3D-образу голови, оптимізувати в моделі розташування вершин, дотримуючись меж силуету, і уникаючи при цьому самоперетину елементів. Представлені в роботі підходи та відповідний математичний апарат дозволяють у майбутньому розробити удосконалену версію технології Photo wake-up для випадку, коли на площині 2D-зображення виділяється не один силует людини, а група людей, до якої також можна додати анімацію окремих рухів.

Ключові слова: *машинний зір, модель, скін, карта, деформація, меш, Photo Wake-Up.*

Постановка проблеми. В останні роки цифрова обробка і цифровий аналіз зображень знаходять все більше застосувань в різних галузях науки і техніки, серед яких варто виділити додатки систем доповненої реальності, інтелектуальні робото-технічні комплекси, системи промислового контролю, системи управління рухомими апаратами, біомедичні дослідження, нові технології обробки зображень і безліч інших. Термін «машинний зір» (Machine vision) як поняття, включає в себе ряд інженерних технологій, методів і алгоритмів, пов'язаних із завданнями інтерпретації сцени спостереження за її двовимірними проекціями (зображеннями), а також містить практичне використання результатів цієї інтерпретації. Проблематика машинного зору настільки приваблива для сучасних дослідників з тієї причини, що апаратні можливості, надані в даній області останніми досягненнями електроніки та обчислювальної техніки, досягли такого рівня, що вони вже багато в чому наближаються до «технічних характеристик» людини. Окремою ланкою досліджень можна вважати наявні розробки алгоритмів, які дозволяють анімувати об'єкти в нерухомих зображеннях, насамперед це стосується анімації об'єктів людей. Ключовою задачею цих алгоритмів є використання підходів машинного зору задля того, щоб електронна система з відповідним програмним забезпеченням дозволяла визначати положення людини на двовимірному зображенні з подальшим створенням її руху.

Постановка завдання. Визначення тривимірної структури за двовимірним зображенням значно ускладнюється, коли в якості об'єкту на цьому зображенні виступає людина. І тут задача не лише полягає у визначенні положення людини, його загальних розмірів, але й потрібно створити деталізовану реалістичну 3D-модель з анімацією. При цьому, необхідно щоб алгоритм працював в форматі доповненої реальності, а сама 3D-модель людини

мала б можливість анімації у трьох вимірах, створюючи ефект "виходу" з зображення. Подібними дослідженнями сьогодні займається Інститут інтелектуальних систем імені Макса Планка, де задля створення відчуття руху було запропоновано окремий спосіб оброблення 2D-зображення. За створенням у подальшому «інтелектуальних машин», що функціонують в реальному масштабі часу, стоїть необхідність вирішення здебільшого лише одного принципового завдання – розробки методів і алгоритмів «розуміння» зображень. Однак саме це завдання в багатьох випадках виявляється і найбільш важким.

Метою статті є розроблення алгоритму створення фото реалістичної 3D-моделі тіла людини з можливістю анімації її руху на основі лише оброблення 2D-зображення з образом цієї людини. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

– виявлення базових математичних підходів, на основі яких функціонує система машинного зору з використанням технології Photo wake-up;

– визначення особливостей щодо використання SMPL-моделі, карт глибини, нормалей та скінінгу при створенні карти міток 3D-моделі;

– формулювання етапів створення 3D-моделі тіла людини з анімацією її руху на основі статичного 2D-зображення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Однією з найбільш цікавих і популярних на сьогодні систем для створення руху об'єктів через аналіз плоского зображення, є анімація на основі установки, яка називається деформацією скелетного підпростору [1, с. 3]. Її часто використовують для управління особливо персонажами, але ця техніка універсальна і може бути використана до будь-якої 3D-моделі на основі мешу. Метод деформує вхідний меш шляхом застосування перетворень до простішої системи ригу, яку іноді називають скелетом. Риг складається з елементів, які називаються кістками, іноді їх також називають суглобами або ручками.

Величина впливу кожної кістки в контрольному ригу на дану вершину контролюється вагою кістки-вершини. Кінцева позиція v_j' кожної вершини j, з формули (1) задається зваженою сумою всіх кісткових перетворень

$$v_j' = \sum_i w_j^i T_i(v_j) \qquad (1)$$

де w_j^i – вага кістки i для вершини j і T_i є трансформацією кістки i [1, с. 3].

Риг, як проміжний допоміжний засіб, використовується в технології Photo wake-up, за якою, на основі 2D-зображення можна створити реалістичну динамічну 3D-модель. Загальна система на основі технології Photo wake-up працює наступним чином (рис. 1): спочатку застосовуються алгоритми для визначення персонажа, проводиться сегментація зображення та визначаються оцінки розташування об'єктів на зображенні. На основі результатів розробляється метод побудови ригід меш. Потім, будь-яку шаблонну 3D-послідовність руху (переміщення, обертання, зміна розмірів) можна використовувати для анімації ригід меш.

Виявлення персонажа, оцінка об'єкта та сегментація персонажа виконуються на основі фотографії, за допомогою алгоритмів нейронних мереж. Наприклад, візьмемо нейронну мережу Mask R-CNN для, по-перше, виявлення персонажу на зображенні, і по-друге, для його подальшого відокремлення від фону зображення. При цьому, для створення 3D-моделі використовують шаблонний прототип моделі людського тіла SMPL (Skinned Multi-Person Linear Model). Цей прототип визначає 3D-модель тіла, яка змінюється по формі фігури з вихідного двовимірного зображення. Додатково, на отриману модель, виконується процедура накладання текстур, тобто

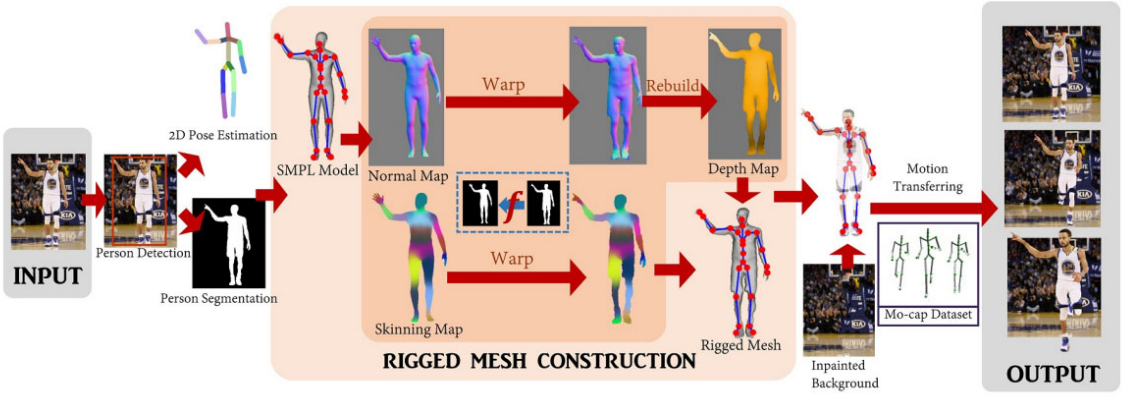


Рис. 1. Послідовність методу [2, с. 5910]

вони проектуються на зображення у вигляді карти нормалей і карти скінінгу. Суть системи – знайти відповідність між силуетом персонажа та силуетом SMPL, провести деформацію карт нормалей/скінів SMPL та створити карту глибини через інтеграцію викривленої карти нормалей. Цей процес циклічно повторюється в нейронній мережі, щоб імітувати задній вигляд моделі та поєднувати карти глибини та скінінгу для створення повного ригід 3D-моделі. Ключова ідея алгоритму у тому, як відновити анімовану текстуровану 3D-модель з однієї фотографії. Один із способів полягає у тому, щоб змусити модель SMPL відповідати силуетам, оптимізувавши в неї розташування вершин, дотримуючись меж силуету, і уникаючи при цьому самоперетину [3, с. 8389]. Отримані карти звичайних зображень і скінів можна побудувати як для переднього, так і заднього вигляду, а потім відновити ригід меш тіла.

Алгоритм починається з формування двовимірного образу персонажа та її силуетної маски *S*. Для простоти *S* називають і як набір усіх пікселів у силуеті, і як двійкову функцію $S(x) = 1$ для пікселя x всередині силуету, або $S(x) = 0$ для x поза силуетом.

Щоб побудувати 3D-модель зі скелетним оснащенням, спочатку підганяють модель SMPL до 2D-вхідного образу за допомогою методу, який описано в [4, с. 5–6], і який додатково відновлює параметри камери. Потім проектують цю модель в камеру, щоб сформувати силуетну маску S_{SMPL}. Проекція додатково дає карту глибини $Z_{\text{SMPL}}(x)$, карту нормалей $N_{\text{SMPL}}(x)$ і карту скінінгу $W_{\text{SMPL}}(x)$ для пікселів $x \in S_{\text{SMPL}}$. Відмітимо, що карта скінінгу отримана з ваг скінінгу для кожної вершини в моделі SMPL.

Керуючись S_{SMPL} і силуетною маскою *S* вхідної фотографії, деформують Z_{SMPL}, N_{SMPL} і W_{SMPL}, щоб побудувати вихідну карту глибини (лише на силуеті) $Z_{\partial S}(x \in \partial S)$, нормальну карту $N(x)$ і карта скінінгу $W(x)$, відповідно, для пікселів $x \in S$. $N(x)$ потім інтегрується для відновлення остаточної карти глибини $Z(x)$ за умови відповідності $Z_{\partial S}(x)$ на межі силуету ∂S. Тобто, розв'язують плавну зворотну деформацію, $f(x)$, так, як описано у співвідношенні (2):

$$S(x) = S_{\text{SMPL}}(f(x)) \tag{2}$$

а потім застосовують цю деформацію до карт глибини та спінінгу, відповідно до формул (3–6):

$$\text{Z}_{\partial S}(x \in \partial S) = \text{Z}_{\text{SMPL}}(f(x)) \tag{3}$$

$$N(x) = N_{\text{SMPL}}(f(x)) \tag{4}$$

$$Z(x) = \text{Integrate}[N; Z_{\partial S}] \tag{5}$$

$$W(x) = W_{\text{SMPL}}(f(x)). \tag{6}$$

Процедура викривлення зазвичай розтягує геометрію в площині (модель SMPL зазвичай є більш тонкою, ніж «одягнений» об'єкт), без аналогічного розтягування (як правило, збільшення) глибини. Вирішують цю проблему, натомість через деформацію нормалей, щоб отримати $N(x)$, а потім виконавши інтегрування їх, щоб отримати $Z(x)$ [5, с. 247].

Описаний метод відновлює карти глибини та скінінгу для передньої частини персонажа. Щоб відновити задню частину персонажу, віртуально візуалізують вигляд ззаду підігнаної моделі SMPL, віддзеркалюють маску персонажа, а потім застосовують метод деформації.

Реконструюють передній та задній меш стандартним способом: в глибину заднього проекту в 3D будують два трикутники для кожного сусіда 2×2. Кожній вершині призначають відповідні ваги скінінгу. Зшити передній та задній меш разом просто, оскільки вони збігаються на межі. На рисунку 2 показано передній та задній меш та зшиту модель.

Коли суб'єкт самозакривається, тобто одна частина тіла знаходиться поверх іншої, то реконструкцію однієї карти глибини (наприклад, для переду) із бінарного силуету буде недостатньо. Щоб впоратися з самооклюзією, сегментують тіло на частини за допомогою карти міток тіла, а потім реконструюють кожну частину за допомогою методу зіставлення меж. Зосереджуються на самооклюзії і коли руки моделі частково перетинають інші частини тіла так, що закриті частини залишаються єдиним з'єднаним компонентом. Цей метод не обробляє всі сценарії самооклюзії, але значно розширює робочий діапазон і показує шлях до обробки більшої кількості випадків.

Натомість, спроектована модель SMPL надає еталонну карту L_{SMPL} міток тіла, яка не дуже відпо-



(a) front mesh (b) side view (c) back mesh

Рис. 2. Реконструйовані результати мешу: a) реконструйований передній меш; b) вигляд збоку; c) реконструйований задній меш [2, с. 5912]

відає зображенню. Цю карту міток використовують для побудови остаточної карти міток L у два етапи: 1) оцінюють початкову карту міток L_{init} для кожного пікселя $x \in S$, щоб вона була максимально подібною до L_{SMPL}; 2) уточнюють L_{init} на границях оклюзії, де розриви міток повинні збігатися з краями вхідного зображення.

Початкова (приблизна) карта міток тіла L_{init} розраховується шляхом мінімізації мети випадкового поля Маркова (MRF), як це визначають формули (7–9).

$$\min_{L_{\text{init}}} \sum_{p \in S} U(L_{\text{init}}(p)) + \gamma \sum_{p \in S, q \in N(p) \cap S} V\left(L_{\text{init}}(p), L_{\text{init}}(q)\right) \quad (7)$$

де

$$U(L_{\text{init}}(p)) = \min_{r | L_{\text{SMPL}}(r) = L(p)} \|p - r\|_2 \quad (8)$$

$$V(L_{\text{init}}(p), L_{\text{init}}(q)) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } L_{\text{init}}(p) \neq L_{\text{init}}(q) \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (9)$$

Рисунок 3 ілюструє етапи відновлення карти міток. Починаючи з вхідного зображення (рисунок 3a) і його відповідного силуету та спроектованої моделі частини тіла SMPL, відновлюють початкову карту міток частини тіла, як показано на рисунку 3b. Після визначення точок на кордонах оклюзії будують маску оклюзії (світліші ділянки показано на рисунку 3c), а потім уточнюють її, щоб створити остаточну карту міток тіла (рисунок 3d). Частини тіла поблизу оклюзій мають фальшиві межі, і вони показані червоним кольором на рисунку 3e. Видаляють ці помилкові межі (рисунок 3f) і замінюють їх трансформованими версіями меж SMPL, як показано на рисунку 3g. Потім перебудовують тіло – частина за частиною (рисунок 3h) і збирають в остаточний меш, як це показано на рисунку 3i.

Точність пози голови за технологією Photo wake-up важлива для точної анімації, тоді як образ голови за SMPL часто є неправильним. Через це, на основі розробок [6 с. 1756, 7 с. 1750], виявляють орієнтири обличчя на зображенні та формують 3D-образ голови, який найкраще вирівнює відповідні, спроектовані 3D орієнтири з виявленими. Після реконструкції карти глибини для голови, як і раніше, застосовують плавну деформацію, яка точно вирівнює спроектовані 3D реперні точки з опорними точками зображення. Щоразу, коли обличчя чи реперні знаки не виявлено, цей крок пропускається.

Етап текстурування означає, що для передньої частини об'єкта проектують зображення на геометрію. Для задньої текстури пропонують два варіанти: 1) вставити дзеркальну копію передньої текстури на зворотний бік; 2) зафарбувати з додатковими вказівками користувача. Для другого варіанту розмальовування спини здійснюється за картами міток тіла, малюючи текстуру з регіонів з однаковими мітками тіла. Користувач може легко змінити ці мітки карти, щоб, наприклад, заохочувати заповнення потилиці текстурою волосся, а не текстурою обличчя. Нарешті, передня і задня текстури зшиваються пуассонівським змішуванням [8, с. 314]. На рисунку 4 наведено приклади карт міток тіла та сіток. На рисунку 4 оригінальні фотографії розміщено у верхньому правому куту набору результатів роботи технології Photo Wake-up.

Таким чином, алгоритм, за яким можна створити реалістичну 3D-модель тіла з анімацією для систем машинного зору можна визначити за наступними етапами:

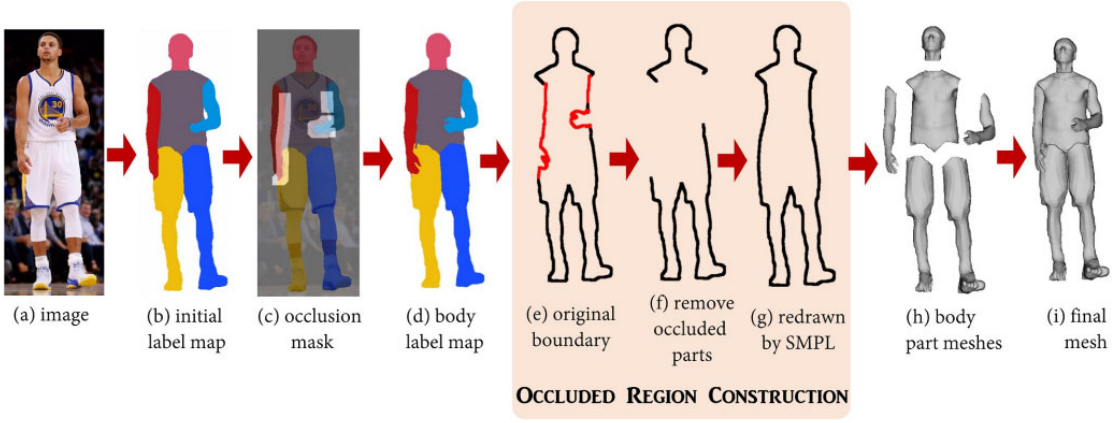


Рис. 3. Алгоритм відновлення карти міток: a) ілюстрація вхідного зображення; b) ілюстрація наближеної карти міток; c) ілюстрації маски оклюзії; d) ілюстрація остаточної карти міток; e) ілюстрація фальшивих меж оклюзій; f) ілюстрація видалених частин контуру; g) ілюстрація трансформованих меж SMPL; h) часткові складові моделі; i) ілюстрація остаточної моделі [2, с. 5913]

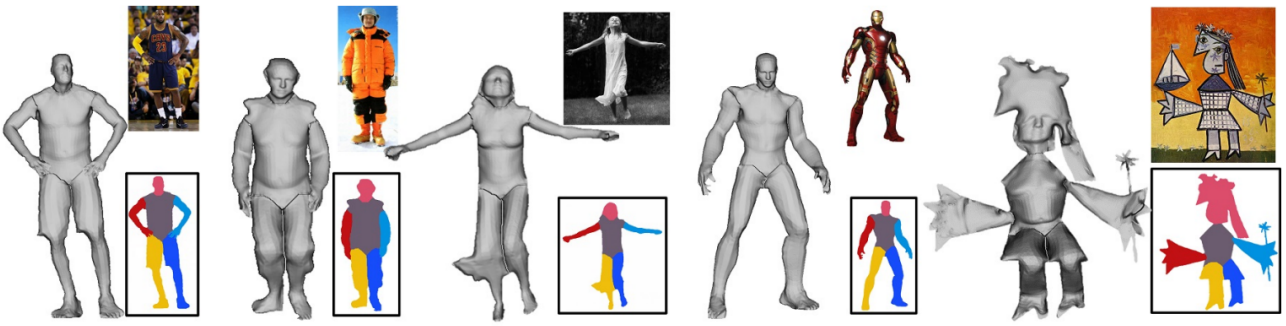


Рис. 4. Приклади карт міток тіла та сіток [2, с. 5914]

1) 2D-зображення ділиться на області за прикладом створення сітки;

2) Визначаються на основі прототипу SMPL, окремі частини тіла і змінюються так, щоб відповідати вихідному оригіналі на зображенні;

3) Проводиться корекція пози голови людини з врахуванням таких особливостей, як напрям погляду, кут повороту;

4) Проводиться на основі побудови ригу анімація тіла в трьох вимірах, змушуючи його "виходити" з площини плоского зображення.

Висновки. В роботі розглянуто базові математичні співвідношення, які дозволяють виділити особливості створення 3D-моделі людини з анімацією руху, на основі лише наявного статичного фотозображення. Показано, що ключова ідея при цьому полягає у тому, що потрібно використати шаблонний прототип 3D-моделі (SMPL-прототип) і далі просто необхідно контролювати, щоб ця обрана структура відповідала силуету на зображенні. Створення ж руху цієї моделі пропонується на основі генерування карт глибини, нормалі та скінінгу. При цьому слід відмітити, що точність руху моделі напряму залежить від створення ще і карти міток моделі тіла людини. Додатково, в роботі наголошено, що на точність створення рухомої 3D-моделі на основі технології Photo wake-up, впливає точність пози голови людини, напряму погляду, куту повороту голови, тощо. При цьому відмічено, що при використанні моделі SMPL через недостатню точність щодо орієнтирів обличчя на зображенні, рекомендовано при формуванні 3D-образу голови, оптимізувати в моделі розташування вершин, дотримуючись меж силуету, і уникаючи при цьому самоперетину елементів. Виділені в роботі підходи та відповідний математичний апарат дозволяють у майбутньому розробити удосконалену версію технології Photo wake-up для випадку, коли на площині 2D-зображення виділяється не один силует людини, а група людей, до якої також можна додати анімацію окремих рухів.

Список літератури:

1. J.P. Lewis, M. Cordner, and N. Fong, "Pose space deformation: a unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation," Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 165–172, 2000, doi: 10.1145/344779.344862

2. C. Weng, B. Curless, "Photo Wake-Up: 3D Character Animation From a Single Photo," 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 5908-5917, 2020, doi: 10.1109/CVPR.2019.00606

3. T. Alldieck, M. Magnor, W. Xu, C. Theobalt, and G. PonsMoll, "Video based reconstruction of 3d people models," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 8387-8397, 2018, doi: 10.48550/arXiv.1803.04758

4. F. Bogo, A. Kanazawa, C. Lassner, "Keep it SMPL: Automatic estimation of 3D human pose and shape from a single image," Computer Vision – ECCV 2016, Lecture Notes in Computer Science, 1–18, 2016, doi: 10.48550/arXiv.1607.08128

5. R. Basri, D. Jacobs, and I. Kemelmacher, "Photometric stereo with general, unknown lighting," International Journal of Computer Vision, 72(3), 239–257, 2007, doi: 10.1007/s11263-006-8815-7

6. D. E. King. Dlib-ml, "A machine learning toolkit," Journal of Machine Learning Research, 10(7), 1755–1758, 2009.

7. I. Kemelmacher-Shlizerman, S. M. Seitz, "Face reconstruction in the wild. In Computer Vision (ICCV)," 2011 IEEE International Conference, 1746-1753, 2011, doi: 10.1109/ICCV.2011.6126439

8. P. Perez, M. Gangnet, and A. Blake, "Poisson image editing," ACM Transactions on graphics (TOG), 22, 313–318, 2003.

Trapezon K.O., Voinalovych O.O. FEATURES OF USING PHOTO WAKE-UP TECHNOLOGY FOR MACHINE VISION SYSTEMS

Machine learning systems, by their functional purpose, allow determining the position of a person on a two-dimensional image based on certain characteristic features. But the situation becomes more complicated when it is necessary to "animate" a person based on image analysis by creating a corresponding accurate 3D figure. At the same time, procedures for training the machine vision system using computer rigging and texturing procedures are increasingly being implemented. The paper considers the basic mathematical relationships that allow us to highlight the features of creating a 3D model of a person with motion animation based only on an existing static photo image. It is shown that the key idea here is that you need to use a template prototype of the 3D model (SMPL-prototype) and then you just need to control that this selected structure corresponds to the silhouette in the image. Creation of the movement of this model is proposed on the basis of the generation of depth, normal and skinning maps. At the same time, it should be noted that the accuracy of the movement of the model directly depends on the creation of the label map of the human body model. In addition, the work emphasizes that the accuracy of creating a moving 3D model based on Photo wake-up technology is affected by the accuracy of a person's head posture, direction of gaze, angle of head rotation, etc. At the same time, it was noted that when using the SMPL model, due to insufficient accuracy with respect to facial landmarks in the image, it is recommended to optimize the location of the vertices in the model when forming a 3D image of the head, observing the boundaries of the silhouette, while avoiding self-intersection of elements. The approaches identified in the work and the corresponding mathematical apparatus allow in the future to develop an improved version of the Photo wake-up technology for the case when not one silhouette of a person stands out on the plane of a 2D image, but a group of people, to which animation of individual movements can also be added.

Key words: *machine vision, model, skin, map, warp, mesh, Photo Wake-Up.*

УДК.621.371.31
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/11

Цяпа С.М.
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки
та судових експертиз Служби безпеки України

МОДЕЛЬ ТРАСИ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ НАЗЕМНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

У статті досліджується вплив характеристик траси розповсюдження радіохвиль вздовж межі розповсюдження повітря-земна поверхня, зокрема величини згасання корисного сигналу в просторі між передавачем та приймачем системи зв'язку при проектуванні наземних систем зв'язку та напрацювання рекомендацій щодо їх експлуатації. Близькість земної поверхні істотно впливає на структуру електромагнітного поля радіохвилі, що призводить до втрат рівня сигналу радіохвилі на приземній трасі та суттєво залежить від електрофізичних параметрів поверхні землі, довжини хвилі тощо. Тому траса розповсюдження радіохвилі потребує конкретного опису. Одними з основних чинників, які призводять до втрат рівня сигналу радіохвилі є різноманітність поверхні Землі по профілю (рівнини, гори, річки, озера), по складу (пісок, глина, чорнозем, різноманітне каміння), по рослинному покриву (пустині, степи, ліси). Також необхідно враховувати і сезонну варіацію діелектричних характеристик підстилаючої поверхні, що виникає в результаті зміни вологості рослинного покрову, сезонної зміни агрегатних станів опадів (сніг, дощ, лід). До того ж значний вплив на розповсюдження радіохвиль вносить ступінь шорсткості поверхні.

В даній статті проведено аналіз втрат рівня сигналу радіохвилі та розроблено модель розповсюдження радіохвиль вздовж земної поверхні на трасі прямої видимості, на основі таких моделей розповсюдження радіохвиль, як моделі Введенського та Шулейкіна-Ван-дер-Поля. Представлена модель розповсюдження радіохвиль вздовж земної поверхні на трасі прямої видимості враховує залежність втрат розповсюдження від довжини хвилі, висоти підняття антен та електрофізичних параметрів землі в явному виді. Розглянута модель описує залежність втрат розповсюдження радіохвиль у разі, коли висота розташування антени порівнянна з довжиною радіохвилі, та може бути використана при проектуванні та експлуатації наземних систем зв'язку. Представлена модель поширення радіохвиль максимально наближена до реального радіоканалу та дозволяє проводити комп'ютерні експерименти для розробки алгоритмів передавання даних на великі відстані, а також проводити натурні експерименти для відпрацювання технічних рішень у процесі створення радіоапаратури.

Ключові слова: *радіохвилі, втрати розповсюдження сигналу, приземне поширення радіохвиль, висота підняття антени, модель Введенського, квадратична формула Введенського, модель Шулейкіна-Ван-дер-Поля.*

Постановка проблеми. Характеристики траси розповсюдження радіохвиль вздовж межі розділу повітря — земна поверхня, зокрема, величини загасання корисного сигналу в просторі між передавачем та приймачем системи зв'язку, мають суттєвий вплив на роботу всієї радіолінії в цілому та представляють особливий інтерес, як при проектуванні і розробленні наземних систем зв'язку, так і для організації заходів при їх експлуатації.

Вивчення особливостей розповсюдження радіохвиль вздовж земної поверхні зустрічає ряд ускладнень, обумовлених тим, що близькість земної поверхні істотно змінює структуру електромагнітного поля в порівнянні із структурою електромагнітного поля у вільному просторі.

Втрати рівня сигналу радіохвилі на приземній трасі залежать від наявності на поверхні землі різного роду предметів, їх розмірів, щільності розташування тощо, і, особливо, від характеру та стану підстилаючої поверхні, як наприклад, суха чи волога земля, пісок, трав'яне покриття, наявність водойм, снігу, льоду тощо, що опосередковано впливає на електрофізичні параметри середовища.

Не дивлячись на індивідуальні особливості кожної місцевості, все різноманіття трас розповсюдження радіохвиль вдається звести до типових форм з урахуванням характерних особливостей, що впливають на їх проходження.

Однією з таких типових трас – є траса прямої видимості, де існує прямий промінь між передавачем і приймачем. Така траса охоплює численні типові фрагменти сільської і міської топографії.

З фізичної точки зору, вплив поверхні землі проявляється двома шляхами. Струми, наведені

електромагнітним полем радіохвиль в ґрунті, призводять до втрат енергії на нагрівання і тому послаблюють рівень електромагнітного поля в атмосфері. З іншого боку, ці струми екранують більш глибокі області ґрунту і перешкоджають відтоку енергії в нижню півсферу структури повітря – земля. Це підсилює електромагнітне поле в атмосфері. Повний облік сукупного впливу обох чинників ускладнює аналіз розповсюдження сигналу радіохвилі в безпосередній близькості від поверхні землі, навіть коли атмосферу можна вважати однорідною.

Сукупна дія вищевказаних фізичних процесів розповсюдження радіохвилі уздовж межі розділу повітря – земна поверхня в загальному випадку врахована при розгляді електромагнітних полів в атмосфері і землі на основі рівнянь Максвелла та при забезпеченні певних граничних умов на межі розділу середовищ. Рішення такої дифракційної задачі отримано у вигляді нескінченного ряду комплексних функцій [1, 2], тому через свою складність практично не застосовується в інженерних розрахунках.

На практиці, зазвичай, застосовують спрощені моделі загального рішення, отримані для різних висот розташування антен передавача і приймача.

Аналіз останніх досліджень. Теорія розповсюдження радіохвиль в системах з високо піднятими антенами розроблена досить детально, що обумовлено бурхливим розвитком таких систем зв'язку, як радіорелейні лінії, стільникові системи зв'язку та ін., і доведена до рівня інженерних розрахунків, наприклад, на основі моделі Введенського. Що стосується моделювання систем з низько розташованим антенами, то, враховуючи більш складні умови проходження радіохвиль поблизу неоднорідної земної поверхні, розробка моделей носить обмежений характер і застосовується тільки для випадків розташування антен безпосередньо на поверхні землі (модель Шулейкіна-Ван-дер-Поля).

Для розрахунку значень напруженості електричного поля в роботі [3] пропонується використовувати квадратичну формулу Введенського, в якій для розрахунку діючого значення напруженості електричного поля у точці прийому використовується вираз (1)

$$E_д = \frac{\sqrt{30P_п G_п}}{r} W_T = \frac{\sqrt{30P_п G_п}}{r} \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} \qquad (1)$$

де $W_т$ – множник ослаблення напруженості поля хвилі на реальній трасі;

$P_п$ – потужність передавача, яка підводиться до антени у Вт;

$G_п$ – коефіцієнт підсилення антени передавача у напрямку приймача в разах;

h_1 та h_2 – приведена висота підняття антени передавача та приймача, м;

λ – довжина хвилі, виражена через частоту $\lambda = c/f$, с – швидкість світла ($300 \cdot 10^6$м/с), f – частота сигналу в Гц.

Слід відзначити, що область використання формули Введенського обмежується виразом (2), що дещо зменшує її практичну цінність:

$$r \geq \frac{18 h_1 h_2}{\lambda} \qquad (2)$$

r – максимальна дальність прямої видимості, виражена у км.

У виразі (1) використовується приведені висоти антен, які пов'язані з еквівалентним радіусом Землі наступним чином [4]:

$$h_1^{'} = h_1 - \frac{r^2}{2a_{ез}} \left(\frac{h_1}{h_1 + h_2}\right)^2 \qquad (3)$$

$$h_2^{'} = h_2 - \frac{r^2}{2a_{ез}} \left(\frac{h_2}{h_1 + h_2}\right)^2 \qquad (4)$$

де

$$a_{ез} = \frac{a_з}{\left(1 + \frac{a_з g_t}{2}\right)} \qquad (5)$$

$a_з$ = 6 356 863 м – середній радіус Землі;

g_t – діелектрична проникність атмосфери, яка приймає значення $-7{,}85 \cdot 10^{-8}$ 1/м.

Виходячи з формули (2) отримуємо, що дана модель застосовна на відстанях, які визначаються межами

$$\frac{18 h_1^{'} h_2^{'}}{\lambda} \leq r \leq 4{,}12 \cdot \left(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}\right) \qquad (6)$$

Втрати у разі застосування моделі Введенського не залежать від електрофізичних параметрів поверхні.

Для моделі Шулейкіна-Ван-дер-Поля відсутня залежність втрат від висоти підняття антен, в той час, як електродинамічне рішення включає такі параметри. Це, в певній мірі, обмежує можливості використання цих моделей.

Постановка завдання. Метою статті є розробка моделі розповсюдження радіохвиль вздовж земної поверхні на трасі прямої видимості, яка враховує залежність втрат розповсюдження від довжини хвилі, висоти підняття антен та електрофізичних параметрів поверхні землі в явному виді.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо особливості моделювання траси розповсюдження радіохвиль вздовж межі розділу повітря-земля на основі зон Френеля, існування

яких встановлюється аналізом загального рішення електродинамічної задачі.

Рішення електродинамічної задачі розповсюдження радіохвиль показує, що передачу електромагнітного поля від точки випромінювання (А) в точку прийому (В) можна описати за допомогою вказаних зон Френеля – просторових областей, які мають форму еліпсоїдів з фокусами в точках А і В (рисунок 1). При цьому, для практичних розрахунків досить врахувати дію електромагнітного поля, обмеженого першою зоною Френеля, яка формує так звану суттєву область розповсюдження радіохвиль з максимальним радіусом (ρ).

У випадку достатньо низького розташування антен над рівнем землі в суттєву область розповсюдження прямої хвилі може входити частина місцевості з поглинаючою поверхнею. Це призводить до зменшення напруженості поля прямої хвилі і зростання втрат.

З рисунку 1 видно, що в цьому випадку радіохвиля, що випромінюється передавачем в точці А, спочатку розповсюджується у вільному просторі до місця зіткнення із поверхнею землі (d_n). На цій ділянці траси рівень сигналу радіохвилі зменшується за законом втрат у вільному просторі. Коли в суттєву область розповсюдження потрапляють перешкоди, зокрема поверхня землі, втрати починають зростати за рахунок поглинання електромагнітного поля земною поверхнею тощо.

На відстані d_m радіус еліпсоїда стає меншим ніж висота підняття антени приймача, що дозволяє знехтувати взаємодією електромагнітної хвилі з поверхнею землі, і на кінцевій ділянці траси втрати знову визначаються втратами вільного простору.

Таким чином, в моделі, коли середнє значення втрат збільшується відповідно до степеневої функції із зростанням відстані між передавачем і приймачем, на початковій та кінцевій ділянках втрати зростають з показником ступеня 2, а на середній ділянці з показником n. Враховуючи вищевикладене, загальні втрати розповсюдження сигналу можна визначити таким чином [6–10]:

$$L = \left(\frac{4\pi d_n d}{\lambda d_m}\right)\left(\frac{d_m}{d_n}\right)^n \qquad (7)$$

де λ – довжина хвилі;
d – відстань між передавачем та приймачем.

У разі однакової висоти підняття антен передавача і приймача ($h_1 = h_2 = h$) значення d_m та d_n можна оцінити формулами [4];

$$d_n = \left(\frac{4h^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4}\right) \qquad (8)$$

$$d_n = \left(d - \frac{4h^2}{\lambda} + \frac{\lambda}{4}\right) \qquad (9)$$

Наприклад, на дистанції 1000 м та h = 1,5 м, d_n складає величину 60 м, d_m – 940 м у разі λ = 0,15 м; d_n = 8,7 м, d_m = 991,3 м у разі λ =1 м.

З урахуванням (8) і (9) загальні втрати визначаються формулою:

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{4h^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4}\right)^{2-n} \left(d - \frac{4h^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4}\right)^{n-2} \qquad (10)$$

На рисунках 2 та 3 показані залежності втрат розповсюдження радіохвиль від відстані між передавачем і приймачем, розраховані за формулою (10) у разі n = 4; 3; та λ = 1 м; λ = 0,15 м. Як параметр використана висота підняття антен за умови $h_1 = h_2 = h$.

Висновки. Аналіз виразу (10) і даних, приведених на рисунках 2 та 3 показує наступне.

1. При розташуванні антен безпосередньо на поверхні землі (h = 0, $d \gg \frac{\lambda}{4}$) формула (10) приймає вигляд втрат, одержаних в моделі Шулейкіна-Вандер-Поля, в якій втрати пропорційні четвертому ступеню відношення відстані до довжини хвилі.

$$L = \left\{\frac{8\pi^2 d^2}{\lambda^2}\left[\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2\right]^{-\frac{1}{2}}\right\}^2 \qquad (11)$$

де ε та σ – відносна діелектрична проникність і питома проникність грунту на трасі.

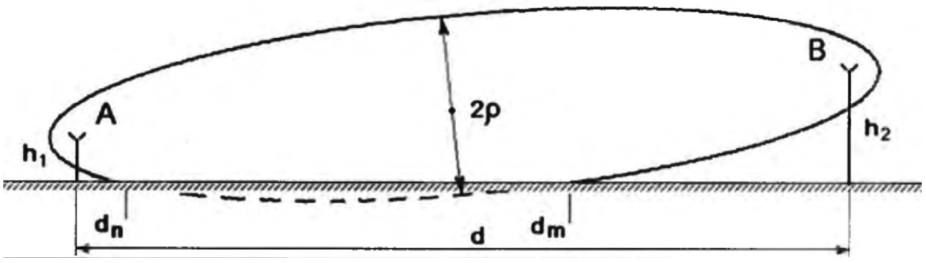


Рис. 1. Еліпсоїд Френеля розповсюдження радіохвиль

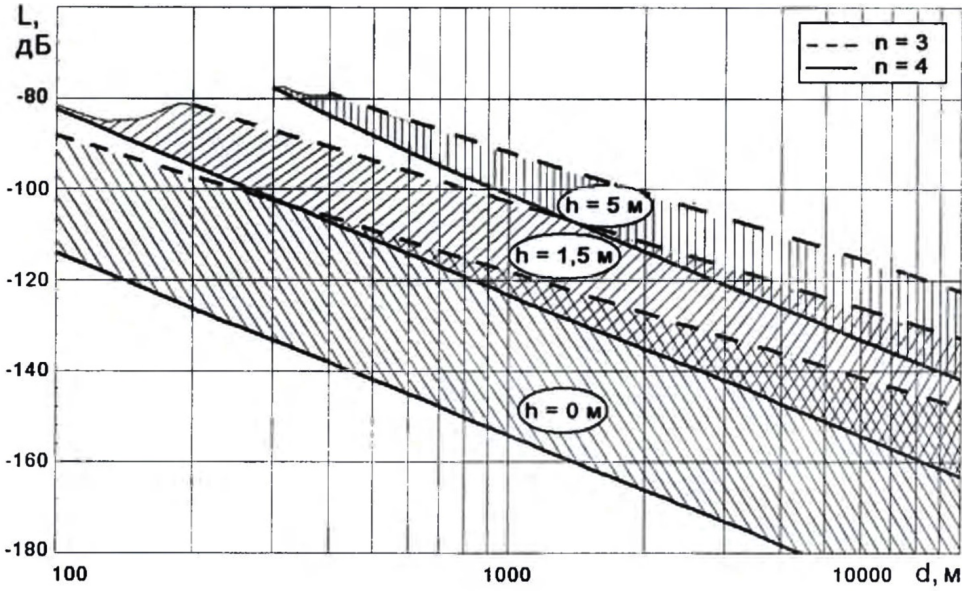


Рис. 2. Залежність втрат розповсюдження радіохвиль у разі λ = 1 м

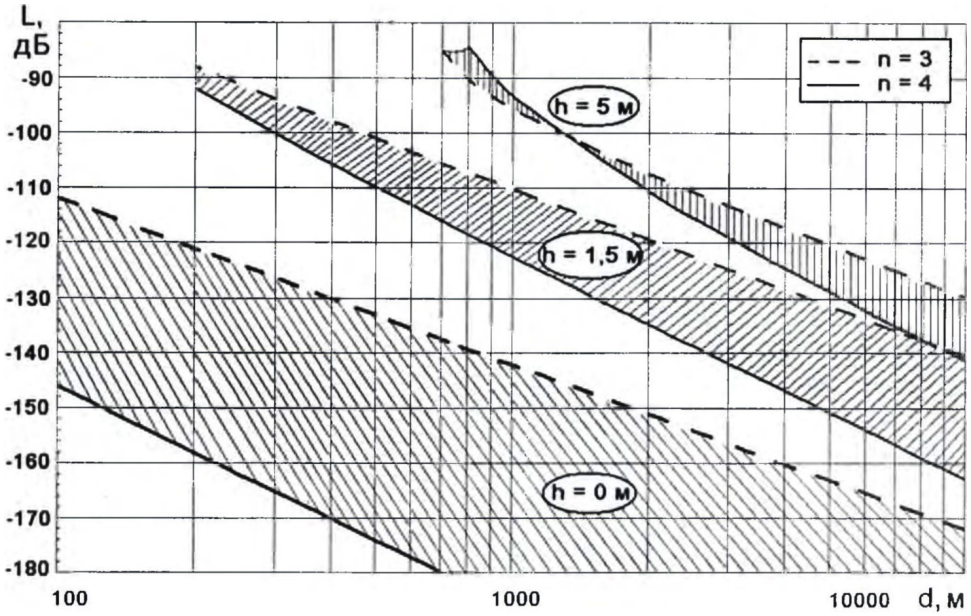


Рис. 3. Залежність втрат розповсюдження радіохвиль у разі λ = 0,15 м

2. У разі високо піднятих антен ($h \gg \frac{\lambda}{4}$ та $d \gg \frac{4h^2}{\lambda}$) втрати визначаються виразом

$$L = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)\left(\frac{4h^2}{\lambda}\right)^{2-n} d^n \qquad (12)$$

який у разі n = 4 співпадає з точністю до постійного множника (π) з формулою втрат для моделі Введенського, де

$$L = \left(\frac{d}{h}\right)^4 \qquad (13)$$

3. Залежність втрат від електрофізичних параметрів поверхні закладена у величині показника n.

Прирівнюючи втрати, отримані по формулі (10) у разі h = 0, втратам, що відповідають моделі Шулейкіна-Ван-дер-Поля (11), отримаємо зв'язок з електрофізичними параметрами поверхні:

$$n = \frac{2{,}8 + 4\,lgd - 4\,lg\lambda - lg[\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2]}{0{,}6 + lgd - lg\lambda} \qquad (14)$$

Знаючи електрофізичні характеристики поверхні в районі траси розповсюдження радіохвиль, які відомі для багатьох типів грунтів, як це наприклад, показано у таблиці 1, можна визначити n для конкретної місцевості та розрахувати втрати для інших висот підняття антен.

Таким чином, розглянута модель розповсюдження радіохвиль вздовж межі розділу повітря-земна поверхня, відповідає поставленим вимогам,

Таблиця 1

Електрофізичні характеристики для різних типів поверхні

Характеристики земної поверхні	ε	**σ, см/м**
Суха земля	2…6	$10^{-4}...10^{-3}$
Земля середньої вологості	10	$2 \cdot 10^{-4}$
Волога земля	30	$9 \cdot 10^{-4}$
Глина суха	2	$3 \cdot 10^{-2}$
Глина волога	24	$6 \cdot 10^{-1}$
Сухий пісок	4	$9 \cdot 10^{-5}$
Вологе трав'яне покриття на торфі	6	10^{-1}
Мерзлий грунт	3…6	$10^{-6}...10^{-2}$
Сніг (при t = –10 °С)	1	10^{-6}
Крига (при t = –10 °С)	4…5	$10^{-2}...10^{-1}$
Прісна вода	80	$10^{-3}...10^{-2}$
Морська вода	80	0,66…6,6
Сільська місцевість	14	10^{-2}
Міський ландшафт	3	10^{-4}

і що важливо, описує залежність втрат від електрофізичних параметрів поверхні землі та втрат розповсюдження радіохвиль у разі, коли висота розташування антени порівнянна з довжиною радіохвилі, та може бути використана при проектуванні та експлуатації наземних систем зв'язку.

Список літератури:

1. Измайлов С.В. Курс электродинамики. Учебник для физико-математических факультетов педагогических институтов. Москва, 1962. 439 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики : учеб. пособие. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. 3-е изд., испр. М., 1988 Т. 2. 496 с.
3. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М., Связь, 1972. 336 с.
4. Калинин А.И., Черенкова О.В. Распространение радиоволн и работа радиолиний. М.: Связь, 1971. 440 с.
5. Barclay L.W. Propagation of Radio Waves. London, Institution of Engineering and Technology, 2008. 460 p.
6. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М., Мир, 1981. Т. 2. 322 с.
7. Чернов Л.А. Волны в случайно-неоднородных средах. М., Наука, 1977. 172 с.
8. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile services//IEEE Trans. Vehicular Technology. 1980. V. 29, № 3. pp. 317–326.
9. V. Erceg, L. J. Greenstein, S. Y. Tjandra, S. R. Parkoff, A. Gupta, B. Kulic, A. A. Julius, and R. Bianchi, «An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments» IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, July 1999. pp. 1205–1211.

Ciapa S.M. THE LINE-OF-SIGHT ROUTE MODEL FOR GROUND COMMUNICATION SYSTEMS

The article explores the impact of the characteristics of the radio wave propagation path along the air-ground surface propagation boundary. In particular, the amount of fading of the useful signal in the space between the transmitter and the receiver of the communication system is of interest. The proximity of the earth's surface significantly affects the structure of the electromagnetic field of the radio wave, which leads to the loss of the level of the radio wave signal on the ground path and significantly depends on the electrophysical parameters of the earth's surface, wavelength, etc. Therefore, the path of radio wave propagation needs a specific description. One of the main factors that lead to loss of the radio signal level is the diversity of the Earth's surface in terms of profile (plains, mountains, rivers, lakes), composition (sand, clay, chernozem, various stones), vegetation cover (deserts, steppes, forests). It is also necessary to take into account the seasonal variation of the dielectric characteristics of the underlying surface, which occurs as a result of changes in the humidity of the vegetation cover, seasonal changes in the aggregate state of precipitation (snow, rain, ice). In addition, the degree of surface roughness has a significant effect on the propagation of radio waves.

This article analyzes radio wave signal level losses and develops a model of radio wave propagation along the Earth's surface on a line-of-sight path, based on radio wave propagation models such as the Vvedensky and Shuleikin-Van der Pol models. The presented model of propagation of radio waves along the earth's surface on a line-of-sight route takes into account the dependence of propagation losses on the wavelength, the height of the antennas, and the electro-physical parameters of the earth in a clear form. The considered model describes the dependence of radio wave propagation losses in the case when the height of the antenna location is comparable to the length of the radio wave, and can be used in the design and operation of terrestrial communication systems. The presented model of radio wave propagation is as close as possible to a real radio channel and allows conducting computer experiments for the development of data transmission algorithms over long distances, as well as conducting field experiments to work out technical solutions in the process of creating radio equipment.

Key words: *radio waves, signal propagation losses, surface propagation of radio waves, antenna elevation height, Vvedenskyi model, Vvedenskyi quadratic formula, Shuleykin-Van der Pol model.*

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.896
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/12

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

Сазонов А.Ю.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Черепанська І.Ю.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лукінюк М.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА ДЕТЕКТУВАННЯ ПОСТРАЖДАЛИХ В РЕЗУЛЬТАТІ ВИКИДІВ ХІМІЧНО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН

Технологічні процеси харчової, фармацевтичної, хімічної та інших галузей промисловості завжди супроводжуються ризиками виникнення аварійних ситуацій, які можуть бути викликані людськими або техногенними факторами, що спричинюють викиди хімічно- та біологічно-активних речовин, а також радіаційне забруднення довкілля. У разі виникнення хімічної аварії на виробництві життя чи смерть людини визначається в перші хвилини після інциденту, тому важливим є вживання необхідних заходів для допомоги постраждалим працівникам виробництва, зокрема проведення їх знезараження у перші хвилини аварії. Актуальним є також проведення ідентифікації та підрахунку кількості постраждалих у результаті аварії, що дозволить зменшити час на підготовку до знезараження та підвищити ефективність лікування за рахунок завчасного визначення необхідної кількості ліжко-місць у лікарнях залежно від кількості потерпілих. Метою статі є розроблення ефективного інструменту детектування людей та підрахунку їх на зображеннях з камер відеонагляду як основи процедури керування потерпілими в умовах викидів хімічно активних забруднювальних речовин. Для досягнення зазначеної мети використовується підхід перенесеного навчання (transfer learning), що полягає у застосуванні знань, отриманих під час виконання розв'язання однієї задачі, для іншої цільової задачі. Для навчання обрана згорткова нейронна мережа InceptionResNetV2, яка є більш новою та потужнішою ніж більш ранні моделі. Згорткові мережі добре справляються з величезними наборами даних та ефективно навчаються на графічних процесорах за рахунок паралельних обчислень. Набір даних для тренування складався з зображень із камер відеонагляду, а також з файлу, де була порахована кількість людей на кожному фото. Після налаштування та тренування модель показала гарні результати, які можна побачити на графіках і зображеннях, тому вона може бути використаною в подальших дослідженнях.

Ключові слова: *хімічні виробництва, аварійні ситуації, нейронна мережа, детектування людей, згорткові нейронні мережі, екстренні служби.*

Постановка проблеми. Технологічні процеси харчової, фармацевтичної, хімічної та інших галузей промисловості завжди супроводжуються ризиками виникнення аварійних ситуацій, що можуть бути викликані людськими або техногенними факторами, які спричиняють викиди хімічно- та

біологічно-активних речовин, а також радіаційне забруднення довкілля. Крім того, в умовах сьогодення, коли велика кількість підприємств перебувають безпосередньо у зоні бойових дій, ризики забруднення довкілля та, відповідно, зараження інженерно-технічного персоналу підприємств є надзвичайно високими [1].

У разі виникнення хімічної аварії на виробництві життя чи смерть людини визначається в перші хвилини після інциденту. Доведено [2], що під час масштабних інцидентах найбільш поширеною причиною смерті є те, що постраждалим вчасно не було надано кваліфіковану медичну допомогу. Тому дуже важливим є вживання необхідних заходів для допомоги постраждалим працівникам виробництва та проведення їх знезараження у перші хвилини аварії. Не менш актуальним є завдання ідентифікації та підрахунку кількості постраждалих у результаті аварії, що дозволить зменшити час на підготовку до знезараження та підвищити ефективність лікування за рахунок завчасного визначення необхідної кількості ліжко-місць у лікарнях в залежності від кількості потерпілих. Після отримання невідкладної допомоги постраждалий повинен пройти через станцію знезараження, перш ніж йому буде надано більш серйозну допомогу в чистому середовищі. Ця процедура займає 10–20 хвилин. Процедуру знезараження у деяких випадках необхідно проводити поблизу активної зони забруднення або на території лікарні, щоб доставляти постраждалих безпосередньо до медичних установ без попереднього проходження знезараження [1].

Підрахунок постраждалих допоможе швидко зрозуміти обсяги проблеми, щоб негайно вжити необхідні заходи й ефективно спланувати процедуру знезараження та лікування.

Підрахунок кількості об'єктів є складним завданням, особливо у разі використання систем відеоспостереження, оскільки таку процедуру треба застосовувати до послідовності кадрів, а не до одного статичного зображення. Це можливо реалізувати із використання алгоритмів машинного навчання, де вхідними даними є дискретизована послідовність кадрів, а виходом – дискретне значення кількості об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Враховуючи підхід із використанням алгоритмів машинного навчання, перш за все необхідно визначитись із архітектурою нейронної мережі, що забезпечить якісне та швидке виконання поставленого завдання. Для цього можна застосувати різні підходи, один із яких полягає у тому, що розглядають кількість елементів на зображенні як деяку мітку та перетворюють її на певну задачу класифікації або використовують цілковито згорткову архітектуру, де кінцевий згортковий вихід може розглядати номери об'єктів у області інтересу, а потім виконувати підсумування їх кількості. Найпоширеніший тип нейронних мереж, які використовуються на сьогодні для роботи із різними видами зображень, – згорткові [3], що є близьким аналогом до оброблення зображення людиною за допомогою рецептивних полів, при цьому окремі нейрони сітківки одержують стимули з різних областей поля зору. Інформація від кількох нейронів сітківки ока згодом передається нейронам далі за ланцюжком. Згорткові мережі схожі на інші, але мають додатковий рівень складності через те, що вони побудовані із послідовності згорткових шарів. Згорткові мережі добре справляються з величезними наборами даних та ефективно навчаються на графічних процесорах за рахунок паралельних обчислень.

Найефективнішими архітектурами згорткових мереж на сьогодні є ResNet50 та InceptionResNetV2.

ResNet50 [4] являє собою згорткову нейромережу глибиною у 50 шарів, 48 із яких є згортковими, один шар максимізаційного агрегування (max pooling) і один – усереднювального агрегування (average pooling). Початковою архітектурою ResNet була ResNet-34, що складалася з 34 зважених шарів. Це дало можливість додати більше згорткових шарів до мережі, не стикаючись із проблемою зникаючого градієнта, використовуючи концепцію коротких з'єднань. Таке з'єднання пропускає деякі шари, перетворюючи звичайну мережу на залишкову. Архітектура ResNet дотримується двох основних правил проектування. По-перше, кількість фільтрів у кожному шарі є однаковою та залежить від розміру вихідної карти ознак. По-друге, якщо розмір картки ознак зменшити вдвічі, кількість фільтрів подвоїться, щоб зберегти тимчасову складність кожного шару. ResNet50 використовує конструкцію вузького місця стандартного блоку. Залишковий блок із вузьким місцем використовує згортки 1×1, відомі як вузьке місце, які зменшують кількість параметрів та матричних множень. Це дозволяє підвищити швидкість навчання кожного шару.

Іншою архітектурою є InceptionResNetV2, яка також є згортковою та попередньо навченою на понад мільйоні зображень із бази даних ImageNet. InceptionResNetV2 складається зі 164 шарів і може класифікувати зображення за тисячами категорій об'єктів, таких як людина, олівець і багато тва-

рин. Набір має вхідний розмір зображення 299 на 299 пікселів, а вихід являє собою передбачуваний список ймовірних класів. Inception-ResNet поєднує в собі архітектуру Inception із залишковими сполуками [5].

Архітектуру [6] InceptionResNetV2 схематично представлено на рис. 1.

Використання залишкових зв'язків покращує швидкість навчання, що є вагомим аргументом для їх використання. За кожним початковим блоком надходить шар розширення фільтра, який використовується для збільшення розмірності банку фільтрів перед додаванням, щоб відповідати глибині введення. Це потрібно, щоб компенсувати зменшення розмірності, викликане початковим блоком [5].

За допомогою зменшення залишків перед додаванням їх до активації попереднього шару вдалося стабілізувати тренування. Для масштабування залишків коефіцієнти масштабування мають бути від 0,1 до 0,3.

Перевагою InceptionResNetV2 є те, що ця модель є більш новою та потужнішою, вона має більшу кількість шарів, що підвищує якість і точність результату. Цю модель дуже легко налаштувати для нової задачі, зберігаючи корисні знання оригінального класифікатора, і результат буде отриманий набагато швидше. Недоліком моделі є те, що, незважаючи на високу точність, модель не є ідеальною, і можуть бути виникати похибки.

Формулювання цілей статті. Метою цієї статі є розроблення ефективного інструменту детектування людей та підрахунку їх на зображенні як основи процедури керування потерпілими в умовах викидів хімічно активних забруднювальних речовин. Для досягнення зазначеної мети використовується підхід перенесеного навчання (transfer learning), що полягає у застосуванні знань, отриманих під час розв'язання однієї задачі, до іншої цільової задачі.

Для цього буде обрано згорткову нейронну мережу InceptionResNetV2, переваги якої було розглянуто вище. Модель буде завантажено з додатків Keras з оригінальними вагами. Щоб модель впоралася з поставленою задачею, вона буде натренована. Для тренування було обрано набір даних з платформи Kaggle. Набір складається з зображень у форматах NumPy та JPG, а також файла з порахованою кількістю осіб на кожному кадрі. Швидкість навчання буде коригуватись щоразу, коли втрати під час перевірки будуть погіршуватись.

Виклад основного матеріалу. Перед тим як почати навчання, потрібно проаналізувати вхідні дані та завантажити їх в програму. Зображення мають розмір 480×640 пікселів у 3 каналах однієї точки, записані веб-камерою в торговому центрі, але на кожному кадрі зображено різну кількість людей, що є проблемою підрахунку натовпу. Для кожного зображення є цифрове значення з кількістю людей на ньому рис. 2.

На рис. 3 можна побачити, з якою частотою змінюється кількість людей на кадрах. Цільові значення (кількість людей) коливаються від 13 до 53 із середнім значенням 31,16. Значення зазвичай розподіляються з середнім значенням, близьким до середнього. Загальна кількість зображень 2000.

Спочатку необхідно отримати зображення для того, щоб потім на їхній основі сформувати набори даних для тренування та перевірки моделі. Для цього з файла було завантажено зображення і з зазначенням кількості людей на ньому та без.

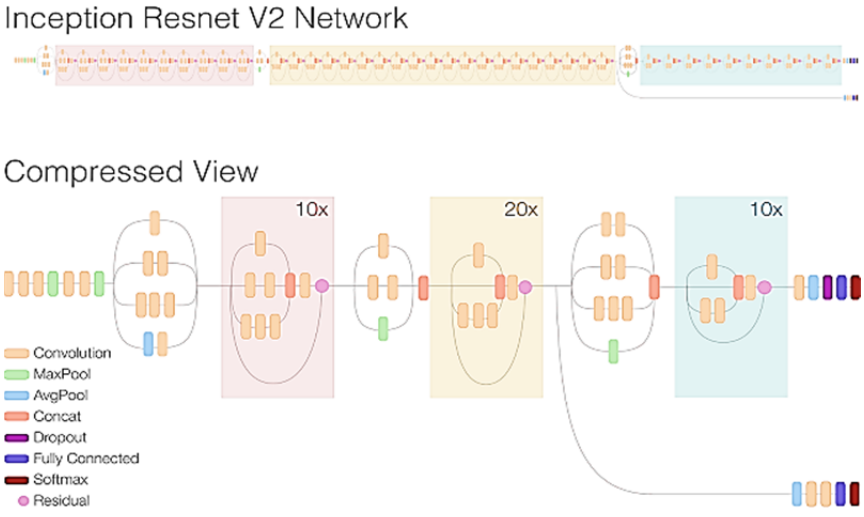


Рис. 1. Архітектура InceptionResNetV2

	id	count	path
0	1	35	frames/frames/seq_000001.jpg
1	2	41	frames/frames/seq_000002.jpg
2	3	41	frames/frames/seq_000003.jpg
3	4	44	frames/frames/seq_000004.jpg
4	5	41	frames/frames/seq_000005.jpg

Рис. 2. Назва зображення і кількість людей на ньому

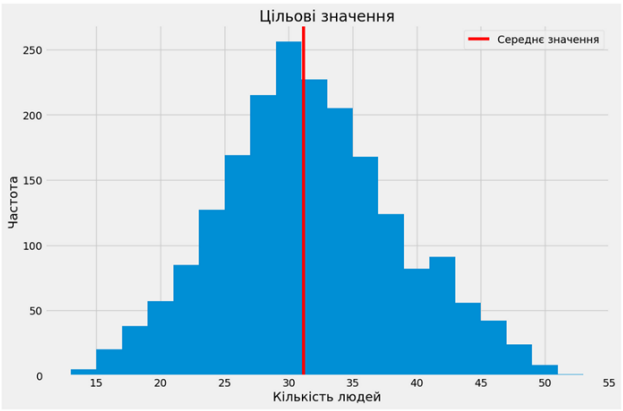


Рис. 3. Цільові значення (кількість людей) на зображеннях

Для тренування було обрано 85 % даних, тобто 1700 зображень. Для перевірки обрано решту даних, тобто 15 %. Далі створюються набори даних для тренування та перевірки і перетворюються у набір даних із тензорами зображень і мітками.

Після отримання наборів даних починається створення моделі. Функціональну модель було завантажено з додатків Keras за допомогою функції tf.keras.applications.InceptionResNetV2, яка повертає модель класифікації зображень Keras, що опціонально завантажується з вагами попередньо навченими в ImageNet. Для функції можна вказати, як будуть завантажені попередньо навчені ваги. Можна обрати випадкову ініціалізацію, попереднє навчання на ImageNet або шлях до файла ваг. Було обрано випадкову ініціалізацію і встановлено pooling = 'avg' – це означає, що глобальне середнє об'єднання буде застосовано до виходу останнього згорткового блоку і, таким чином, виходом моделі буде 2D-тензор.

Після цього необхідно згрупувати лінійний стек шарів за допомогою функції Sequential. Вона надає функції навчання та виведення для цієї моделі, допомагає сформувати кластер шару, який лінійно укладається у tf.keras.Model. На вхід зазначеній функції передано розміри зображення, функціональну модель та щільно пов'язаний шар.

Далі йде налаштування моделі, для чого необхідно використати метод compile в якому на вході можна вказати потрібний оптимізатор. Визначення оптимізатора ітеративно покращує ваги та швидкість навчання, щоб мінімізувати втрати. Алгоритм оптимізації Адама є розширенням стохастичного градієнтного спуску, який останнім часом набув ширшого поширення широкого розповсюдження у додатках глибокого навчання комп'ютерному зору та обробці природної мови. Алгоритм використовується замість класичної процедури стохастичного градієнтного спуску для ітеративного оновлення ваги мережі на основі навчальних даних. Переваги алгоритму Адама в тому, що він простий у реалізації, потребує невеликого обсягу пам'яті й є ефективним у обчислювальному відношенні. Стохастичний градієнтний спуск підтримує єдину швидкість навчання для всіх оновлень ваги і ця швидкість під час навчання не змінюється. Швидкість навчання підтримується для кожної ваги мережі й адаптується окремо з розвитком навчання.

Обраний алгоритм оптимізації передається на вхід функції Sequential. Важливим параметром для оптимізатора є швидкість навчання. Цей параметр контролює кількість оновлення вагових коефіцієнтів під час кожного раунду навчання. Швидкість навчання вкаазно 0,001.

Також для методу compile вказується loss та metrics, тобто функції втрат та список метрик. Мета функцій втрат полягає у тому, щоб обчислити кількість ітерацій та звести їх до мінімуму під час тренування. За функцію втрат обрано MeanSquaredError (MSE). Вона обчислює середній квадрат помилок між мітками та прогнозами. MSE є показником якості оцінювача, оскільки вона обчислюється з квадрата Евклідової відстані, цей показник завжди має позитивне значенням, а помилка зменшується в міру наближення його до нуля. Параметр metrics – це список метрик, які будуть оцінюватися моделлю під час навчання та тестування. За метрику вказано обрано MeanAbsoluteError, яка обчислює середнє значення абсолютної різниці між мітками та прогнозами.

Після налаштування моделі починається її тренування. Для цього буде використовуватись метод fit, який навчає модель протягом фіксованої кількості епох (ітерацій у наборі даних). На вхід методу передається набір даних для тренування

та набір даних для перевірки, які було сформовано вище. Також важливим параметром є кількість епох для навчання моделі, яка буде дорівнювати 500. Для швидкості й якості результатів задається список зворотних дзвінків для застосування під час навчання. Встановлено відпалювач швидкості навчання ReduceLROnPlateau, щоб швидкість навчання зменшувалася під час навчання для того, аби ефективно досягти глобального мінімуму функції втрат. LR динамічно зменшується, якщо оцінка не покращується. Це зберігає перевагу швидкого часу обчислення з високим LR на початку. Для моніторингу обрано середній квадрат помилок для набору перевірки. Кількість епох, у яких не спостерігається жодного покращання, встановлено як 1, а мінімальне значення швидкості як 0,000001.

Для забезпечення зворотних дзвінків встановлено EarlyStopping, яке зупиняє навчання, коли показник, що відстежується, перестає покращуватися. За монітор також обрано середній квадрат помилок для набору перевірки. Кількість епох без покращення – після чого навчання буде зупинено – встановлено таким, що дорівнює 10.

Отже після всієї підготовки можна приступати до навчання, яке займає певний проміжок часу. Процес навчання можна спостерігати на рис. 4.

Як можна побачити з рис. 4, LR динамічно зменшується, якщо оцінка не покращується. Значення середньої квадратичної похибки та середньої абсолютної похибки також зменшуються. Навчання закінчується на епосі 117, оскільки показники перестають покращуватися. Середня абсолютна похибка дорівнює 3,11. На рис. 5 можна ознайомитись з графіком, на якому показано, як змінювалась MAE і коли вона досягла найкращого значення.

Результат підрахунку також можна побачити на рис. 6, де показано різні зображення та підраховану кількість людей на них.

```
Epoch 1/500
107/107 [==============================] - 1214s 11s/step - loss: 65.1584 - mean_absolute_error: 6.3754 - val_loss: 48.5
355 - val_mean_absolute_error: 6.1197 - lr: 0.0010
Epoch 2/500
107/107 [==============================] - ETA: 0s - loss: 45.7749 - mean_absolute_error: 5.4650
Epoch 2: ReduceLROnPlateau reducing learning rate to 0.0007500000356230885.
107/107 [==============================] - 1429s 13s/step - loss: 45.7749 - mean_absolute_error: 5.4650 - val_loss: 50.2
757 - val_mean_absolute_error: 6.2717 - lr: 0.0010
Epoch 3/500
107/107 [==============================] - 1414s 13s/step - loss: 41.8126 - mean_absolute_error: 5.0426 - val_loss: 30.9
484 - val_mean_absolute_error: 4.8720 - lr: 7.5000e-04
Epoch 4/500
107/107 [==============================] - 1443s 13s/step - loss: 36.0991 - mean_absolute_error: 4.6904 - val_loss: 30.8
461 - val_mean_absolute_error: 4.8715 - lr: 7.5000e-04
Epoch 5/500
107/107 [==============================] - 1495s 14s/step - loss: 33.7839 - mean_absolute_error: 4.5527 - val_loss: 29.8
709 - val_mean_absolute_error: 4.7915 - lr: 7.5000e-04
Epoch 6/500
107/107 [==============================] - ETA: 0s - loss: 31.7482 - mean_absolute_error: 4.4216
```

Рис. 4. Процес навчання моделі

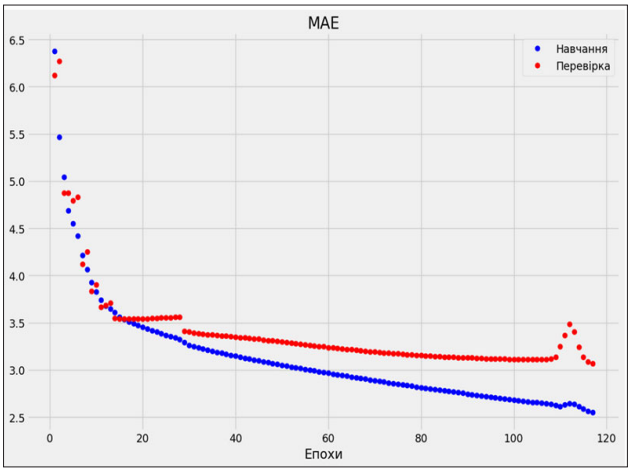


Рис. 5. Зміна значення середньої абсолютної похибки

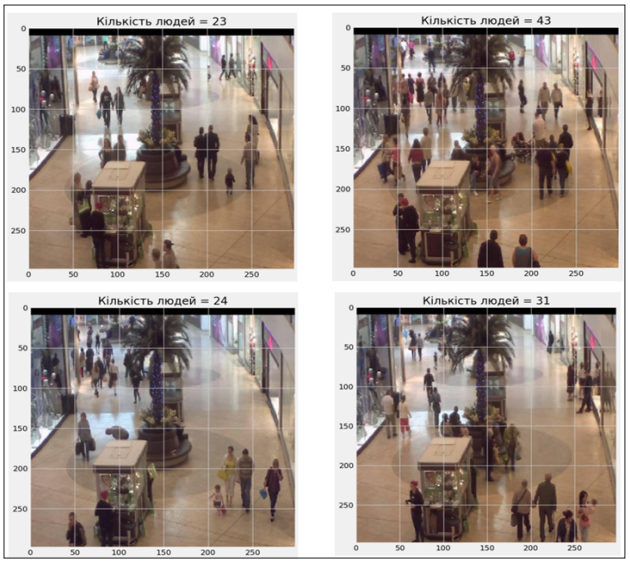


Рис. 6. Підрахунок людей за допомогою моделі

Висновки. В результаті проведеної роботи було обрано архітектуру нейронної мережі InceptionResNetV2, оскільки вона була попередньо навчена на наборах даних і є потужнішою за інші моделі. Після проведення тренування моделі було отримано непогані показники, які засвідчують, що модель швидко вчиться та показує більш високу точність ніж більш ранні моделі. На якість даних також впливають вхідні дані. Вхідними даними були фото з камер відео нагляду та файл з певною кількістю людей на кожному фото. Файл з мітками був порахований вручну, тому треба ще враховувати людський фактор, оскільки можуть бути помилки під час аналізу такого об'єму даних людиною. Також набір даних був відносно невеликий, оскільки це лише 2000 зображень, для кращих результатів у навчанні треба використовувати більшу кількість даних. Ще одним, не менш важливим, фактором є якість фото: чим вона вище, то кращими будуть показники. Тому ця модель є цілком придатною для підрахунку людей і може буде використана у подальших дослідженнях.

Список літератури:

1. Aruna C. Ramesh Triage, monitoring, and treatment of mass casualty events involving chemical, biological, radiological, or nuclear agents. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences. 2010. 2(3): 239–247.
2. James E. Lukaszewski. Common Ingredients of Crisis Situations – Victim Management is Paramount. America's Crisis Guru. URL: https://www.summary.com/magazine/common-ingredients-of-crisis-situations-victim-management-is-paramount/ (дата звернення 28.10.2022).
3. Cheng J. Convolutional neural networks. PathologyOutlines.com website. URL: https://www.pathologyoutlines.com/topic/informaticsconvnet.html
4. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Su. Deep Residual learning for image recognition. Computer vision and pattern recognition. URL: https://arxiv.org/pdf/1512.03385.pdf (дата звернення 28.10.2022).
5. Christian Szegedy, Sergey Ioffe, Vincent Vanhoucke. Deep Inception-v4, inception-res net and the impact of residual connections on learning. Computer vision and pattern recognition. URL: https://arxiv.org/pdf/1602.07261.pdf (дата звернення 28.10.2022).
6. Alex Alemi. Improving Inception and Image Classification in TensorFlow. URL: https://ai.googleblog.com/2016/08/improving-inception-and-image.html (дата звернення 28.10.2022).

Ambrosonok A.A., Sazonov A.Yu., Cherepanska I.Yu., Lukiniuk M.V. **VICTIMS DETECTION SYSTEM IN CHEMICALLY CONTAMINATED AREA**

Technological processes of the food, pharmaceutical, chemical and other types of industry are always accompanied by risks of emergency situations that can be caused by human or technogenic factors which cause emissions of chemically and biologically active substances, as well as radiation pollution of the environment. In the event of a chemical accident at work, the life or death of a person is determined in the first minutes after the incident, therefore it is important to take the necessary measures to help the injured production workers, to carry out their disinfection in the first minutes of the accident. The task of identifying and counting the number of victims as a result of the accident is urgent, which will reduce the time for preparation for decontamination and increase the effectiveness of treatment due to early determination of the required number of beds in hospitals depending on the number of victims. The purpose of this article is to develop an effective tool for detecting people and counting them in the image from video surveillance cameras as a basis for the procedure of managing victims in the conditions of emissions of chemically active pollutants. To achieve this goal, the transfer learning approach is used, which consists in applying the knowledge obtained from one task to another target task. The convolutional neural network InceptionResNetV2, which is newer and more powerful than earlier models, was chosen for training. Convolutional networks handle large data sets well and are trained efficiently on GPUs through parallel computation. The data set for training consisted of images from video surveillance cameras, as well as a file where the number of people in each photo was counted. After tuning and training, the model showed good results, which can be seen in the graphs and images, so it can be used in further research.

Key words: *chemical production, emergency situations, neural network, detection of people, convolutional neural networks, first responders.*

УДК 004.4+37+167
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/13

Вакалюк Т.А.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Болотіна В.В.
Державний університет «Житомирська політехніка»

НЕОБХІДНІСТЬ РОЗРОБКИ ОНЛАЙН-РЕСУРСУ ДЛЯ НАУКОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ СПІВРОБІТНИКІВ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

В умовах пандемії Covid-19 та війни Росії проти України наукова діяльність науково-педагогічних працівників закладів вищої освіти потребує швидкої адаптації до умов сьогодення. Завдання, які постають перед закладами освіти та їх співробітниками в сучасних умовах вимагають актуальних, швидких та високотехнологічних рішень. У зв'язку зі зміною формату освіти, а саме переходом до форм дистанційного та змішаного виду навчання відбувається переведення величезної кількості функцій закладу вищої освіти у формат онлайн. Організація та проведення наукових конференцій та семінарів переводиться у онлайн формат, а для забезпечення ефективної наукової роботи, дослідники все частіше звертаються до онлайн сервісів, що допомагають їм вдосконалювати процес наукового пошуку та впровадження наукових результатів.

У статті проаналізовано наявні дослідження, спрямовані на вивчення онлайн платформ та ресурсів для підтримки наукової діяльності науково-педагогічних працівників закладів вищої освіти та які потреби у функціоналі вони здатні вирішувати. Описано процес організації наукової роботи науково-педагогічних працівників закладів вищої освіти, вказано яких змін набув цей процес в умовах пандемії та військового стану. Основною платформою для розвитку наукових досліджень, функціонування наукових шкіл та гуртків, проведення семінарів слугували університети та дослідницькі центри. Саме тому існує гостра потреба у забезпеченні наукових працівників якісним програмним забезпеченням у складних умовах трансформації освіти і науки у онлайн формат.

Базуючись на потребах сучасних науковців, можна зробити висновок, що наявна потреба у розробці онлайн-ресурсу для наукової діяльності, важливими модулями якої стануть налаштування внутрішньо університетської взаємодії науковців, спрямованої на спільні дослідження та ведення звітності.

Ключові слова: *онлайн система, онлайн ресурс, наукова діяльність, наукові конференції, вебсистема.*

Постановка проблеми. Сучасний світ вимагає швидкої адаптації до нововведень у різних сферах людської діяльності, освіта не є виключенням. Завдання, що постають перед закладами освіти та їх науково-педагогічними співробітниками в умовах сьогодення вимагають актуальних, швидких та високотехнологічних рішень. У зв'язку зі зміною формату освіти сьогодні та більш масштабним переходом до дистанційного навчання відбувається переведення величезної кількості функцій закладу вищої освіти (ЗВО) у формат онлайн. Процес навчання студентів вже давно змінив свій класичний підхід на більш сучасний з впровадженням великої кількості онлайн платформ для реалізації дистанційного навчання.

Адже, ще з початку пандемії Covid-19 перед закладами освіти світу та України постала величезна проблема заміни звичайних форм та методів навчання на віддалені. За рахунок високотехнологічних рішень, програмних засобів, вебресурсів, розпочався шлях до переходу в дистанційних формат функцій ЗВО. Викладачі різних спеціальностей впроваджують у процес навчання різного типу програмне забезпечення для дотримання стандартів вищої освіти.

Проте, робота викладача ЗВО полягає не лише у навчальній діяльності, а й у науковій. Величезною є роль університету у розповсюдженні, використанні, відновленні знань. Заклади освіти є не лише виробниками нових знань, але й активними учасниками їх поширення та використання. Кожен сучасний та прогресивний заклад вищої освіти ставить перед собою задачі та прямує до їх вирішення: формування інноваційного інтелектуального середовища; генерація нових знань; передбачення науково-технологічного розвитку; залучення молодих фахівців до науково-дослідної роботи; впровадження отриманих результатів досліджень у навчальний процес; залучення студентів до роботи у наукових

гуртках; імплементація наукових досягнень у зміст навчальних дисциплін; участь у конкурсах студентських наукових робіт. Розв'язання цих завдань є складовою частиною стратегії розвитку сучасних університетів і спрямоване на організацію освіти з урахуванням досягнень науки з метою підвищення якості підготовки фахівців, наукових і науково-педагогічних кадрів, а також активізацію діяльності підрозділів закладів вищої освіти у вирішенні соціокультурних і соціально-економічних проблем регіону.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналізуючи дослідження, спрямовані на вивчення онлайн платформ та ресурсів для підтримки наукової діяльності науково-педагогічних працівників закладів вищої освіти прослідковується декілька видів наявних систем на забезпечення різних потреб науковців. У дослідженні Бикова В. Ю. [1] проаналізовано наявні системи інформаційно-аналітичної підтримки науково-педагогічних досліджень, що дозволяють проводити оцінку результатів наукової діяльності науково-педагогічних працівників. За допомогою ресурсів, на прикладі Google Scholar є можливість визначення перспективних напрямків наукових досліджень, напрями наукового пошуку, що є в тренді або втрачають актуальність серед шукачів поточну та перспективну тематику науково-дослідних робіт наукових установ, що може бути забезпечена наявними і/або залученими кваліфікованими науковими кадрами. Проте, авторами зазначено, що має відбутись вдосконалення систем такого типу задля забезпечення більш адекватного відображення характеру і рівня наукової діяльності вчених і їх особистого внеску в розвиток певних галузей науки [1].

У праці Смірнової В. [2] було проаналізовано український та міжнародний досвід реалізації моніторингу та оцінювання наукової діяльності викладачів закладів вищої освіти. В основу дослідження було прийнято показники наукометричних баз даних, серед них дані найвпливовіших міжнародних наукометричних баз даних – Scopus, Web of Science, Mendeley, Google Scholar, Research Gate, платформи для розміщення у відкритому доступі результатів наукових досліджень – Zenodo, платформи для аналізу поширеності наукових публікацій в Інтернет-просторі – Altmetric. Також у роботі автора висвітлено особливості формування показників, критерії, що враховуються при визначенні ефективності дослідницької діяльності науковця, визначено переваги та недоліки їх використання для оцінювання результатів дослідницької діяльності науково-педагогічних працівників закладу вищої освіти [2].

У дослідженні Семесько Б. та Галицького О. описуються основні можливості веб-обрієнтованих систем для публікації наукових досліджень. Авторами зазначається, що системи такого типу, як OpenJournalSystem дають можливість покращити якість наукових робіт, спрощують доступ до джерела необхідних наукових відомостей, що в свою чергу покращує якість освіти та впливає на розвиток науки загалом [3].

Одну із важливих категорій систем для покращення наукової роботи посідають вебсистеми, спрямовані на підтримку наукової комунікації. У статті Марцени Фелді проаналізовано використання вебсайтів у комунікаційній діяльності та формуванні іміджу національних наукових установ. Автором було проаналізовано більш ніж 600 вебсайтів наукових установ. Метою було визначити чи співпрацюють установи такого типу з залученням експертів у сфері реклами, піару, та чи є особи що відповідальні для комунікацію та візуальних контент, що великим чином впливає на підвищення іміджу установи та рівня взаємодії з іншими науковцями. Аналіз проводився з урахуванням типу кожної наукової установи (тобто: державний університет, приватний університет, науково-дослідний інститут або інститут PAS. Результати досягнуті автором після аналізу вказують на те, що порівняно небагато наукових установ повною мірою використовують потенціал вебсайтів у сфері зв'язків з громадськістю та міжвузової комунікації. Згідно з прогнозами, наукові установи, що мають відділ або принаймні одну посаду, відповідальну за комунікацію, більш активні у цій сфері. Крім того, державні ЗВО ведуть найбільш професійне спілкування [4].

Для визначення потреби у використанні науковцями мобільних версій вебресурсів, було опрацьовано дослідження Іванової С. та ін. У статті автори за допомогою системи Google на прикладі вебресурсу електронної бібліотеки НАПН України, проаналізували процеси відвідування та використання цього сайту для з'ясування потреб і мотивації користувачів з метою підвищення ефективності обслуговування, поліпшення контент-наповнення та збільшення його відвідуваності [5]. Базуючись на тому, що світова статистика показує, що кількість користувачів мобільних девайсів для перегляду вебсайтів різного типу значно перевищує кількість користувачів, що для цих цілей використовують персо-

нальні комп'ютери. Досліджувана авторами система Google Analytics дає можливість визначити, пристроям якого типу користувачі віддають перевагу, в тому числі і для перегляду наукових ресурсів. Із часом вебресурси стають доступними для все більшої кількості мобільних пристроїв, системи типу моніторингу використання трафіку поліпшують їх роботу, сприяють адаптації шаблону сайту для власників мобільних пристроїв, щоб не втрачати відвідувачів-користувачів мобільного трафіку.

Постановка завдання. Основним завданням дослідження є аналіз необхідності розробки онлайн-ресурсу для наукової роботи співробітників закладів вищої освіти та креслення основних вимог до майбутньої системи для науковців.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасні ЗВО потребують вирішення великої кількості проблем у межах наукової діяльності своїх працівників. Серед них це популяризація та маркетинг наукових здобутків дослідників; чітке та систематичне включення результатів наукової діяльності в освітній процес; активне залучення до наукового пошуку студентів та молодих дослідників. Українські ЗВО впевнено крокують до вирішення цих питань.

Проаналізувавши дослідження А. Коломієць [6], можна зробити висновок, що наукова діяльність в університетах здійснюється на основі наступних принципів:

– єдність наукового та освітнього процесів;

– розвиток фундаментальної та прикладної науки;

– концентрація ресурсів на пріоритетних напрямах розвитку науки, розробка й створення нових педагогічних технологій і методик;

– підтримка провідних науковців і науково-педагогічних колективів, які забезпечують високий рівень наукових досліджень і освіти;

– формування тематичних планів на конкурсній основі;

– розвиток наукової творчості молоді;

– підтримка підприємницької діяльності в науковій сфері;

– інтеграція в міжнародне наукове співтовариство [6].

У період великих змін та потрясінь процес розвитку наукової діяльності співробітників ЗВО дещо змінюється, адаптуючись до вимог сучасності. Першою причиною адаптації наукового процесу стала пандемія, спричинена Covid-19. Звичайні процеси життєдіяльності людини набули нових форм. Також змін зазнала і сфера науки.

Основою для розвитку нових ідей, стрімкого просування прогресу науки, функціонування наукових шкіл та гуртків завжди були ЗВО та дослідницькі центри. Кожен із таких закладів із великою частотою організовував та проводив наукові заходи, у тому числі, всеукраїнські та міжнародні конференції, семінари, симпозіуми, що являються важливою платформою для поширення результатів досліджень, отримання нових знань, розширення кола знайомств. Заходи такого типу є для науковців вирішальними у контексті представлення науковця на міжнародній аудиторії. Під час пандемії країни ввели ряд обмежувальних заходів на подорожі, скупчення великої кількості людей, що стало причиною для скасування більшості наукових заходів, та перенесення на невизначений термін. Швидкого рішення для конвертування такого типу заходів у віртуальні не було. Лише з часом процес проведення наукових конференцій частково трансформували у онлайн процес за допомогою програмного забезпечення для проведення семінарів. Такі зміни суттєво вплинули на наукову спільноту та кар'єру дослідників.

У дослідженні Supram Hosuru Subramanya наведено ряд проблем, з якими зустрілась наукова спільнота під час пандемії. Зокрема, велика кількість дослідників, особливо з країн із низьким і середнім рівнем доходу, втратили величезні можливості для отримання науково-дослідних нагород і грантів на подорожі для відвідування наукових заходів у 2020 році. Зменшення кількості наукових подій і закриття робочих місць призвело до подовження часу дослідження, а в деяких випадках призведе до перезапуску всіх експериментів. Велика кількість фінансування наукових проектів були переведені для досліджень, пов'язаних з Covid-19 [7].

Серед наукових спільнот ширіться розуміння того, що віртуальні конференції стають новою нормою. Науковці впроваджують керівні принципи, отримані з досвіду проведення та організації дистанційних академічних заходів, зустрічей та конференцій. Інші вже почали відстоювати переваги віртуальних конференцій перед особистою присутністю. В науковій праці О. Мубін вказує на те, що реакція спільноти на COVID-19 під час організації дослідницьких конференцій також включає масштабовані підходи, такі як синхронні (Zoom, YouTube) і асинхронні середовища (Slack та онлайн-симуляції) [8]. Крім проблем технічного характеру, науковці зустрілись з проблемою комунікації та розповсюдження наукових здобутків.

Однією з важливих потреб дослідників, а особливо студентів та молодих науковців, є налагодження ділових контактів та зв'язків із колегами, тому конференції є основним джерелом для представлення своєї роботи та комунікації у науковій спільноті. У праці В. Каля вказано, що представлення та обговорення наукових даних і відкриттів є ключовими для просування досліджень [9].

Важливим етапом у становленні віртуальних наукових конференцій як основного виду наукових заходів є наукова комунікація. COVID-19 перенаправив науку та всю людську діяльність на переважно цифрове, а не на особисте спілкування. Ймовірно, це ніколи не зміниться повністю. Як зазначено у науковій роботі В. Каля, оскільки організації-спонсори збільшують кількість віртуальних компонентів конференцій, деякі учасники можуть залишити цей формат через вартість, простоту чи інші особисті причини. Навіть із поверненням форматів очних конференцій у майбутньому, відновлення особистої присутності потребуватиме цілеспрямованих зусиль з боку організаторів зустрічей. Суспільству, можливо, доведеться приймати важкі рішення щодо того, як реорганізувати свої зустрічі, щоб зменшити витрати та потреби в просторі через зменшення кількості особистих учасників [9].

Ще одним викликом сьогодення для всієї України та світу стало повномасштабне військове вторгнення в Україну. Усі сфери діяльності не залишилися без змін у нових умовах. Наукова робота дослідників, викладачів, молодих науковців також зазнала змін та трансформацій. Основними проблемами, з якими зіштовхнулися науковці в період війни, це відсутність або часткове зменшення фінансування, неможливість бути фізично присутнім на робочому місці. Частина науковців України були вимушені покинути країну, тому зіштовхнулися з проблемами підтвердження рівня володіння мовою в країні, якій вони знаходяться та проблемою участі у грантах та проектах. Зменшення кількості наукових заходів та неможливість очної присутності спонукають до подальшого пошуку технічних рішень. Виникає ще більша потреба у використанні різносторонніх програмних засобів для підтримки наукової діяльності співробітників ЗВО.

За допомогою різноманітних веб-ресурсів організовується дистанційне проведення наукових конференцій, реалізовується робота наукових шкіл та гуртків. Важливим питанням в умовах сучасних змін класичної форми роботи закладів вищої освіти є і дистанційна підтримка наукової діяльності співробітників ЗВО. Виникає потреба у впроваджені у заклади вищої освіти єдиної інформаційної бази, яка б слугувала середовищем для збору, обробки даних щодо наукової діяльності науковців. Важливими функціями веб-ресурсу стала можливість пошуку науковців за спільними чи суміжними темами досліджень, пошук однодумців у проведенні майбутній дослідженнь, реалізація спілкування між ними. Також однією з важливих властивостей системи стає реалізація алгоритму для обробки, збереження, виведення поданих матеріалів наукових конференцій, що значно полегшить роботу організаційного комітету.

Для співробітників закладів вищої освіти наявна гостра потреба у якісному програмному забезпеченні для організації наукової діяльності. Досліджуючи досвід іноземних та українських науковців можна побачити тенденцію до віртуалізації різних процесів у науковій сфері, починаючи від проведення онлайн-конференцій і закінчуючи веденням наукової статистики власної діяльності. На даному етапі дослідження питання наявна велика кількість онлайн-сервісів для управління конференціями та журналами. Серед них: EasyChair, Microsoft CMT, Confy, COMS, OpenConf, Conftool, CyberChair, ConfMaster, тощо. Проте важливими залишаються питання щодо організації таких ресурсів на базі власних університетів. У праці Олександр Березко, Лілія Ковалик описано досвід Львівської політехніки [10]. У Львівській політехніці з 2013 року функціонує онлайн-система управління журналами та конференціями, що відображає бізнес-логіку роботи місцевих редколегій та організаційних комітетів і є частиною представлення університету у мережі Інтернет. Ця система складається з підсайтів конференцій та журналів, що є функціонально самостійними одиницями [10]. Проте потреби сучасного світу ставлять нові вимоги до функціоналу такої системи, що призвело до розширення функцій системи, що використовувалась університетом Львівська політехніка. Авторами описано нову систему управління науковими журналами та конференціями Львівської політехніки. Ця система характеризується гнучкістю в налаштуванні різних моделей конференцій, простотою у користуванні та оперативністю розгортання додаткових сторінок для конференцій та журналів [10].

Окрім аналізу результатів власної наукової діяльності, науковцям дуже важливо мати зручну та стабільну комунікацію у сфері свого наукового пошуку. Однією із таких систем

є ResearchGate [11]. Це всесвітня соціальна мережа для спілкування в накових колах. Інтерфейс мережі розроблений англійською мовою для можливості залучення науковців з різних країн. Мережа створена для сприяння науковим дослідженням. Використовуючи цю мережу науковці можуть знаходити колег, які працюють над дослідженням схожої проблематики та поспілкуватися на спільні теми. У мережі також публікують списки наукових конференцій по всьому світу та інформацію щодо вакансій у різних наукових галузях. Кожен з користувачів має можливість розмістити власні напрацювання, переглядати чужі матеріали та вести блог на наукові тематики. ResearchGate містить веб-інструменти, такі як семантичний пошук, обмін файлами, спільне користування базою публікацій, форуми, методологічні дискусії, групи тощо [11].

Використання соціальних мереж спрямованих на розширення наукових зв'язків, налагодження комунікацій, розширення наукових горизонтів у географічному плані значною мірою полегшують процес дослідження. Адже саме за умови вільного та швидкого налаштування зв'зку з колегами, дослідники, а особливо молоді науковці мають змогу створити потужну колаборацію у сфері власних досліджень не залежно від місця локації.

Висновки. Проаналізувавши наявні системи для підтримки наукової діяльності, можна зробити висновок, що спираючись на вимоги сучасного світу, наукова сфера потребує вебресурсів, що зможуть вдосконалити процес наукового пошуку. За допомогою вебсистеми дослідники зможуть вирішувати безліч задач, серед яких налагоджування ділових зв'язків, отримання доступу до матеріалів колег, підтримка наукової роботи, ведення статистики наукової діяльності.

Ефективний онлайн-ресурс, спрямований на підвищення рівня наукової діяльності співробітників закладів вищої освіти повинен містити в собі функціонал, що дозволить оптимізувати наукову роботу. Важливими модулями майбутньої системи є налаштування внутрішньо університетської взаємодії науковців, спрямованої на спільні дослідження, а також ведення звітності публікацій.

Наявність власної внутрішньо університетської системи дозволяє науковцям якісно взаємодіяти в межах наукових досліджень, наукових шкіл, швидко обмінюватися інформацією та поширювати свої напрацювання. Що значно покращить рівень наукової роботи закладу загалом.

Перспективи подальших досліджень можуть бути спрямовані на вивчення технологій та підходів до розробки програмного забезпечення для науково-педагогічних співробітників. А також, розробкою програмного забезпечення, з широкими функціоналом, яке могло б полегшити наукову діяльність ЗВО.

Список літератури:

1. Биков В. Ю., Спірін О. М. Інформаційно-аналітична підтримка науково-педагогічних досліджень на основі електронних бібліометричних систем URL: https://lib.iitta.gov.ua/106914/1/Spirin%20O.M..pdf

2. Смірнова В. А. Дослідження відкритих цифрових інформаційних систем для аналізу результатів дослідницької діяльності науково-педагогічних працівників закладів вищої освіти. *Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету.* 2020. URL: https://openedu.kubg.edu.ua/journal/index.php/openedu/article/view/328

3. Галицький О. В., Семесько Б.Р. Веб-орієнтованісистеми для публікації наукових досліджень. URL: https://e-journals.npu.edu.ua/index.php/ikt/article/view/592/542

4. Feldy M. Internet website as a tool of communication in scientific institutions .2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/307642341_Internet_website_as_a_tool_of_communication_in_scientific_institutions

5. Іванова С., Кільченко А. Моніторинг використання вебсайтів закладів освіти та наукових установ із мобільних пристроїв засобами Google Analytics. 2020. URL: http://npd.roippo.org.ua/index.php/NPD/article/view/210

6. Коломієць А., Лазаренко Н., Громов Є. Концептуальні засади розвитку наукової діяльності педагогічного університету на сучасному етапі розвитку суспільства. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/320698207_Konceptualni_zasadi_rozvitku_naukovoi_dialnosti_pedagogicnogo_universitetu_na_sucasnomu_etapi_rozvitku_suspilstva

7. Med J. Q. Impact of COVID-19 pandemic on the scientific community. 2020. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7372729/

8. Mubin O., Alnajjar F., Shamail A., The new norm: Computer Science conferences respond to COVID-19. 2021. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-020-03788-9

9. Kalia V., Srinivasan A., Wilkins L., Luker G. Adapting Scientific Conferences to the Realities Imposed by COVID-19 .2020. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7294822/

10. Березко О. Розвиток онлайн-платформи для управління науковими конференціями та періодикою львівської політехніки / О. Березко, Л. Ковалик. .2017. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2017/sep/6297/ist-2017-zbirnik-pracfinal1.pdf#page=66

11. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/

Vakaliuk T.A., Bolotina V.V. THE NEED TO DEVELOP AN ONLINE RESOURCE FOR THE SCIENTIFIC ACTIVITIES OF EMPLOYEES IN HIGHER EDUCATION

In the conditions of the Covid-19 pandemic and Russia's war against Ukraine, the scientific activity of employees of higher education institutions needs rapid adaptation to today's conditions. The tasks facing educational institutions and their employees in modern conditions require up-to-date, fast and high-tech solutions. In connection with the change in the format of education, namely the transition to distance and mixed forms of education, a huge number of functions of the higher education institution are being transferred to the online format. The organization and holding of scientific conferences and seminars is being transferred to the online format, and to ensure effective scientific work, scientists increasingly turn to online services that help them improve the process of scientific research and implementation of scientific results.

The article analyzes existing research aimed at studying online platforms and resources to support the scientific activity of scientific and pedagogical workers of higher education institutions and what functional needs they are able to solve. The authors describe the process of organizing the scientific work of employees of higher education institutions, and indicate what changes this process has undergone in the conditions of a pandemic and war. Universities and research centers served as the main platform for the development of scientific research, the functioning of scientific schools and circles, and the holding of seminars. That is why there is a need to provide researchers with high-quality software in the difficult conditions of the transformation of education and science into an online format.

Based on the needs of modern scientists, we can conclude that there is a need for the development of an online resource for scientific activity, the important modules of which will be the settings of intra-university interaction of scientists aimed at joint research and reporting.

Key words: *online system, online resource, scientific activity, scientific conferences, web system.*

УДК 004.91
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/14

Haitan O.M.
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

Kolesnyk D.D.
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

3D COMPUTER GRAPHICS IN THE DEVELOPMENT OF KNOWLEDGE CONTROL SYSTEM IN THE DGBL APPROACH

Nowadays there is a tendency to lose interest in learning among student. Therefore it is important to find a way to diversify the ways of information transmitting and checking its comprehension using the information technologies. The most effective and promising approach is the use of computer games in education – Digital Game Based Learning (DGBL). Games in education can be used to facilitate the information comprehension, as well as to test the student knowledge in the knowledge control systems. Paper discusses development of knowledge control system using 3D computer graphics in the Digital Game Based Learning approach. Main directions in the organization of knowledge control are considered. Method of standardized control in quiz mode is chosen as the basic one. Analysis of the foreign experience, recent research and publications in Digital Game Based Learning domain is conducted. It is noted that the effect of using of DGBL is not unambiguous. Some researchers report about negative effect on students' learning performance mostly in early studies. Other studies showed improving of motivation and students' learning achievements. Methodology of using digital games in the educational process including basic functions, approaches and features (students' age, specificity of the discipline, game genre, capabilities of the selected basic 3D modeling system) is presented. Classification of digital games in educational process is shown. Features of the development of knowledge control systems using 3D modeling are considered. The purpose of the research is to consider the development of a knowledge control system using a game form for students of secondary educational institutions. The article is intended for teacher of educational institutions and specialists in DGBL approach.

Key words: *3D graphics, computer game, Digital Game Based Learning (DGBL), knowledge control system, quiz.*

Introduction. Education cannot stand by and do not change in a society where most industries are becoming computerized. Computer technology and electronic tools are slowly but surely finding their way into educational institutions, especially after COVID-19 pandemic. Since nowadays there is a tendency to lose interest in learning among students, it is important to find a way to diversify the ways of information transmitting and checking its comprehension using the information technologies. The most effective and promising approach is the use of computer games in education – Digital Game Based Learning (DGBL). The adaptation of learning to games reached a new level with the development of digital media. This is a new digital way of information comprehension, built on the enjoyment of the learning process through the game.

Task statement. Games in education can be used to facilitate the information comprehension, as well as to test the student knowledge in the knowledge control systems. Checking of the learned material is an integral part of the educational process.

There are two main directions in the organization of knowledge control:

1) The student's actions are evaluated using systems based on knowledge, i.e. in expert-learning systems. The knowledge level is determined during the dialogue between the teacher and the student and is based on knowledge of the subject area and assessment rules.

2) This approach is to assess the student's knowledge using answers to a specialized set of tasks. Judgments about his knowledge are made according to these answers. Systematic testing of students' knowledge is mandatory in this approach. This method is used quite often, as it has a number of certain advantages:

– the results are obtained in numerical form, which allows for their mathematical processing;

– small amount of time spent on checking.

Testing is an effective method of knowledge checking with standardized control. Testing systems can be similar to tests, quizzes, surveys, and can also have a different appearance: plain text, interactive, using various graphics and animations [1].

Object of research is using of 3D graphics in knowledge control systems.

The purpose of the research is to consider the development of a knowledge control system using a game form for students of secondary educational institutions.

Analysis of recent research and publications. The use of a game form of learning allows you to increase the motivation to study, combine theoretical and practical skills, as well as apply individual and collective work, thereby providing a comprehensive approach. In the game process information is memorized at a subconscious level, so learning of theoretical material and acquiring of practical skills take place at the same time.

Learning games have 3 main functions:

– instrumental: formation of certain skills and abilities;

– gnostic: formation of knowledge and development of students' thinking;

– socio-psychological: development of communication skills.

Each function corresponds to a certain type of game: the instrumental function can be expressed in game exercises, the gnostic function – in didactic ones, the socio-psychological function – in role-playing games. It should be noted that learning games use not only the game method per se. During the game, you can use group and individual work, common discussion, conduct testing and surveys, create role-playing situations. In other words, the game organically combines various methods: brainstorming, method of critical thinking developing through reading and writing, questionnaires, sociometry, etc. [2].

However, the game method has some specificity in pedagogy. In the learning process, the game is often used as an auxiliary element, a supplement to the theoretical material and cannot act as the main learning method.

Several factors should be taken into account when creating an interface:

– students' age;

– specificity of the discipline;

– game genre;

– capabilities of the selected basic 3D modeling system.

The results of the application of learning games are discussed in numerous studies of world experts. Filter "digital-game-based-learning" in Scopus shows rapid increasing of number of publication annually (fig.2).

– *Influence of the DGBL on the learning achievements*

The effect of using of DGBL is not unambiguous. Some researchers report about negative effect on students' learning performance mostly in early studies [3-6]. Other studies showed improving of motivation and learning achievements [7-10]. Hung et al. [7] compared DGBL approach, e-learning approach, and traditional instruction in learning of the elementary mathematics course and found that DGBL group surpassed the other two groups in learning achievements, while the learning achievements of

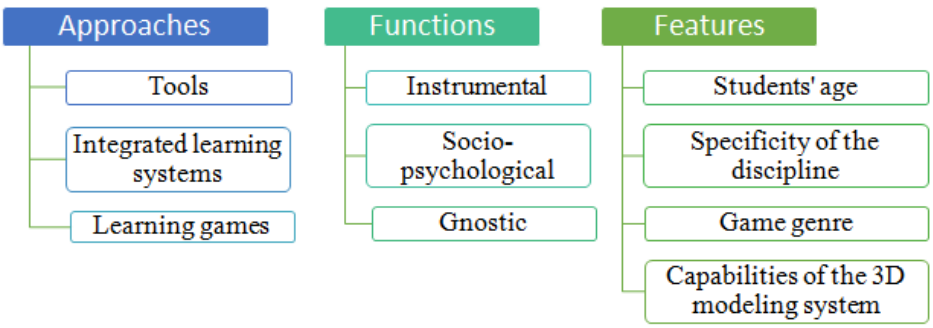


Figure 1. Methodology of using games in the educational process

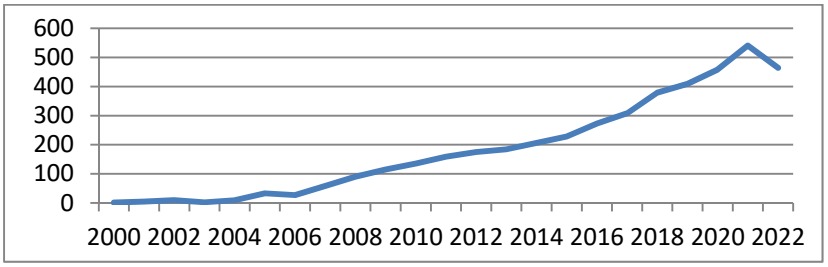


Figure 2. Number of publications in Scopus by the "digital-game-based-learning" filter

the e-learning group and the traditional instruction was at the same level. Interview feedback of DGBL group showed the better engagement in the learning process that may be the reason of better mathematical achievements.

– Review of the DGBL publications

It was conducted several meta-analyses (of games in STEM education in [11], of serious games in [12], influence of video games on students' mathematics achievements in [13]; effectiveness of digital game-based science learning, Gameplay design and Game-mechanism design in [14]) and systematic reviews (30 studies on mobile games in [15], 798 articles in STEM education in [16]). Wang L.-H. et al [11] analyzed 33 studies on the topic with 36 effect sizes and 3894 participants and made conclusion that using digital games could be effective method for STEM education to improve students' academic performance. But teachers should adequately consider learning purposes and methods of integrating games into STEM classroom. Riopel M. et al [12] reported that learning achievements with serious games were slightly higher in domains of declarative knowledge, knowledge retention and procedural knowledge.

– game-based learning in certain academic field.

There are publications connected with foreign languages learning, medical and nursery learning, artificial intelligence and machine learning, STEM courses, particularly mathematics and physics, etc. Giannakos M. et al [17] made review of games used in artificial intelligence and machine learning education, Qais Batiha et al [18] investigated environments used in object-oriented programming including Turtle Graphics, Alice, BlueJ, Greenfoot, Snap!, and NetsBlox, tested their effectiveness with special interview. They pointed out use of Block Programming and collaborative learning to simplify the first approach to programming can reduce and eliminate syntactic difficulties for students, increase confidence and improve learning performance. Other review on using Games in Learning Programming is represented in [19].

– games in test control systems.

For test knowledge checking, one can use the free game-based testing platforms Kahoot and Quizziz, which work in the mode of the competitive multiple-choice quiz and automatically grade students. The advantage of the systems is the competitive mode of the quiz. The programs are compatible with video conferencing systems like Zoom or Microsoft Teams, with Google Classroom and allow students to take the test simultaneously, scoring points and receiving prizes, for example, streak for more correctly answered questions in sequence. The better player's streak is, the more points he gets for the next correct answer.

A literature review that studied the effect of using Kahoot in the learning process based on 93 quantitative and/or qualitative studies is presented in paper [20]. Researchers found that Kahoot have a positive effect on learning achievements compared to traditional learning. It is noted that one research pointed out reducing classroom dynamics using Kahoot over five months while other studies reported about improved classroom dynamics and better interaction between teacher and students. All studies noted improved reducing student anxiety and increasing of students' engagement and confidence.

Main research materials.

Stages of computer game development

Each game goes through a long development process. Quite often, a whole team of people is involved in this process, in which everyone is responsible for a specific stage of work. The number of participants depends on the scope and complexity of the work.

Modern games go through almost the same development stages, with differences depending on the genre and complexity of the game (fig. 3).

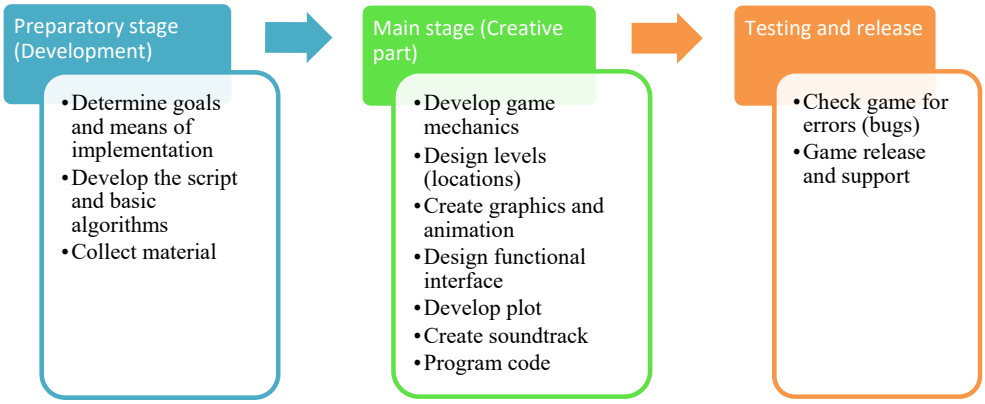


Figure 3. Stages of computer games development

1. Purpose (definition of the project goals, genre and theme).

At this stage, you need to plan the game – clearly to select genre and, starting from this, to create its concept. Genre determines the main actions performed by the player, and setting is responsible for the environment theme. Setting characterizes the belonging of the game to any plot theme or a specific virtual world. The most popular settings are: fantasy, post-apocalyptic, science fiction, medieval, comics and anime.

2. Implementation means (choice of materials and tools).

Program code is the game frame. Therefore at this stage language programming is choosen and program code is written, which can operate 2D or 3D-world objects, add images and sounds. In our time, software modules (game engines) are being developed, in which the basic functions have already been implemented, in order to build graphics, sound, objects and their movement.

3. Game mechanics (development of game rules, objects and their control; creation of artificial intelligence).

Game mechanics is a set of rules whereby the game will function. Each action has its own rule, which ensures the game logic. This stage includes the development of objects and their control, object interaction, influence of players on the items, assignment of keys that will be controlled by the main character or object, and actions that will take place after pressing certain buttons. It is also necessary to take into account the physical properties of objects and give them characteristics corresponding to the physical laws of the real world. Depending on the genre of the game, it is necessary to develop an artificial intelligence that will be responsible for the behavior of secondary characters.

4. Levels (composition of created objects on locations).

Environments are formed where models are located and previously created rules are applied.

5. Graphics (creation of 2D or 3D models, animation, backgrounds and special effects; game menu and screen design).

Images of players, game objects and backgrounds are developed. Based on these images, models and animation for them are created, backgrounds are drawn. Special effects are added that use the movement of particles and light filters.

6. Plot (history in game).

As a rule, computer game is built by some kind of scenario. The role of scenarios is especially strong in role-playing, adventure games and in mixed genre games.

7. Sound (creation of sound effects and music).

A sound accompaniment design is equally important in the game development. Background melody sets the main mood, and sound effects add reality to the process.

8. Testing.

At this stage, project build takes place and correctness of game components is checked.

9. Issue.

The last stage is game release and its further support [21].

Before starting work, you need to determine the genre in which the game will be created. The range of existing genres is quite large, so you can choose a direction to begin with, and later in the development process clearly what exactly you want to see at the end.

Figure 4 shows a complete list of existing genres of computer games. As the main criterion for the distribution of genres, we choose actions that are most often performed in games of this genre and the number of elements [22].

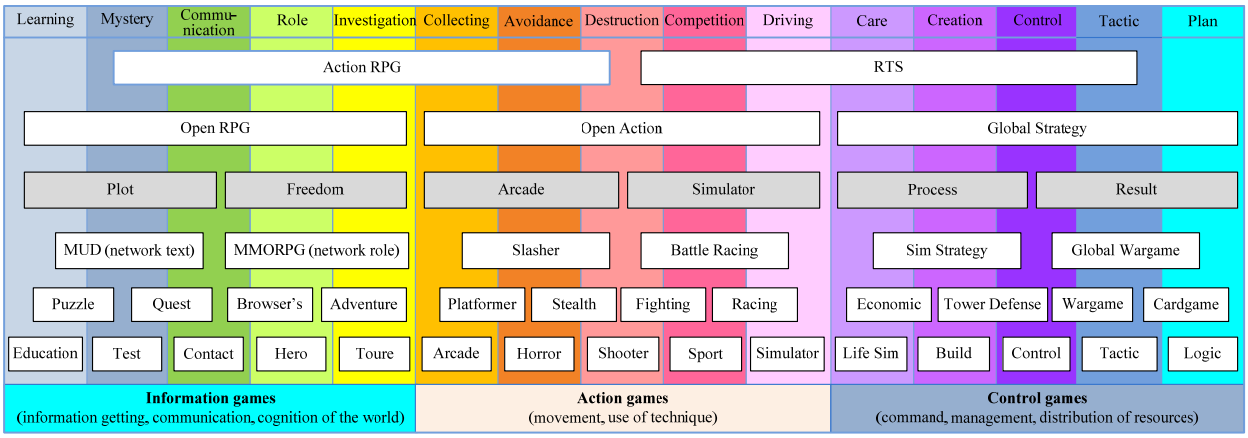


Figure 4. Genres of computer games

The games are divided into three main genres:
– action games;
– information games (role-playing);
– control games (strategy).

The main thing in action games is the body movement which is controlled by the player. Body can be a model of a person, animal, equipment, etc. Such games are known for their dynamics and help players to develop their reaction speed. The best example would be action movie games. They occupy the largest segment of the global game market and are the most popular. The standard scenario for such a play: character control, which can be driven by various special tricks, to reduce enemies. Through its popularity, such games are the most innovative, they use 3D-graphics and special effects and technologies.

Information games are responsible for the transfer of information in any forms to the player. They include learning world through the environment, comprehension of educational material or acquiring skills through communication. The range of such games is quite large, but role-playing games are considered the Golden mean. That is, these are games in which it is possible to take on the hero role and to live his life. Such games are appreciated for their atmosphere, plot and detailed game world.

Games aimed at the development of resource management and administration skills are called control games. The essence of the game is to plan and manage events and resources to gain advantages in the future. This type includes all games of the strategy, economic, logical and tactical genres. It is often assumed that some genres of information and control games are similar to each other, but one important difference must be kept in mind: information games must be solved by relying on the knowledge received in the game, unlike control games. Here you need to come to a result, relying only on the ability to plan each of your further steps in detail.

All games within each group are very similar to each other, but have certain differences. The game in the knowledge control system belongs to the genre of information games and contains a certain riddle that the player must solve, that is, it is an elementary genre of a riddle – a test. It can be a kind of quiz, similar in principle to the well-known game «Who wants to become a millionaire?», but have a completely different interface or be part of a quest, at each stage of which the student receives different tasks or questions.

Variants of computer game classification are represented in fig. 5.

Stages of creation of 3D animation

The process of creating 3D graphics is quite complex and is therefore divided into certain stages. Depending on what work is being done and what the developer wants to see at the end, the number of stages can vary. In general, there are 10 most common stages of creating a 3D animation project (fig. 6).

Let's consider in detail each stage of a 3D animation creation:

1. Concept and storyboards.

3D animation creation starts with idea conceptualization and storyboard creation. A storyboard is a sequence of illustrations showing a story in two dimensions: time and interaction (images and transitions between them).

2. 3D modeling.

Modeling involves creating props, environment, and characters. In 3D computer graphics, 3D

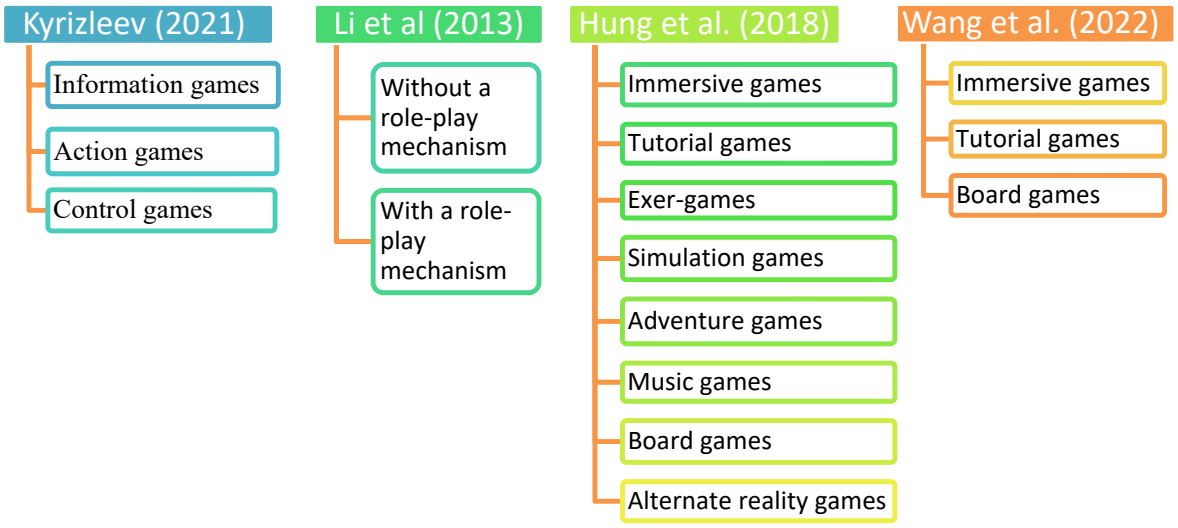


Figure 5. Computer game classifications

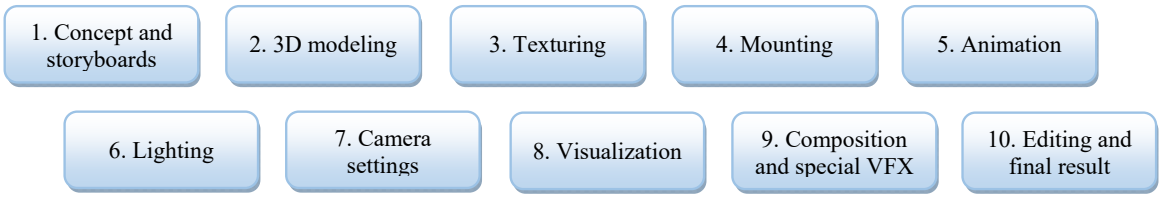


Figure 6. Stages of creation of 3D animation

modeling is the process of developing a mathematical representation of any object surface in three dimensions using specialized software. 3D modeling software is a class of 3D computer graphics software used to create 3D models. 3D models, in this case, are digital images of physical objects. Three-dimensional models, as a rule, consist of a polygonal mesh and a surface texture. A polygon mesh is a «shell» consisting of different surfaces of a three-dimensional object. This shell consists of three main components: vertices (points), edges (lines) and faces (planes). A surface texture is basically an image applied to the surface of a polygon mesh. A texture can be as simple as a solid color or as complex as a high-resolution photo. The texture will be applied to the surface using specific instructions. These textures can have physical properties that interact with light to create effects such as shadow, reflection, transparency, etc.

There are different types of 3D model creation. The most important one are:

– polygonal modeling creates an object of any complexity by combining different groups of polygons;

– spline modeling creates 3D objects using splines, i.e. curved lines;

– NURBS modeling is a technology for creating 3D objects using special curves called B-splines;

– 3D-sculpting or digital sculpture, is an imitation of the 3D model "sculpting" process, i.e. deformation of its polygonal mesh with the help of special tools – brushes, brushes.

– industrial modeling uses creation of models from solid figures or surfaces.

3. Texturing.

While 3D model creation 2D image can be overlaid on it using programs like Photoshop to represent texture, color or design. This process is called mapping. Mapping is used, for instance, for hair texture creation.

4. Model skeleton and skin covering.

Rigging is the process of establishing a controlled skeleton for a character intended for animation. Skinning is the process of attaching a 3D model (skin) to a molded skeleton so that the 3D model can be manipulated using skeleton controls [23].

5. Animation.

Animation is the process of capturing a three-dimensional object and moving it. Animation has several various types: keyframe animation, placing objects on splines and setting them to a curve path, or importing motion capture data and applying it to the skeleton.

6. Lighting.

Lighting along with textures, camera angles, etc. can bring to life a scene. 3D light is a virtual object developed to simulate working of lighting in real life.

7. Camera settings.

In 3D one can create one or more cameras, locate them in 3D space, and use settings to simulate focal length, field depth, and other camera features.

8. Visualization.

Image rendering is usually the last step in the 3D production pipeline, and, may be, the most important part.

9. Composition.

Visualization is added to compositing programs for editing, finishing and adding special effects. Composition includes special effects, scene expansion, environment creation, replacing the background with footage shot in other place or artificially generated. Music is added to the graphic.

10. Editing and the final result.

At the last stage, developers make sure that all objects are synchronized and their work and performance are correct. Project is compiled and exported to required format [23].

The system of knowledge control using computer graphics for students of secondary education institutions

At National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic" a system for knowledge control using computer graphics for learning of programming by students of secondary education institutions was developed.

The knowledge control system development toolkit is responsible for game logic, display of graphic objects on the screen and allows the user to interact with the created environment. The game engine is the game core, that is, the basic software on which all other components of the game are built. There are two types of of game engines using in game development:

1) use of ready-made software;

2) own implementation.

Table 1

Elements of the game environment

Component	Definition	Example
Object	3D models located in the game	Landscape, natural environment, buildings, train, railway track, characters
Scene	Place or world where main actions take place	Cirty, mountains, desert, beach, swamp, glaciers
Actions	Movement of objects according to the specified parameters	Movement of the train along the railway track
Interaction with the user	With help of quiz	Clicking a computer mouse to give an answer

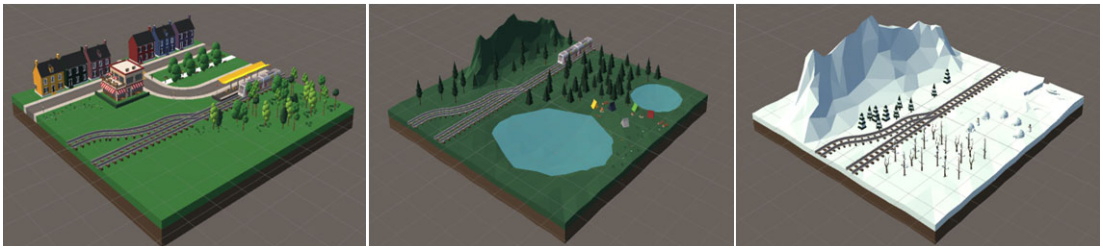


Figure 7. Game scenes created using computer graphics in knowledge control system

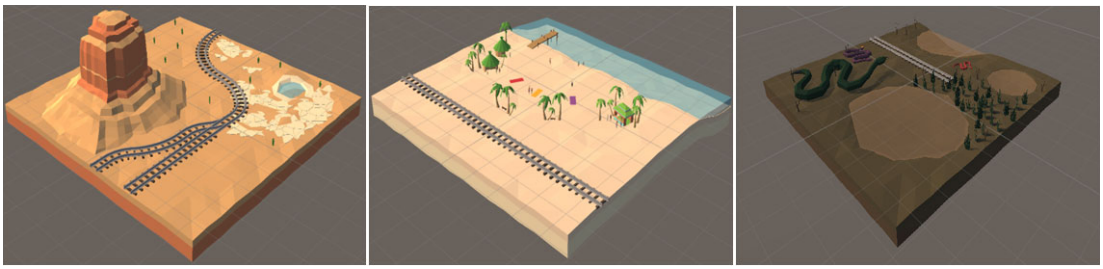


Figure 8. Game scenes created using computer graphics in knowledge control system ()

The first variant provides a significant reduction of development time, since the implementation of most tasks of a low complexity level is already realyzed. It greatly simplifies the process and allows people with lower programming skills to get involved in development. Therefore, Unity 3D was chosen as the software that will support the use of 3D graphics and C# programming language.

The central element of the project is the Game object, because it is the container for all other game logic, which sets the physical state in the game space and interacts with systems of the code calling. Therefore, it is the foundation in all games created on Unity 3D. Scripts are responsible for the implementation of functionality and logic is set of modules that are specified using software code.

The elements of the game environment are presented in table 1.

It was decided that the game would provide a multiple/single choice quiz, set of characters that react to answers and give prompts, and a set of different scenes, between which the train would move depending on the answers to the quiz questions. Each of these scenes has been created with a specific theme and has a different set of models. The main game object is the train and the railway tracks along which it moves.

The view of the scenes is presented in fig. 7–8.

Conclusions. The work considers the use of computer graphics in knowledge control systems within the Digital Game Based Learning approach. Game forms of knowledge control systems allow to increase the general interest and engagegement in learning among students of secondary educational institutions and improve the academic performance of such learning.

Bibliography:

1. Основні форми контролю знань студентів. URL: https://ru.osvita.ua/vnz-reports/pedagog/14679/. Accessed: 10.11.2022.

2. Использование игровых приемов при формировании элементарных математических представлений у детей старшего дошкольного возраста. URL: https://nsportal.ru/detskii-sad/vospitatelnaya-rabota/2020/05/18/ispolzovanie-igrovyh-priemov-pri-formirovanii. Accessed: 10.11.2022.

3. Neimeyer S.A. An examination of the effects of computer-assisted educational games on student achievement. Master of Science thesis, University of Houston-Clear Lake. 2006. URL: https://www.learntechlib.org/p/116207/. Accessed: 10.11.2022.

4. Charsky D., Ressler W. "Games are made for fun": Lessons on the effects of concept maps in the classroom use of computer games. *Computers & Education*. 2011. 56(3). Pp. 2011604–615.

5. Pierfy D.A. Comparative simulation game research: Stumbling blocks and steppingstones. *Simulation & Games*. 8(2). 1977. Pp. 1977255–268.

6. Randel J. M. et al. The effectiveness of games for educational purposes: A review of recent research. *Simulation & Gaming*. 23(3). 1992. Pp. 1992261–276.

7. Hung C.M., Huang, I., Hwang, G.J. Effects of digital game-based learning on students' self-efficacy, motivation, anxiety, and achievements in learning mathematics. *Journal of Computers in Education*. 2014. 1(2–3). Pp. 151–166.

8. Chu H.C., Chang S.C. Developing an educational computer game for migratory bird identification based on a two-tier test approach. *Educational Technology Research & Development*. 2014. 62(2). Pp. 147–161.

9. Hwang G. J. et al. A knowledge engineering approach to developing educational computer games for improving students' differentiating knowledge. *British Journal of Educational Technology*. 2013. 44(2). Pp. 183–196.

10. Hwang G.J., Wu P.H., Chen C.C., Tu N.T. Effects of an augmented reality-based educational game on students' learning achievements and attitudes in real-world observations. *Interactive Learning Environments*. 2016. 24(8). Pp. 1895–1906.

11. Wang LH. et al. Effects of digital game-based STEM education on students' learning achievement: a meta-analysis. *International Journal of STEM Education*. 2022. 9, 26. 13 pp.

12. Riopel M. et al. Impact of serious games on science learning achievement compared with more conventional instruction: An overview and a meta-analysis. *Studies in Science Education*. 2019. Pp., 169–214.

13. Tokac U., Novak E., Thompson C.G. Effects of game-based learning on students' mathematics achievement: A meta-analysis. *Journal of Computer Assisted Learning*. 2019. 35(3). Pp. 407–420.

14. Tsai Y.L., Tsai C.C. A meta-analysis of research on digital game-based science learning. *Journal of Computer Assisted Learning*. 2020. 36(3). Pp. 280–294.

15. Gao F., Li L., Sun Y. A systematic review of mobile game-based learning in STEM education. *Educational Technology Research and Development*. 2020. 68(4). Pp. 1791–1827.

16. Li Y. et al. Research and trends in STEM education: A systematic review of journal publications. International Journal of STEM Education. 2020. 7, 11.

17. Giannakos M. et al. Games for Artificial Intelligence and Machine Learning Education: Review and Perspectives. URL: 10.1007/978-981-15-6747-6_7. Accessed: 10.11.2022.

18. Batiha Qais et al. Adoption of Visual Programming Environments in Programming Learning. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*. 2022. Vol.12. No. 5. Pp. 1921–1930.

19. Theodoropoulos A., Lepouras G. Digital Game-Based Learning and Computational Thinking in P-12 Education: A Systematic Literature Review on Playing Games for Learning Programming. 2020. URL: 10.4018/978-1-7998-4576-8.ch007. Accessed: 10.11.2022.

20. Wang Alf Inge, Tahir Rabail. The effect of using Kahoot! for learning – A literature review. *Computers & Education*. 2020. Vol. 149. 103818.

21. Киризлеев А. Этапы создания компьютерной игры. URL: https://gamesisart.ru/game_dev-create.html#Game_Create. Accessed: 10.11.2022.

22. Киризлеев А. Жанры компьютерных игор. URL: https://gamesisart.ru/TableJanr.html. Accessed: 10.11.2022.

23. The Process of 3D animation. URL: https://www.media-freaks.com/the-process-of-3d-animation/. Accessed: 10.11.2022.

Гайтан О.М., Колесник Д.Д. 3D КОМП'ЮТЕРНА ГРАФІКА В РОЗРОБЦІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ ПРИ DGBL ПІДХОДІ

У наш час спостерігається тенденція до втрати інтересу до навчання серед учнів, тому важливо знайти спосіб урізноманітнити способи передачі інформації та перевірки її сприйняття за допомогою інформаційних технологій. Найбільш ефективним і перспективним підходом є використання комп'ютерних ігор в освіті – Digital Game Based Learning (DGBL). Ігри в навчанні можна використо-

вувати для покращення сприйняття інформації, а також для перевірки знань учнів у системах контролю знань. У статті розглядається розробка системи контролю знань з використанням тривимірної комп'ютерної графіки при підході до навчання на основі цифрових ігор. Розглянуто основні напрямки організації контролю знань. В якості основного методу обрано метод стандартизованого контролю у вигляді вікторини. Проведено аналіз зарубіжного досвіду, останніх досліджень і публікацій у сфері навчання на основі цифрових ігор. Зазначається, що ефект від використання DGBL не є однозначним. Деякі дослідники повідомляють про негативний вплив на успішність навчання переважно в більш старих публікаціях. Інші дослідження відвімитили збільшеннямотивації та покращення навчальних досягнень учнів. Представлено методику використання цифрових ігор у навчальному процесі з урахуванням основних функцій, підходів та особливостей (вік студентів, специфіка дисципліни, жанр гри, можливості обраної базової системи 3D моделювання). Показано класифікацію цифрових ігор у навчальному процесі. Розглянуто особливості розробки систем контролю знань з використанням 3D моделювання. Мета дослідження – розглянути питання розробки системи контролю знань в ігровій формі для учнів загальноосвітніх навчальних закладів. Стаття призначена для викладачів навчальних закладів та спеціалістів з підходу DGBL.

Ключові слова: *3D графіка, комп'ютерна гра, Digital Game Based Learning (DGBL), система контролю знань, вікторина.*

УДК 004.05
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/15

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

Фещенко І.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Потапова К.Р.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тарасенко-Клятченко О.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Івасенко Д.В
Національна академія внутрішніх справ

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧЧЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЄДНАННЯ МЕТОДІВ HAAR TA SVM

У статті досліджено метод Haar та запропоновано варіант його поліпшення. На сьогоднішній день програми, що спираються на алгоритми розпізнавання обличчя, відіграють ключову роль у наших життєвих процесах, бо різного роду біометричні системи задовольняють потреби у аутентифікації та ідентифікації людей для подальшого використання у конструкціях, які гарантують різного роду безпекові питання: охорона місцевості та режимних об'єктів різного штибу секретності, гарантування безпеки фінансових операцій, забезпечення секретності інформації інтимного характеру тощо. Існує вже багато гарних прикладів комерційних продуктів, що стосуються приватних даних, які повинні бути максимально захищеними та в той же час достатньо комфортній у використанні, і на поміч у цій справі приходить технологія розпізнавання обличчя з інтеграцією у більшу систему алгоритмів обробки та аналізу. Місцевими прикладами таких успішних комерційних продуктів є фінансові операції за використанням додатку Приват 24 або його екосистеми, система ідентифікації у Дії, яка дає змогу верифікувати особистість максимально швидко та зручно. Також варто зазначити, що ця технологія стає невід'ємною частиною систем контролю правопорядку, яка може дуже допомогти слідчим органам притягнути обвинувачуваного до відповідальності, чи військових систем виявлення противника або локалізації району майбутнього ураження.

Чіткий алгоритм, висока швидкодія та точність є визначальними рисами методів, що обираються для використання у вищеназваних системах, бо в цьому питанні кількість допущених помилок у геометричні й прогресії погіршує можливі наслідки, саме тому в цій статті буде надано поліпшення існуючого алгоритму з вибудуваною архітектурою.

Ключові слова: *метод опорних векторів, Haar, система розпізнавання обличчя.*

Постановка проблеми. Одним з головних видів верифікації та ідентифікації є системи розпізнавання обличчя. Зазвичай такого роду системи складаються з трьох основних етапів:

– отримання зображення і його початкова обробка;

– визначення характеристик та основних особливостей;

– класифікування.

Алгоритми машинного навчання відносять до останнього етапу і є одним з двох головних стовпів якості розпізнавання обличчя у різних формаціях та позиціях верифікації, а, отже, існує потреба у модифікації існуючих систем, використовуючи позитивні сторони такого роду навчання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи розпізнавання обличчя зазвичай складаються з двох основних фаз: тренування або під-

готовка моделі та етап аналізу або тестування. В свою чергу ці дві фази поділяють на три етапи, що представлені трохи вище, перший етап фактично є першою фазою, а ось останні два етапи відносять до другої фази.

Далі будуть представлені роботи, які являються дуже корисними кроками у загальному розвитку такої технології як детектор обличчя або схожих за призначення систем.

У 2003 році вийшла робота під назвою «Face photo recognition using sketch» [3], розроблена вона була представниками Китайського Університету Гонконга Ксиаоу Тангом і Ксиагенг Вангом. У ній було представлено дороблений алгоритм «конвенціонального ейгенфесу», який в основі своїм мав трансформаційний алгоритм, що допомагав перетворити реальні фотографії у відповідний доробок для більш точного порівняння, використовуючи при обробці «ейганфейс особливості». Порівняння проводилося між трьома методами:

– Простий геометричний метод, що включав у себе 26 ідентифікаторів, які допомагають за ключовими особливостями такого об'єкту як обличчя визначити схожість фото із замальовкою;

– «Ейгайнфейс» метод

– Новий модифікований метод.

Їхня галерея для порівняння складалась з 100 фотографій та отриманий результат виправдав сподівання, було отримано приріст щонайменше на 20-30% від значень перших двох методів, таблицю результатів можна побачити нижче (рис. 1).

У 2010 році вийшла робота під назвою «Selecting Optimal Orientations of Gabor Wavelet Filters for Facial Image Analysis» [3], розроблена вона була представниками Китайського Університету Гонконга Ксиаоу Тангом і Ксиагенг Вангом. У цьому дослідженні вони представили алгоритм дій для зменшення кількості фільтрів Габора, при тому покращуючи точність класифікації. В роботі вони описують надмірність фільтрів Габора при використанні однаково розподілених орієнтацій, тому вони створили наступний алгоритм дій:

1. Аналіз гістограми орієнтованого градієнта середнього зображення обличчя в наборі даних з виключенням менш значущих комбінацій орієнтації;

2. Проводять повторні проходи з вибіркою інших комбінацій для точності перехресної перевірки. Процес вибору досить простий, але дуже ефективний і відповідає розподілу градієнта обличчя.

3. Виступ і узагальнення вибраних фільтрів Габора оцінюється за допомогою розпізнавання обличчя та класифікацією за статевою ознакою на різних наборах даних.

Результати показують, що вибрані фільтри Габора відповідають вимогам

оптимальний і може краще відображати зображення обличчя з меншими витратами на обчислення, також таблицю з результатами точності визначення (рис. 2).

У 2018 році вийшла робота під назвою «Robust Face Recognition Approaches Using PCA, ICA, LDA Based on DWT, and SVM algorithms» [2], розроблена вона була представниками Вищої національної інженерної школи Тунісу Зієдом Баннуром Лахавом, Дхекрою Ессаіданом та Хессеном Седіком. У цій статті вони запропонували підходи до розпізнавання обличчя ДВТ (Дискретне вейвлет-перетворення) + АСК (Аналіз основних компонентів) + ПВМ (Підтримуюча векторна машина), ДВТ + НАК (Незалежний аналіз компонентів) + ПВМ і ДВТ + ЛДА (Лінійний дискримінантний аналіз) + ПВМ. Ефективність цих підходів оцінювалась шляхом моделювання в базі

Рівень	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Геометричний метод	30	37	45	48	53	59	62	66	67	70
Ейганфейс метод	31	43	48	55	61	63	65	65	67	67
Новий метод	71	78	81	84	88	90	94	94	95	96

Рис. 1. Сукупна оцінка відповідності для трьох методів

Експеримент	Кількість фільтрів	Кількість фільтрів	Час	Точність
Розпізнавання обличчя	40	10000	0.36 с.	98.5%
	20	5000	0.18 с.	100%
Гендерна класифікація	40	4000	0.4 с.	96.17%
	20	2000	0.2 с.	97.02%
	10	1000	0.1 с.	96.17%

Рис. 2. Порівняння продуктивності оптимальних орієнтацій Габора та повного сімейства Габорів

даних AT&T і порівняльного дослідження. Така ефективність пояснюється попередньою обробкою ДВТ, яка дозволяє зберігати найважливішу інформацію у вхідних зображеннях. Крім того, ця попередня обробка підвищує швидкість розпізнавання підходами порівняно з іншими підходами на основі АСК + ПВМ, НАК + ПВМ або ЛДА + ПВМ.

Чітко було продемонстровано приріст точності визначення за запропонованим підходом, при найскромніших приростах вони отримали значення 1-2%, а при найкращому варіанті – коло 20%, що є досить непоганим результатом.

Формулювання цілей статті.

Алгоритми машинного є другим за важливістю форпостом у системах розпізнавання обличчя і на них буде побудовано все дослідження для того, щоб знайти найліпший та найоптимальніший за нашою версією метод.

Визначатися якість алгоритму буде за такими характеристиками :

F-міра, дає достатньо глибоке розуміння точності алгоритму, беручи до уваги повноту тесту;

Коефіцієнт правильного визначення.

Виклад основного матеріалу.

Haar Cascade Face Detector

Haar Cascade Face – це алгоритм для виявлення об'єктів, в нашому випадку обличчя людей, на основі машинного навчання.

Машинне навчання полягає в тому[8], що каскадна функція проходить тренування на великій кількості позитивних та негативних зображень, де позитивні – це ті зображення, на яких присутній об'єкт для пошуку, а негативні – це ті, де цього об'єкту немає.

Це навчання відбувається за наступним алгоритмом :

– Даємо тестові зображення (x_1, y_1), ... , (x_n, y_n) where y_i = 0,1 для негативного або позитивного результату відповідно;

– Ініціалізуємо значення ваги $w_{1,i} = \frac{1}{2m}, \frac{1}{2l}$ для y_i = 0,1 відповідно, де m та l – це кількість негативних та позитивних відповідно;

– Далі ми заходимо у цикл $= 1, \ldots, T$:

1. Нормалізуємо вагу, $w_{1,i} \leftarrow \frac{w_{t,i}}{\sum_{j=1}^{n} w_{1,j}}$, так що w_t – це розподіл ймовірностей;

2. Для кожної ознаки j, треба «потренувати» класифікатор h_j, який обмежується використання однієї ознаки. Похибка оцінюється з урахуванням $w_t, \epsilon_{1,i} = \sum_i w_i |h_j(x_i) - y_i|$;

3. Обираємо класифікатор h_j з відповідним найменшим значенням

помилки ϵ_t;

4. Перераховуємо значення ваги: $w_{t+1,i} = w_{t+1,i}\, \beta_t^{1-e_i}$,

де e_i = 0, якщо x_i класифіковано правильно та e_i = 1, якщо класифікована неправильно та в цьому випадку $\beta_t = \frac{\epsilon_t}{1-\epsilon_t}$

– Остаточний вирішальний класифікатор буде таким:

$$h(x) = \begin{cases} 1, \sum_{t=1}^{T} \alpha_t h_t(x) \geq 0.5 \sum_{t=1}^{T} \alpha_t \\ 0, \text{якщо протилежне першому} \end{cases}, \text{ де } \alpha_t = log \frac{1}{\beta_t}$$

Переносячись від алгоритму у текст, як було сказано раніше навчання проводиться на двох типах зображень і в нашому випадку позитивними є зображення обличь, а негативними – зображення без граней, це нам дає змогу підготувати класифікатор. Вся основна робота проходить за допомоги так званого «фільтра», використовуючи який вилучаються особливості із поточного зображення, також варто сказати, що ця система є подібною до згорткового ядра.

Ці фільтри представлені на рисунку 3.

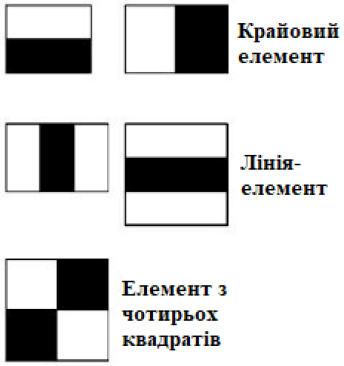


Рис. 3. Вигляд фільтрів Haar

Представлені вище фільтри накладаються на зображення перевіряючи однин сектор (вікно) і далі переходять на інший. Далі для кожного сектору іде обрахунок інтенсивності кожного пікселя за його відповідністю чорному та білому кольорам. Наступним кроком отримується значення витягнутої ознаки, що обраховується як різниця двох сум отриманих на минулому етапі. В найкращому випадку значення ознаки повинно показувати її релевантність.

Далі ми стикаємося з великою кількістю повернутих обрахунків з секторів, які треба оптимізувати. І тут на допомогу приходить концепція Integral Image – це особлива структура даних та алгоритм підрахунку значень у прямокутній підмножині сітки, який спровокує зменшення кількості обчислень для отримання потрібного результату.

На наступному кроці оптимізації ми повертаємося до класифікаторів і завдяки технології Adaboost

створюється так званий «сильний» класифікатор з декількох «слабких», а об'єднання проводиться за спільними найкращими характеристиками.

Останнім кроком оптимізації виступає наша каскадність, яка існує для правильного групування ознак за різними стадіями класифікаторів і подальшого їх застосування по черзі у відповідних секторах. Це дає змогу відкинути відповідні сектори і застосування означень для них, а отже це створює прецедент більш економічного використання пам'яті.

Метод опорних векторів

SVM – алгоритм навчання з учителем. Головна мета SVM як класифікатора – знайти рівняння роздільної гіперплощини $w_1x_1 + w_2x_2 + \ldots + w_nx_n + w_0 = 0$ у просторі R^n, яка розділила б два класи якимось оптимальним чином [5]. Загальний вид перетворення F об'єкта x у мітку класу Y: $F(x) = \text{sign}(w^Tx - b)$. Пам'ятатимемо, що ми позначили $w = (w_1, w_2,\ldots, w_n)$, $b = -w_0$). Після налаштування ваг алгоритму w і b (навчання), всі об'єкти, які потрапляють по одну сторону від побудованої гіперплощини, передбачатимуть як перший клас, а об'єкти, що потрапляють по інший бік – другий клас.

Усередині функції sign() стоїть лінійна комбінація ознак об'єкта з вагами алгоритму, саме тому SVM відноситься до лінійних алгоритмів. Розділяючу гіперплощину можна побудувати різними способами, але в SVM ваги w і b налаштовуються таким чином, щоб об'єкти класів лежали якнайдалі від роздільної гіперплощини. Іншими словами, алгоритм максимізує відступ (англ. margin) між гіперплощиною та об'єктами класів, які розташовані найближче до неї. Такі об'єкти називають опорними векторами (рис. 4). Звідси й назва алгоритму.

Архітектура системи та запропоноване вдосконалення

Для початку обираються негативні фотографії, що не містять жодних обличь в цілому та позитивні з нормальними зображеннями, далі все проводиться за алгоритмом описаним вище і ми отримуємо так званий потужний класифікатор. Далі до справи доєднається метод опорних векторів, який робить свій вклад у алгоритмізацію машинного

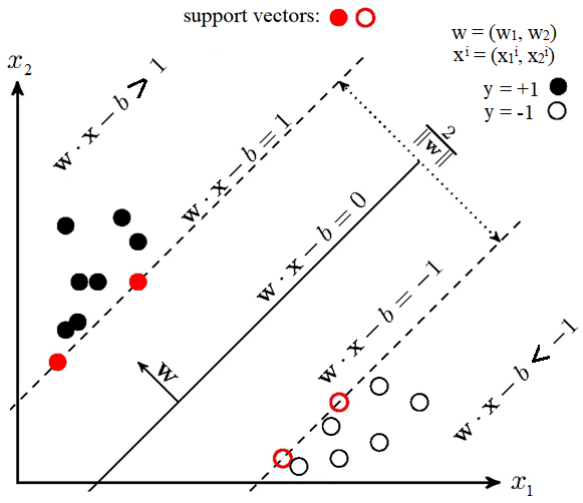


Рис. 4. Візуалізація методу опорних векторів

навчання для вирішення проблем класифікації, що часто виникають у таких випадках. В нашому випадку це буде використовуватись у вигляді додавання нових прикладів до даних навчання, класифікуючи одержані екземпляри зображень у різні категорії. Тому тут використовується так зване навчання без контролю, де буде відбуватися пошук кластеризації у групах, а потім відображатися у вигляди даних для визначених підгруп. Структура роботи системи можна побачити на рисунку 5 нижче.

Системи оцінювання та бази даних

Щоб оцінити систему розпізнавання обличчя було обрано дві бази даних:

- FEI Face Database;

База даних обличь FEI – це бразильська база даних обличь, яка містить набір зображень обличь, зроблених у період з червня 2005 року по березень 2006 року в Лабораторії штучного інтелекту FEI в Сан-Бернарду-ду-Кампо, Сан-Паулу, Бразилія. Є 14 зображень для кожного з 200 осіб, загалом 2800 зображень. Усі зображення кольорові та зроблені на білому однорідному фоні у вертикальному фронтальному положенні з поворотом профілю приблизно до 180 градусів. Масштаб може відрізнятися приблизно на 10%, а вихідний розмір кожного зображення становить 640x480 пікселів.

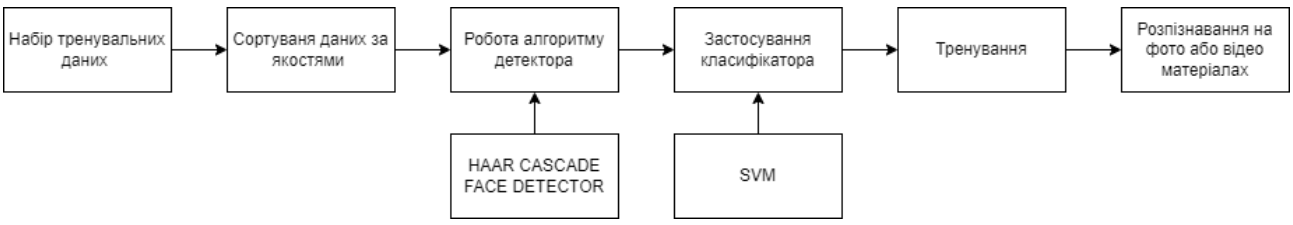


Рис. 5. Архітектура запропонованої системи

Усі обличчя в основному представлені студентами та співробітниками FEI віком від 19 до 40 років із виразною зовнішністю, зачіскою та прикрасами. Кількість суб'єктів чоловічої і жіночої статі абсолютно однакова і дорівнює 100.

• Senthill IRTT Face Database Version 1.1.

Ця база даних містить зображення обличчя студентів IRTT (Інститут дорожніх і транспортних технологій) як кольорові, так і зображення обличчя в градаціях сірого. Є 317 зображень обличчя для 13 студентів IPTT. Вони мають однаковий віковий фактор приблизно від 23 до 24 років. Зображення разом із фоном знімаються цифровою камерою Canon із роздільною здатністю 14,1 мегапікселя. Фактичний розмір обрізаних обличь становить 550x780, і вони додатково змінюються до коефіцієнта зменшення 5. З 13, 12ь чоловіків і одна жінка. Кожен суб'єкт має різні вирази обличчя, невеликий макіяж, шарф, пози та капелюх.

Системи оцінювання за двома параметрами продуктивності:

• Коефіцієнт вдалого розпізнання або ККД розпізнавача.

Визначається як відношення вдалих розпізнавань до загальної кількості спроб.

• F-міра.

Визначається вона через два основі параметри – повнота та влучність [1], де першим є наш коефіцієнт вдалого розпізнавання, а другим – ввідношення вірно визначених позитивних результатів до всіх позитивних з визначеними неправильно, формула виглядає наступним чином (рис. 6).

Загальним результатом успішності є сума цих двох параметрів.

Беремо наші методи машинного навчання та дві бази даних і отримуємо графіки з наступними результатами (рис. 7 та 8).

$$F_1 = \frac{2}{\text{повнота}^{-1} + \text{влучність}^{-1}} = 2 \cdot \frac{\text{влучність} \cdot \text{повнота}}{\text{влучність} + \text{повнота}} = \frac{\text{ІП}}{\text{ІП} + \frac{1}{2}(\text{ХП} + \text{ХН})}.$$

Рис. 6. Формула F-міри

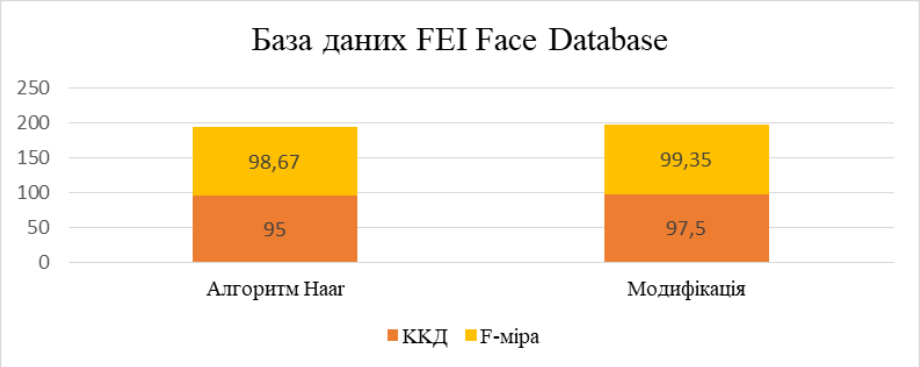


Рис. 7. Графік для першої бази даних

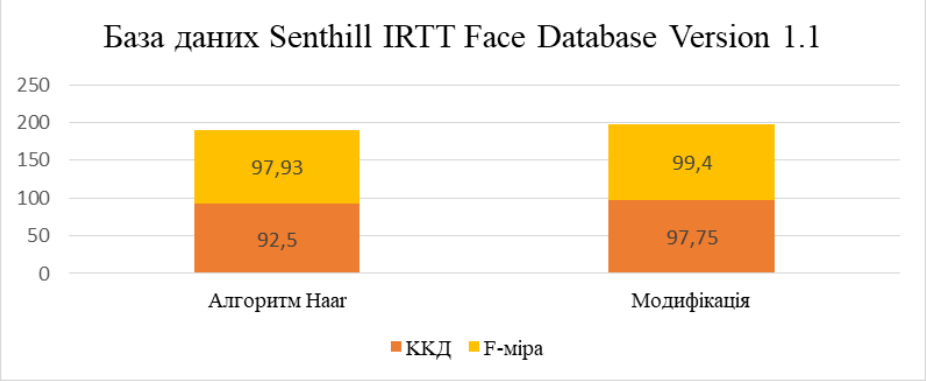


Рис. 8. Графік для другої бази даних

Висновки. У цій статті розкрито принципи роботи алгоритму Haar та модифікацію у вигляді поліпшення класифікації та проблем, що можуть виникати з нею. Для модифікації було використано метод опорних координат, який показав дуже непоганий результат. Чітко видно прирости у якості ідентифікації на кожній базі даних з великою кількістю різноманітних фотозображень, в першому випадку споглядається невелике збільшення на 3,17 відносних одиниць при досить гідному значенню розпізнавання до модифікації, а от у другому випадку ситуація є ще кращою і виражається вона у 6,72 відносних одиниць. Також варто зазначити створену архітектуру системи розпізнавання за її структуру та чітку послідовність дій.

Список літератури:

1. Гущин І. В., Сич Д. О., Аналіз впливу попередньої обробки тексту на результати текстової класифікації, 264–266, 2018.
2. Z. B. Lahaw, D. Essaidani, and H. Seddik. “Robust Face Recognition Approaches Using PCA, ICA, LDA Based on DWT, and SVM Algorithms”, 2018, pages 1–5.
3. T. Zhang, Lu Bao-Liang “Selecting optimal orientations of Gabor wavelet filters for facial image analysis”, 2010, pages 218–227.
4. X. Tang, X. Wang, “Face photo recognition using sketch”, 2003, pages 712–715.
5. К. В. Воронцов, “Лекции по методу опорных векторов”, 16 с., 2007.
6. Freund Y., Schapire R. E., «Large margin classification using the perceptron algorithm». Machine Learning., 1999, pages 277–296.
7. Zhu R, Zeng D, Kosorok MR, «Reinforcement Learning Trees». Journal of the American Statistical Association, 2015, pages 1770–1784.
8. Дадиверін В. В., Фещенко І. О., Потапова К. Р., Про організацію та використання детектора обличчя. Modern research in world science, Львів, 4-6 вересня 2022, 226–232с.

Dadyverin V.V., Potapova K.R., Feshchenko I.O., Tarasenko-Kliatchenko O.V., Ivasenko D.V. FACE RECOGNITION SYSTEM USING COMBINATION OF HAAR TA SVM METHODS

The article examines the Haar method and offers an option to improve it. Today, programs based on face recognition algorithms play a key role in our life processes, because various types of biometric systems satisfy the needs of authentication and identification of people for further use in structures that guarantee various types of security issues: protection of the area and regime objects of various levels of secrecy, guaranteeing the security of financial transactions, ensuring the secrecy of information of an intimate nature, etc. There are already many good examples of commercial products related to private data, which should be maximally protected and at the same time comfortable enough to use, and facial recognition technology with integration into a larger system of processing and analysis algorithms comes to the rescue. Local examples of such successful commercial products are financial transactions using the Privat 24 application or its ecosystem, the identification system in Diya, which allows you to verify your identity as quickly and conveniently as possible. It is also worth noting that this technology is becoming an integral part of law enforcement systems, which can greatly help investigative agencies to bring the accused to justice, or military systems for detecting the enemy or locating the area of future damage.

A clear algorithm, high speed and accuracy are the defining features of the methods chosen for use in the above-mentioned systems, because in this matter the number of mistakes made in geometric and progression worsens the possible consequences, that is why this article will provide an improvement of the existing algorithm with a built-in architecture.

Key words: *support vector method, Haar, face recognition system.*

УДК 004.4+336
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/16

Ковалевський В.В.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Вакалюк Т.А.
Державний університет «Житомирська політехніка»

СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ РОЗРОБКИ ТА ФУНКЦІОНУВАННІ СИСТЕМ ЗАХИСТУ СЕРВІСІВ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ

Проблема захисту веб додатків та, зокрема, сервісів електронної комерції є актуальною задачею, що потребує постійної уваги та роботи над вдосконаленням наявних методів. В даній роботі проаналізовано стан досліджень у цій галузі, а також наведено приклади наявних розробок, що направлені на підвищення безпекових показників. Згідно проведеного аналізу, науковці розглядають безпекову складову функціонування сервісів електронної комерції як сукупність організаційних та технічних заходів. Технічні заходи націлені на аналіз роботи систем і своєчасне виявлення потенційних загроз. Для цього використовуються методи нечіткої логіки, машинне навчання, математичне моделювання. У свою чергу, організаційні заходи мають на меті інформування користувачів щодо наявних загроз, роботу з законодавчими аспектами захисту інформації, впровадження наявних міжнародних безпекових стандартів. Також до організаційних заходів можна віднести законотворчі ініціативи, направлені на впорядкування процесів зберігання та обробки персональних даних користувачів сервісів електронної комерції. Одним із підходів щодо забезпечення комплексного захисту сервісів електронної комерції, що запропонували дослідники, є представлення сервісу електронної комерції у вигляді неорієнтованого графу, де кожен компонент сервісу є вершиною графу, а його ребра – зв'язки між цими компонентами. Це дозволяє спростити задачу автоматизації подальшого масштабування системи моніторингу, що аналізує комунікацію між ключовими компонентами сервісу електронної комерції та надсилає інформацію щодо виявлених аномалій у роботі сервісу. Науковці також розглядають методики адаптації і спрощення наявних фреймворків управління інформаційною безпекою, що має на меті спрощення їх впровадження для невеликих організацій. Це надасть змогу розширити застосування загальноприйнятих безпекових стандартів та покращити захищеність кінцевих користувачів сервісів електронної комерції. Окремі науковці пропонують використання методів математичного моделювання для побудови формальної моделі прийняття рішень у системі інформаційної безпеки, що дозволяє знизити вплив суб'єктивних факторів на кінцеві результати її роботи.

Ключові слова: *електронна комерція, інформаційна безпека, система, модель оцінювання, аналіз.*

Постановка проблеми. Питання забезпечення захисту сервісів електронної комерції не втрачає своєї актуальності та набуває все більшого розповсюдження з розвитком комерційної діяльності у глобальній мережі Інтернет. Пандемія COVID-19 значно вплинула на швидкість розповсюдження сервісів електронної комерції, що, в свою чергу, підвищило попит на постачання якісних безпекових рішень, що забезпечать надійний захист користувацьких даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі аналізу ефективності роботи систем забезпечення захисту веб сервісів загалом, та сервісів електронної комерції зокрема, приділяло увагу багато вчених, у тому числі: Бенц М. (Benz M.) та Чаттерджі Д. (Chatterjee D.), Ідіано д'Адамо (Idiano D'Adamo), Росіо Гонсалес-Санчес (Rocío González-Sánchez), Марія Соня Медіна-Сальгадо (Maria Sonia Medina-Salgado), Давід Сеттембре-Блундо(Davide Settembre-Blundo), Б. Тригубець, О. Мервінський, О. Мілов, А. Войтко, І. Гусарова, О. Домаскін, Є. Іванченко, І. Іванченко, О. Король, Г. Коц, І. Опірський, О. Фразе-Фразенко, Цю Ліронг (Qiu Lirong), Лі Цзе (Li Jie) та інші. Проте кожен з науковців розглядав зазначену проблему з різних аспектів.

Формулювання цілей статті. Саме тому метою статті є аналіз стану досліджень у галузі розробки та функціонуванні систем захисту сервісів електронної комерції.

Виклад основного матеріалу. Проблема захисту як веб додатків загалом, так і сервісів електронної комерції зокрема, є актуальним питанням, увага до якого не згасає, так як з розвитком систем захисту покращуються та адаптуються методи їх подолання. Постійно

проводиться робота над дотриманням балансу доцільного зменшення потенційних безпекових ризиків та збереженням комфортного середовища для кінцевих користувачів.

Забезпечення захисту сервісів електронної комерції поділяється на дві основні категорії – технічне та організаційне. До технічних заходів забезпечення захисту можна віднести різноманітні автоматизовані системи аналізу користувацького трафіку, організацію безпечних умов обробки і зберігання інформації якою оперує сервіс електронної комерції, своєчасне оновлення програмного забезпечення для запобігання використанню зловмисниками наявних вразливостей, проведення планових тестувань систем захисту сервісів електронної комерції незалежними експертами. У свою чергу, організаційні заходи включають в себе проведення планових аудитів систем захисту на відповідність встановленим вимогам, інформування користувачів щодо потенційних загроз, сертифікація в межах наявних міжнародних безпекових стандартів.

Клер Лейбатс (Claire Laybats) та Люк Тредіннік (Luke Tredinnick) у своїй роботі розглядають сучасні виклики інформаційній безпеці [1]. Згідно їх аналізу, незважаючи на стрімкий розвиток інформаційних технологій та збільшенню цінної інформації якою оперують різні системи, світ не спостерігає бурхливого зростання кількості кіберзлочинів. Автори вважають, що це пояснюється тим, що по мірі розповсюдження різноманітних інформаційних систем за останні десятиліття, паралельно зростала і зазнала змін та розвитку сфера інформаційної безпеки. Також вони роблять висновки, що основним напрямком забезпечення інформаційної безпеки в першу чергу має бути розуміння та управління ризиками, а не усунення загроз та їх наслідків. Незважаючи на розвиток технологій, головним безпековим ризиком будь-якої інформаційної системи являється людський фактор і зменшення його впливу на вразливість системи має бути частиною безпекових заходів [1].

У контексті організаційних заходів велика увага приділяється захисту, обробці та зберіганню персональних даних користувачів сервісів електронної комерції, що відображено у нормативно-правових актах, прийнятих у різних країнах. О. Мервінський проводить аналіз основних законодавчих вимог щодо захисту персональних даних у сфері електронної комерції, наголошуючи на важливості їх врахування при використанні технічних засобів забезпечення захисту сервісів електронної комерції [2].

Б. Тригубець у своєму дослідженні акцентує увагу на важливості захищеності обробки фінансової та персональної інформації користувачів, якою оперують системи електронної комерції [3]. Розглядаючи основні види шахрайських дій направлених на неправомірне використання користувацьких даних, науковець виділяє дві складові захисту сервісів електронної комерції: програмну та організаційну, вказуючи на необхідність постійного вдосконалення методів захисту для своєчасного запобігання наявним загрозам [3].

Бенц М. (Benz M.) та Чаттерджі Д. (Chatterjee D.) розглянули інформаційні безпекові ризики, що стосуються малого і середнього бізнесу та запропонували методологію аналізу стану захищеності інформаційної системи [4]. Автори зазначають, що не зважаючи на вже наявні фреймворки управління інформаційною безпекою – такі як ISO, CIS, PCI DSS, COBIT – для невеликих компаній вони можуть бути занадто складними та дорогими для впровадження. Запропонована методологія базується на фреймворку NIST CSF (National Institute of Standards and Technology's cybersecurity framework), що дозволяє використовувати його систему оцінки та рекомендацій (рис.1) [4]. Розробники методології проаналізували роботу фреймворку, використовуючи власний досвід та, враховуючи потреби цільової аудиторії, адаптували необхідні параметри фреймворку для створення набору вхідних даних для подальшого аналізу [4].

Результатом обробки даних є рекомендації щодо можливих змін та покращень для підвищення рівня інформаційної безпеки системи, що аналізується. Також надається приблизна оцінка вартості необхідних заходів з фінансової точки зору та необхідних людських ресурсів для її впровадження. Розроблена методологія дозволяє ідентифікувати найбільш вразливі місця інформаційної системи, оцінити її зрілість відносно наявних стандартів та визначити найбільш ефективні заходи для покращення інформаційної безпеки [4].

Колективом авторів (Ідіано д'Адамо (Idiano D'Adamo), Росіо Гонсалес-Санчес (Rocío González-Sánchez), Марія Соня Медіна-Сальгадо(Maria Sonia Medina-Salgado), Давід Сеттембре-Блундо(Davide Settembre-Blundo)) було проаналізовано тенденції розвитку сервісів електронної комерції в останні роки, зважаючи на їх бурхливий розвиток через пандемію COVID-19 [7]. Автори використовували дані з відкритих джерел, серед яких можна виділити Euro-

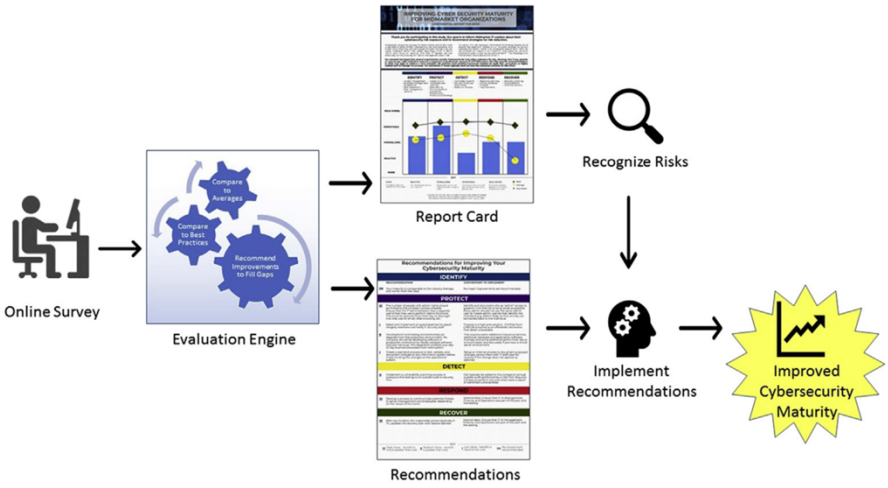


Рис. 1. Робота фреймворку NIST CSF (за Бенц М. (Benz M.) та Чаттерджі Д. (Chatterjee D.)) [4]

stat та Salesforce Shopping Index, а також залучали незалежних експертів для проведення опитувань згідно теми дослідження. Для аналізу отриманих даних використовувались MCDA метод та метод оцінювання за шкалою Лайкерта (Likert Scale Survey) [7].

Отримані результати дозволяють стверджувати, що одним із вагомих факторів, які впливають на стале зростання та розвиток сервісів електронної комерції, є забезпечення надійної та безпечної обробки і зберігання фінансової інформації користувачів та їх персональних даних. Автори зазначають про необхідність планування інвестицій у інформаційну безпеку та системний підхід до управління ризиками захисту інформації громадян та підприємств, що збирається та обробляється через цифрові канали [7].

Групою авторів (О. Мілов, А. Войтко, І. Гусарова, О. Домаскін, Є. Іванченко, І. Іванченко, О. Король, Г. Коц, І. Опірський, О. Фразе-Фразенко) запропоновано методологію моделювання взаємодії антагоністичних агентів у системах кібербезпеки [8]. У запропонованій методології традиційні методи і інструменти моделювання не протиставляються один одному, а розглядаються в сукупності, формуючи тим самим єдину методологічну базу моделювання поведінки антагоністичних агентів. Автори зазначають, що системи інформаційної безпеки функціонують в умовах невизначеності, що характеризується браком інформації для формалізації процесів з якими вони взаємодіють. Це, в свою чергу, підвищує суб'єктивний вплив особи, що приймає рішення на роботу системи інформаційної безпеки. Таким чином, побудова формальної моделі прийняття рішень дозволяє знизити вплив суб'єктивних факторів на функціонування системи інформаційної безпеки і, як результат, підвищити ефективність її роботи. Враховуючи складність і різноманітність процесів та об'єктів, з якими взаємодіє система інформаційної безпеки, досить складно використовувати уніфікований метод моделювання, який дозволить отримати необхідний рівень абстракції, тому автори пропонують використовувати інтеграцію різноманітних методів моделювання для побудови загальної моделі взаємодії антагоністичних агентів (рис.2). Така методика дозволяє сукупне використання всієї множини моделей та координацію їх застосування, що дозволяє підвищити якість моделювання за рахунок компенсації недоліків одних моделей перевагами інших. Саме ця особливість запропонованої методології виділяє її на тлі інших [8].

Необхідно зазначити, що автори вказують на наявні обмеження розробленої моделі, що, в свою чергу, залишає простір для майбутніх досліджень

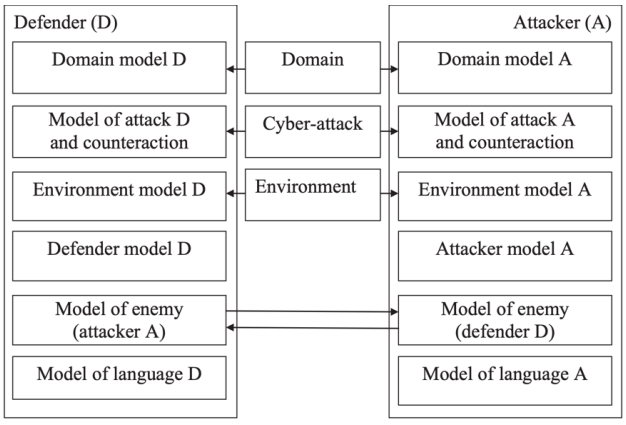


Рис. 2. Схема взаємозв'язку моделей компонентів антагоністичної взаємодії (за колективом авторів [8]).

та розширенню інструментів моделювання, таких як використання нейронних мереж, глибинного аналізу даних, застосування генетичних алгоритмів [8].

Х. Матбулі (H. Matbouli) та К. Гао (Q. Gao) провели дослідження безпекових ризиків, що мають вплив на розвиток та розповсюдження сервісів електронної комерції [9]. Автори зазначають, що недостатня захищеність сервісів електронної комерції призводить до значних фінансових втрат як через дії зловмисників, так і через побоювання користувачів щодо захищеності їх фінансових даних при проведенні електронних платежів. Як приклад, автори наводять статистику компанії McAfee, однієї з найбільших компаній, що спеціалізується на розробці систем інформаційної безпеки. У відповідності до цих даних, 63% споживачів переривали процес оформлення онлайн купівлі, не отримуючи підтверджень тому, що сервіс електронної комерції, яким вони вирішили скористуватись, відповідає необхідним безпековим стандартам [9].

Згідно проведеного аналізу, основними безпековими загрозами для сервісів електронної комерції являються викрадення конфіденційної та фінансової інформації користувачів. Запобігання цьому потребує комплексного підходу, що охоплює весь процес електронної комерції, починаючи з підвищення безпекової обізнаності користувача і закінчуючи підтримкою інфраструктури сервісу електронної комерції (сервери, канали передачі інформації, платіжні системи тощо) на належному рівні, що відповідає сучасним безпековим стандартам [9].

Науковці пропонують перелік організаційних стратегій та технологічних рішень, направлених на покращення інформаційної безпеки сервісів електронної комерції.

Яцзюань Чжан (Yajuan Zhang), Сіньян Денг (Xinyang Deng), Дайцзюнь Вей (Daijun Wei) та Йонг Денг (Yong Deng) пропонують модель оцінювання захищеності сервісу електронної комерції, що має на меті покращити та спростити цей процес [10]. Автори зазначають, що запропонована модель оцінювання охоплює більшість основних безпекових параметрів функціонування сервісу електронної комерції. В основу розробленої моделі покладено метод аналізу ієрархій у поєднанні з теорією Демпстера-Шафера [10].

Запропонована модель складається з п’яти основних етапів:

– розбиття поставленої задачі на основні компоненти;

– присвоєння оціночної ваги кожному з компонентів;

– дисконтування кожного компоненту;

– об’єднання отриманих коефіцієнтів ;

– визначення оцінки компоненту [10].

До перших двох етапів застосовується метод аналізу ієрархій, останні три використовують теорію Демпстера-Шафера (рис. 3).

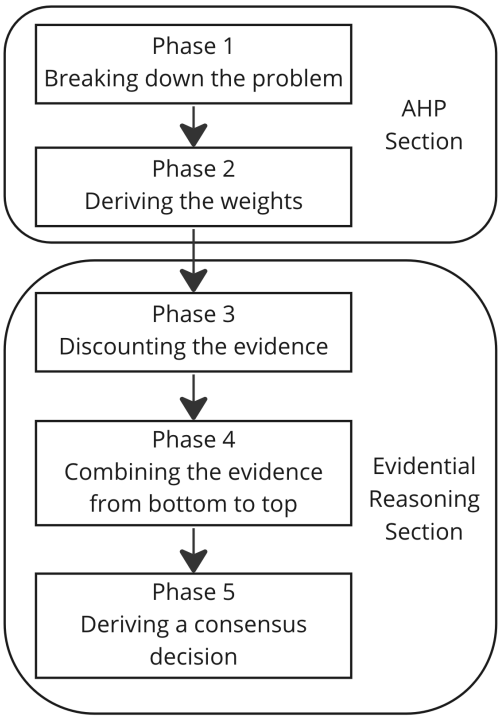


Рис. 3. Етапи роботи моделі [10]

Автори провели порівняння роботи розробленого алгоритму з аналогічними дослідженнями. Проаналізувавши отримані дані, вони дійшли висновку, що запропонований ними підхід дає більш точні результати оцінювання і є простішим у реалізації [10].

Колектив дослідників (Лука Деметріо (Luca Demetrio), Габріеле Коста (Gabriele Costa), Андреа Валенса (Andrea Valenza), Джованні Лагоріо (Giovanni Lagorio)) провели аналіз функціонування Web Application Firewall (WAF) та розробили інструмент, який дозволяє проводити симуляцію атаки на інформаційну систему захищену WAF [11].

Метою їх дослідження була спроба компрометації роботи WAF, що використовує машинне навчання для виявлення аномалій у вхідному трафіку. Слід зазначити, що WAF у комбінації з алгоритмами машинного навчання є сучасним підходом до забезпечення захисту інформацій-

них систем. Такі системи захисту здатні завчасно виявляти потенційні загрози, використовуючи попередньо накопичені дані щодо нормальної роботи інформаційної системи, і, керуючись закладеними у них політиками обробки трафіку, блокувати потенційно небезпечні активності [11].

Дослідники скористались особливостями обробки даних алгоритмами машинного навчання для створення запитів, які не будуть розцінені як потенційно небезпечні (рис. 4).

```
1  admin' OR 1=1#
2  admin' OR 0X1=1 or 0x726!=0x726 OR 0x1Dd
     not IN/*(seleCt 0X0)>c^Bj>N]*/ ((SeLeCT
      476),(SELECT (SElEct 477)),0X1de) oR
     8308 noT lIkE  8308\x0c AnD truE OR '
     FZ6/q' LiKE 'fz6/qI' anD TRUE anD '>U'
     != '>uz'#t'%'03;Nd
```

Рис. 4. Семантично еквівалентні запити [11]

Методологія, використана авторами, належить до класу підходів керованого мутаційного тестування. Її ідея полягає в тому, що тестування починається з невдалої спроби, вхідні дані якої поступово трансформуються через випадкове застосування попередньо визначених операторів мутації. Модифіковані тести виконуються, порівнюються і впорядковуються згідно заданим критеріям. Процес повторюється для тестів, які показали найкращі результати, доки не буде знайдено успішний тест (рис. 5) [11].

Таким чином, дослідникам вдалося обійти захисні алгоритми WAF та скомпрометувати систему захисту. Дослідження проводились з використанням популярних WAF систем, що доступні на ринку [11].

Цю Ліронг (Qiu Lirong) та Лі Цзе (Li Jie), вивчаючи проблему інформаційної безпеки сервісів електронної комерції, запропонували комплексну систему аналізу захищеності інформаційної системи, що включає в себе моніторинг, аналіз даних, оцінювання ризиків та інформування у разі виявлення потенційної загрози [12].

Автори пропонують представити систему електронної комерції у вигляді неорієнованого графу, де кожен компонент системи електронної комерції є його вершиною, а ребра – зв'язки між цими компонентами. Таким чином, система моніторингу отримує інформацію про всі зв'язки компоненту, який підключений до неї. Це дозволяє автоматизувати оптимізацію масштабування системи моніторингу для більш раціонального використання ресурсів. Автори пропонують наступний алгоритм для реалізації масштабування системи моніторингу (рис. 6). Де G – система

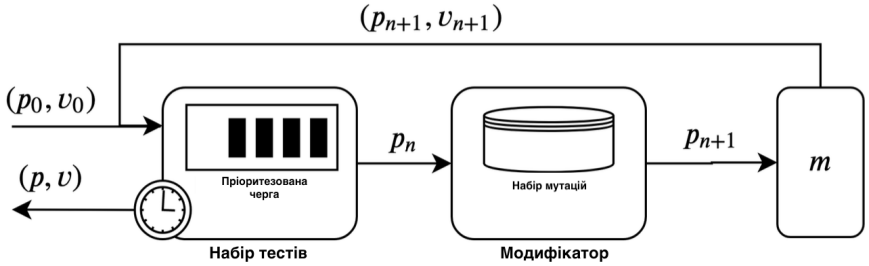


Рис. 5. Принцип роботи алгоритму [11]

(1) $\Phi = \varnothing$; $S = \varnothing$;
(2) while G has more edges do
(3) if $S = \varnothing$ then
(4) Pick an edge (u, v) such that $d(u) + d(v)$ is the largest;
(5) else
(6) Pick an edge (u, v) such that $v \in S$ and $d(u) + d(v)$ is the largest;
(7) $T_v \leftarrow$ the ME rooted at v;
(8) Add T_v into Φ;
(9) $S \leftarrow S \cup$ neighbor(v);
(10) Remove edges in T_v from G;
(11) if $d(u) > 0$ then
(12) $T_u \leftarrow$ the ME rooted at u;
(13) Add T_u into Φ;
(14) Remove edges in T_u from G;
(15) $S \leftarrow S \cup$ neighbor(u);
(16) Remove u and v and all nodes with degree 0 from G;
(17) Return Φ

Рис. 6. Запропонований алгоритм оптимізації системи моніторингу [12]

електронної комерції, $\Phi = \{T_1,\ldots,T_n\}$ – множина компонентів, S – мінімальне необхідне покриття моніторингу [12].

Система моніторингу збирає дані з підключених до неї компонентів системи електронної комерції і проводить їх аналіз, керуючись заданими правилами та інформацією про наявні вразливості. При виявленні аномалій генеруються попередження про наявну загрозу. Автори зазначають, що запропонована система не охоплює всі аспекти функціонування системи електронної комерції та має функціональні обмеження. Запропоновані авторами алгоритми також потребують подальшого вдосконалення та оптимізації [12].

Висновки. Проаналізувавши стан досліджень у галузі розробки та функціонування систем захисту сервісів електронної комерції можна стверджувати, що єдиного підходу до цього питання немає. Дослідники продовжують працювати над розробкою алгоритмів та методик, що дозволять проводити більш детальний аналіз систем захисту сервісів електронної комерції та покращити рівень їх захищеності. Дана проблема є актуальною та потребує подальших досліджень.

Список літератури:

1. Laybats Claire, Tredinnick Luke. Information security. *Business Information Review.* Vol. 33 (2). 2016. Pp. 76-80. 10.1177/0266382116653061.

2. Мервінський О. Європейські вимоги щодо захисту персональних даних у сфері електронної комерції. *Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні*. Вип. 2 (30). 2015. С. 34-40. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/18033/1/30_p34.pdf

3. Тригубець Б. Технології захисту інформації в електронній комерції. *Матеріали IV Міжнародної студентської науково – технічної конференції.* Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя (м. Тернопіль, 28-29 квітня 2021 р.), 2021. С. 11-12. https://tntu.edu.ua/storage/pages/00000852/Zbirnyk-studconf2021.pdf

4. Benz M., Chatterjee D. Calculated risk? A cybersecurity evaluation tool for SMEs. *Business Horizons.* Vol. 63 (4). 2020. Pp. 531-540. doi: 10.1016/j.bushor.2020.03.010

5. Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity. Version 1.1. URL: https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.04162018 (дата звернення 25.11.2022).

6. Bill Sweeney. Cybersecurity Is Every Executive's Job. Harvard Business Review. 2016. https://hbr.org/2016/09/cybersecurity-is-every-executives-job

7. D'Adamo I., González-Sánchez R., Medina-Salgado M.S., Settembre-Blundo D. E-Commerce Calls for Cyber-Security and Sustainability: How European Citizens Look for a Trusted Online Environment. *Sustainability.* Vol. 13 (12), 2021. 6752. https://doi.org/10.3390/su13126752

8. Milov O., Voitko A., Husarova I., Domaskin O., Ivanchenko Ye., Ivanchenko I., Korol O., Kots H., Opirskyy I., Fraze-Frazenko O. Development of methodology for modeling the interaction of antagonistic agents in cybersecurity systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.Vol.* 2. 2019. Pp. 56-66. 10.15587/1729-4061.2019.164730

9. Matbouli H., Gao Q. An overview on web security threats and impact to e-commerce success. *International Conference on Information Technology and e-Services*, 2012. pp. 1-6, doi: 10.1109/ICITeS.2012.6216645

10. Zhang, Y., Deng, X., Wei, D., Deng, Y. Assessment of E-Commerce security using AHP and evidential reasoning. *Expert Systems with Applications,* Vol. 39(3), 2012. 3611–3623. doi:10.1016/j.eswa.2011.09.051

11. Demetrio L., Valenza A., Costa G., Lagorio G. WAF-A-MoLE: Evading Web Application Firewalls through Adversarial Machine Learning. *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2020. Pp. 1745–1752. https://doi.org/10.1145/3341105.3373962

12. Qiu L., Li J. Covering the Monitoring Network: A Unified Framework to Protect E-Commerce Security. *Complexity*. 2017. 6254842. 10.1155/2017/6254842

Kovalevskyi V.V., Vakaliuk T.A. THE STATE OF RESEARCH IN THE FIELD OF DEVELOPMENT AND FUNCTIONING OF PROTECTION SYSTEMS FOR E-COMMERCE SERVICES

Protection of web applications and, in particular, e-commerce services is a task which requires constant attention and work on improving existing defense and security methods. This paper analyzes the state of research in this field and provides examples of existing developments aimed at increasing safety indicators. According to the conducted analysis, scientists consider the security component of e-commerce services as a set of organizational and technical measures. Technical measures are aimed at analyzing the operation of systems and timely detection of potential threats. To achieve desired results there are used methods of

fuzzy logic, machine learning, and mathematical modeling. Organizational measures cover users informing about existing threats, working with legislative aspects of information protection and implementation of existing international security standards. Organizational measures also include legislative initiatives pointed to streamline the processes of storing and processing personal data of e-commerce service users. One of the approaches to provide comprehensive protection of e-commerce services proposed by researchers is to represent the e-commerce service in the form of an undirected graph, where each component of the service is a vertex of the graph, and its edges are connections between these components. This makes it possible to simplify the automation task for the further scaling of the monitoring system, which analyzes the communication between the key components of the e-commerce service and sends information about detected anomalies. Scientists also consider methods of adaptation and simplification of existing information security management frameworks to simplify their implementation for small organizations. This will allow to expand the integration of generally accepted security standards and improve the security for the end users of e-commerce services. Some scientists suggest the use of mathematical modeling methods to build a formal decision-making model of the information security system, which should help to reduce the influence of human factors on the final decision-making results.

Key words: *e-commerce, information security, system, assessment model, analysis.*

УДК 004.772
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/17

Лагута В.В.
Український державний університет науки і технологій

Єгоров О.Й.
Український державний університет науки і технологій

Доманська Г.А.
Український державний університет науки і технологій

Тимошенко Л.С.
Український державний університет науки і технологій

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ

Постановка проблеми. Останнє десятиріччя характеризує динамічний розвиток пристроїв залізничної автоматики і телемеханіки з використанням мікропроцесорних засобів та комп'ютерних систем. Розширення функціональних можливостей системи МПЦ (мікропроцесорної централізації) підвищує рівень автоматизації роботи поїзних диспетчерів, інформаційну взаємодію з системами управління перевізних процесів більш високого рівня, а також реалізацію функцій віддаленого моніторингу та діагностики. Особливими питаннями ефективної експлуатації об'єктів залізничного сполучення є розлад, неузгодженість між обслуговуванням комп'ютерних систем. В основу вирішення цих недоліків повинні бути покладені принципи синхронізації керуючих дій на рівні дирекції і автоматизованої роботи на станціях. Важлива роль при цьому відводиться роботі залізничної автоматики і телемеханіки, її надійна експлуатація пов'язана зі вживанням профілактичних заходів щодо попередження відмов, що є важливим науково-практичним завданням, актуальним для транспортних технологій на об'єктах залізничного транспорту. Актуальність проблеми забезпечення безпеки руху поїздів підтверджується неодноразовими обговореннями під час засідань ООН. Наприклад, результатом роботи засідання комітету з внутрішнього транспорту на п'ятдесят восьмій сесії (TRANS/SC.2/2004/2 27-29 October 2004) є рекомендації національним залізничним перевізникам. Аналогічні питання обговорювалися у рамках Європейської конференції міністрів транспорту (ЕКМТ), Європейського союзу (ЄС), Міжнародного союзу залізниць (МСЗ) та на інших транспортних форумах. Стратегія розвитку систем управління та забезпечення безпеки передбачає насамперед створення комплексної системи. Однією із завдань такої системи є створення мікропроцесорних систем управління станцій та ділянкою на базі обчислювальних засобів з відкритим кодом, а також мікропроцесорних та релейно-процесорних систем з урахуванням самодіагностики та резервування. Для реалізації поставленого завдання необхідно створити цифрові моделі об'єктів інфраструктури, розгорнути мережі цифрового радіозв'язку, а також удосконалювати системи інтервального регулювання, моніторингу стану технічних засобів та автоматизації окремих технологічних операцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Безпечна експлуатація руху поїздів – одне із пріоритетних завдань транспорту [2, с. 15; 3, с. 146]. Для безпечної експлуатації руху поїздів використовують процес моніторингу технічного стану – спостереження за станом об'єкта для визначення та передбачення моменту переходу в непрацездатний чи граничний стан [4, с. 157]. Дослідження питань моніторингу об'єктів транспорту виникло порівняно недавно. У дослідженнях наголошується на важливості систем моніторингу для вдосконалення технологій обслуговування систем залізничної автоматики та телемеханіки, а також можливостей визначення передвідмовних станів, прогнозування подальших змін та визначення залишкового ресурсу [5, с. 265]. Такий стан питання обумовлений рівнем розвитку технологій, які не дозволяють забезпечити безумовну надійність будь-якої технічної конструкції на

етапі проектування. При моделюванні функціонування СЗАТ не можна враховувати взаєможію всіх зовнішніх впливів, а також накопичених пошкоджень, що виникають при тривалій експлуатації. Для забезпечення безпеки СЗАТ використовуються можливості моніторингу їхнього технічного стану [5, с. 266; 6, с. 3]. З настанням цифрової ери та розвитком обчислювальної техніки основою будь-яких сучасних систем діагностики та моніторингу СЗАТ стали рішення з використанням мікроконтролерів, мікропроцесорів та комп'ютерних систем. Більш надійна елементна база, структурне та елементне резервування, введення параметричної та інформаційної надмірності, застосування засобів діагностики та інші заходи призводять до того, що ймовірність відмов у нових пристроях СЗАТ менша, ніж у традиційних релейних колах [7, с. 3]. Управління процесами діагностики і моніторингу засобів залізничної автоматики – новий напрям у вирішенні науково-технічної проблеми з експлуатації та технічного обслуговування засобів автоматики на [8, с. 125].

Метою роботи є розробка структури комп'ютерної системи моніторингу та діагностики елементів електричної централізації шляхом автоматизації процесу збору та опрацювання даних про стан СЗАТ станцій та ділянок.

Основна частина роботи. За характером прояви відмов СЗАТ поділяють на раптові та поступові. Для більш обґрунтованого вибору об'єктів контролю та діагностування пристроїв ЕЦ необхідно враховувати не лише частоту відмов того чи іншого об'єкта станційної автоматики, а й вплив

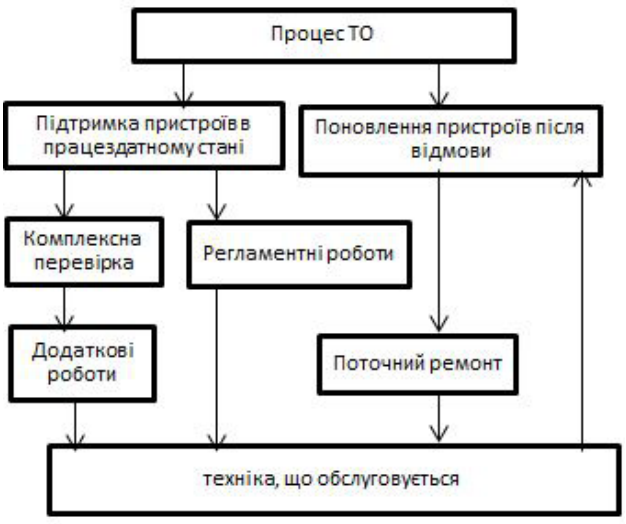


Рис. 1. Структурно-функціональна схема

цих відмов на поїзну роботу на станціях та ділянках. Для залізничного транспорту, загалом, не така важлива частота виходу з ладу того чи іншого об'єкта ЕЦ, але так, щоб ці відмови не впливали на безпеку руху та не призводили до затримок у русі поїздів. Структурно-функціональна схема технічного обслуговування наведена на рисунку 1.

Для прийняття правильних, раціональних рішень необхідно мати достатній обсяг інформації про стан об'єктів контролю. Тому для правильної організації технічного обслуговування потрібні нові методи та технічні засоби отримання об'єктивної та своєчасної інформації про стан пристроїв автоматики та телемеханіки. Для цього слід впроваджувати апаратуру для збору, передачі, обробки та відображення інформації про параметрах та стані контрольованих об'єктів з використанням сучасної обчислювальної техніки. Якщо врахувати, що для нормального ходу процесу регулювання руху поїздів необхідно до мінімуму виключити відмови та збої у роботі експлуатованих пристроїв автоматики та телемеханіки, то є важливою вимога забезпечення прогнозування відмов. Вирішити такий комплекс складних завдань є можливим на базі використання теорії, методів та способів технічної діагностики та застосування мікропроцесорних комплексів та комп'ютерних систем.

Співвідношення поступових та раптових відмов для окремих систем та елементів різне.

Одним із пріоритетних напрямків у галузі розвитку станційних систем залізничної автоматики та телемеханіки стає використання комп'ютерних систем електричної централізації. Крім основних функцій управління перевізним процесом, застосування засобів комп'ютерних систем дозволяє реалізувати в таких пристроях інформаційно-аналітичні підсистеми. Підсистема технічної діагностики власного комп'ютерного обладнання та станційних СЗАТ – одна з основних підсистем релейно-процесорної централізації з використанням обчислювальної техніки та програмованих контролерів. Основні функції, що властиві такій підсистемі, дозволяють підвищити стійкість до відмов станційних пристроїв, інформованість обслуговуючого та експлуатаційного персоналу на різних вертикалях управління, попередити відмови, характер прояву яких не має довільний характер. Подальшим етапом розвитку підсистеми діагностики ЕЦ стає можливість її виділення до універсальної системи технічної діагностики на базі комп'ютерної системи та програмованих мікроконтролерів (СТД-МПК). Одна з основних вимог, що висуваються до

СТД-МПК, це можливість застосування системи як самостійного пристрою, що «накладається» на існуючі консервативні системи електричної централізації, так і можливість легкої інтеграції із сучасними комп'ютерними системами ЕЦ, реалізуючи функціонально-орієнтовану підсистему діагностування. Такий підхід дозволить підвищити інформативність систем ЕЦ та систем технічної діагностики, оперативність усунення відмов систем автоматики, можливість їх попередження, знизити капітальні та експлуатаційні витрати, спростити процес технічного обслуговування, ремонту типових модулів і збільшити коефіцієнт використання апаратних і програмних засобів. На СТД-МПК покладається вирішення наступних задач:

– вимір параметрів аналогового сигналу в тональних і фазочутливих рейкових колах, напруги фідерів живлення з визначенням форми сигналу і його якості, струму електроприводів стрілок з визначенням форми сигналу, ізоляції монтажу і кабельних мереж станції, тимчасових параметрів числового коду з визначенням форми сигналу і часу сповільнення сигнальних реле;

– автоматизації виконання робіт по технічному обслуговуванню робіт, пов'язаних з аналоговими вимірами (напруга і фази на реле, ізоляція, сигнальних реле та інше);

– прискорення пошуку відмов за рахунок безперервного запису в «чорний ящик» технологічної ситуації на станції (дискретний контроль стану основних реле виконавчої і набірної групи);

– аналізу потенційної завадостійкості рейкових кіл і останніх пристроїв станційної автоматики, створення рекомендацій по підвищенню їх надійності і виявлення рейкових кіл, що фактично працюють на межі стійкості по відношенню до впливу ізоляції баласту і тягового струму;

– виявлення передвідмовного стану на основі експертних оцінок функціональних залежностей між вимірюваними величинами і вірогідністю відмови;

– аналіз логіки роботи ЕЦ.

Виявлення передвідмовного стану об'єктів і визначення якості роботи об'єкту діагностування дозволять виділити СТД-МПК з широкого круга систем, що реалізовують лише функції телевимірювань без аналізу вхідної інформації. Структура побудови систем технічної діагностики представлена на рисунку 2.

У комплексі СЗАТ по структурі СТД-МПК можна виділити наступні рівні побудови:

– станційний рівень представляється промисловим мікроконтролером, що забезпечує збір, попередню обробку і тимчасове зберігання інформації, що поступає від периферійного устаткування;

– другий рівень забезпечує збір, архівація і довготривале зберігання на сервері діагностичної інформації служби сигналізації і зв'язку;

– рівень дирекції надає доступ до діагностичної інформації всім зацікавленим працівникам (змінним інженерам, групі надійності, керівництву).

Основне периферійне устаткування включає:

– модулі контролю стану дискретних об'єктів – пристрій мультіплексированного введення (МКМВ), призначені для збору інформації про стан двопозиційних об'єктів і виміру часу

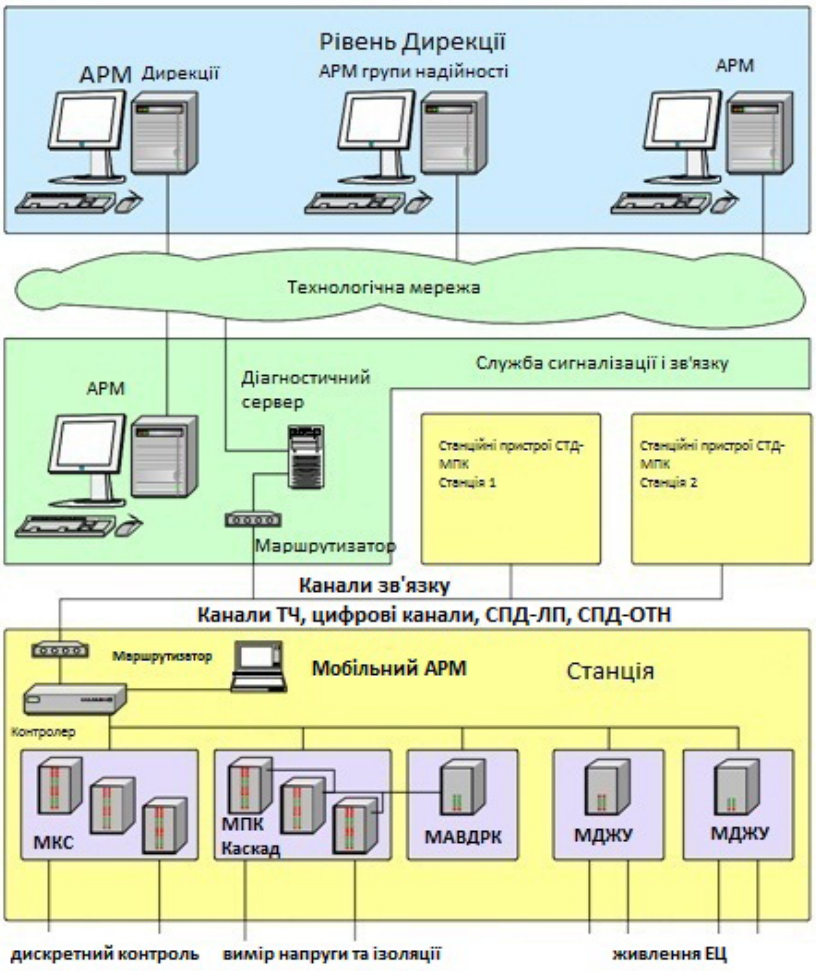


Рис. 2. Функціональна структура побудови СТД-МПК

між двома послідовними перемиканнями контрольованого об'єкту;

− модулі аналогової комутації (МАК) призначені для підключення 12 диференціальних аналогових сигналів до вимірювального пристрою з діленням на 2, 4 і більш гальванічно ізольованих групи;

− модуль аналогового введення і діагностики рейкових кіл (МАВДРК) призначений для виміру параметрів сигнального струму фазочутливих і тональних рейкових ланцюгів, напруги, ізоляції кабелю і монтажу в ланцюгах постійного і змінного струму;

− модуль діагностики живлячої установки (МДЖУ-Н) застосовується для виміру напруги фідерів живлення і параметрів аварійних режимів живлячої установки, а також струму переведення стрілки з електродвигуном постійного струму;

− модуль діагностики живлячої установки (МДЖУ-Т) застосовується для виміру струму переведення стрілки з трифазним електродвигуном.

Необхідно враховувати, що підсистема діагностики не забезпечує безпеку руху поїздів, а побічно її підвищує, проте рішення схемотехніки по ув'язці з виконавчими схемами станційних СЗАТ мають бути проаналізовані і сертифіковані відповідними органами на предмет безпечного впливу на логіку роботи схем ЕЦ і електромагнітну сумісність.

Висновки. Мікропроцесорні пристрої, мікроконтролери та комп'ютерні системи приходячи на зміну електромеханічним та електронним системам, сприяють підвищенню характеристик СЗАТ. Вони мають більш функціональні можливості, легше вписуються до структури сучасних технологічних систем, можуть мати вмонтовану авто діагностику та віддалений моніторинг. В статті проаналізовано особливості вибору об'єктів контролю залізничної автоматики та застосування нових методів, технічних засобів отримання інформації про стан пристроїв автоматики та телемеханіки. Для об'єктів залізничної автоматики запропоновано нову модель управління процесами діагностування і моніторингу засобів автоматики, що спрямовано на підвищення ефективності оцінки прогнозування технічного стану.

Список літератури:

1. Закон України «Про залізничний транспорт» із змінами і доповненнями, внесеними Законами України від 10 січня 2002 року № 2921-III/ Верховна Рада України. URL: http:// zakon.rada.gov.ua/laws/show/273 (дата звернення: 17.11.22).

2. Ефанов Д.В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография / за ред.А.Д. Матвейчук. СПб. : СПБУ, 2016. 171 с.

3. Belyi A.A. Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance. *Journal of Procedia Engineering.* 2017. Vol. 189, P. 145–151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024.

4. Сапожников В.В. Основы теории надежности и технической диагностики / заг. ред Д.В. Ефанов. СПб. : Издательство «Лань», 2019. 588 с.

5. Крамбаева, И.М. Микропроцессорные системы ЖАТ. *Молодой ученый*. 2015. № 8 (88). С. 264-266.

6. Efanov D. Development of Rail Roads Health Monitoring Technology Regarding Stressing of Contact-Wire Catenary Systemю *Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (*Chelyabinsk, Russia, May 19–20 2016). P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911431

7. Havryliuk V. Model of Propagation of Traction Current Harmonics from Trains to a Track Circuit Receiver. *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2021. P. 1-4. DOI: 10.1109/APEMC49932.2021.9597152

8. Гаврілюк В.І., Тітов С.С., Єгольников О.О. Управління процесами діагностування і моніторингу засобів автоматики на припортових залізницях. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. 2020. Т. 31 (70). С. 120-128. DOI: 10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-2/21

Laguta V.V., Egorov O.Yo., Domanska G.A., Tymoshenko L.S. COMPUTER SYSTEM OF ELECTRICAL CENTRALIZATION DIAGNOSTICS USING COMPUTER TOOLS

The modern development of railway automation and telemechanics devices is associated with the wide use of microprocessors and computer systems. Expanding the functionality of the MPC (microprocessor centralization) system increases the level of automation of the work of train dispatchers, information interaction with higher-level transport process management systems, as well as the implementation of remote monitoring and diagnostics functions. Today's urgent issues of the effective operation of objects of railway automation and telemechanics systems (RATS) are the compatibility of computer systems with RATS. The solution to this shortcoming should be based on the principles of synchronization of management actions at the directorate level and automated work at stations and sites. The article is devoted to the development of the structure of a

computer system for monitoring and diagnosing elements of electrical centralization by automating the process of collecting and processing data on the state of substations at stations and sites. The methods of solving the set goal are defined in the article, which is the application of the theory of reliability and the theory of control systems. The system proposed in the work allows integration into existing systems of electrical centralization with current modern computer systems of EC (electrical centralization), implementing a functionally oriented diagnostics subsystem. For the system of technical diagnostics based on computer tools and programmable microcontrollers (STD-CPM), a list of tasks for diagnostics and monitoring is considered. The functional structure of the STD-CPM construction is expanded with a list of peripheral devices. The peculiarities of the selection of railway automation control objects and the application of new methods, technical means of obtaining information about the state of railway automation devices and telemechanics are analyzed. The article defines a modified model for managing the processes of diagnosis and monitoring of automation equipment for railway automation facilities, which is aimed at increasing the reliability of the RATS operation and the effectiveness of assessing the forecasting of the technical condition of the RATS.

Key words: *control systems, technical diagnostics and monitoring systems, technical maintenance, railway automation, information system.*

УДК 004.412:519:237.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/18

Макарова Л.М.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Латанська Л.О.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Давлатова Д.Х.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кольцов А.В.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ДВОФАКТОРНА НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРУ ВЕБ-ЗАСТОСУНКІВ, ЩО СТВОРЮЮТЬСЯ МОВОЮ PYTHON З ВИКОРИСТАННЯМ DJANGO REST FRAMEWORK

В умовах нескінченного технологічного розвитку та прагнень до швидкого й зручного отримання інформації є постійна необхідність у створенні нових програмних продуктів, мобільних додатків та веб-застосунків. Кожен розробник ПЗ має за мету якомога швидше та якісніше виконати поставлені задачі, а також створити щось нове раніше за інших. Тобто компанії прагнуть максимально оптимізувати та автоматизувати як бізнес-процеси, так і роботу своїх співробітників. Нині існує багато мов програмування, кожна з яких має своє спрямування, переваги та недоліки, а також розроблена для вирішення конкретних питань та досягнення певних цілей. Для проведення аналізу було обрано мову програмування Python, оскільки вона поширена серед багатьох відомих компаній і є багатофункціональною мовою, що швидко розвивається, легко масштабується та має дуже зручний, логічний синтаксис, широку та всебічну підтримку від ком'юніті, велику базу фреймворків та готових бібліотек для вирішення найрізноманітніших задач. Проаналізувавши існуючі фреймворки Python, було обрано високорівневий та безкоштовний веб-фреймворк Django, що має доступ до вихідного коду, дозволяє легко та швидко створювати веб-сайти, що є безпечними і підтримуваними. У статті розглянуто проблему оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework. Для досягнення мети роботи, а саме підвищення достовірності оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework, була побудована двофакторна нелінійна регресійна модель. Було відібрано дані з 71 проекту з відкритим вихідним кодом, проведено аналіз на викиди та використано десятковий логарифм в якості нормалізуючого перетворення для побудови лінійної регресійної моделі. На основі нормалізованих даних та зворотного нормалізуючого перетворення побудовано нелінійну регресійну модель для вихідного негаусівського набору даних (кількості рядків коду, кількості класів та кількості методів). Проведені перевірка якості та порівняння з лінійною двофакторною моделлю показали, що за всіма параметрами якості побудована двофакторна нелінійна регресійна модель є кращою.

Ключові слова: *нелінійна регресійна модель, логарифмічне перетворення, веб-застосунки, Python, Django Rest Framework.*

Постановка проблеми. Одним з найвагоміших факторів в управлінні процесом розробки ПЗ є розмір програми. Від ефективності оцінювання розміру програм залежить успіх або невдача проекту на ранньому етапі розробки, тому проблема отримання ефективної системи оцінювання кількості строк коду – це важливе завдання, що вимагає удосконалення існуючих методів [1].

Важливим етапом аналізу складної системи є побудова математичної моделі, що здійснюється на підставі змістовної моделі і складається з вихідних, внутрішніх та результуючих параметрів. Однією з умов побудови якісної адекватної моделі є надійність вхідних даних, тому потрібна первинна обробка експериментальних даних із метою виявлення ненадійних вимірів [2].

Виявлення аномальних значень відноситься до проблеми пошуку зразків у даних, які не відповідають очікуваній поведінці.

Під час проведення регресійного аналізу дослідники, зазвичай, віддають перевагу побудові лінійних моделей, які легко оцінюються, і результати яких чітко інтерпретуються. Однак дані рідко носять абсолютно лінійний характер, тому для їх адекватного опису доводиться вдаватися до побудови нелінійних залежностей [3].

TIOBE Software представила рейтинг найпопулярніших мов програмування на серпень 2022 року [4]. Порівняно з минулим роком Python додав до популярності 3,56%, перемістившись з другого на перше місце з показником 15,42%. Це найвищий показник популярності цієї мови програмування за час існування рейтингу. Найнижчий був зафіксований у 2003 році (0,97%), коли Python посідав 13 місце в рейтингу [5].

Таким чином, побудова нелінійних регресійних моделей із використанням нормалізуючих перетворень для підвищення достовірності оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework, і створення на їх основі інформаційної технології переробки інформації є актуальною та має практичну цінність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження щодо розробки ПЗ та оцінювання вартості були численними та різноманітними. Тема все ще дуже актуальна, про що свідчать численні роботи, наявні в літературі [6–8]. Дослідники ретельно досліджували цю тему як з точки зору підходів до оцінювання (регресія, аналогія, експертне судження, функціональні точки, моделювання тощо), так і дослідницького підходу (теорія, опитування, експеримент, тематичне дослідження, моделювання тощо). Дослідження проводяться як у промисловому, так і в академічному контексті. Найбільш часто використовується підхід до оцінювання, заснований на регресії [9].

Оцінювання розміру ПЗ розглядається як фундаментальна діяльність з точки зору завдань управління розробкою ПЗ. Планування робіт і подальше оцінювання часу та зусиль прогнозуються на основі розміру ПЗ. Кількість рядків коду (LOC) і функціональність ПЗ є двома показниками, які часто використовуються для визначення розміру програми. LOC – це прямий показник, який легко підрахувати і яким легко маніпулювати. Існує багато дискусій щодо використання LOC в оцінюванні розміру ПЗ. Критики базуються на аргументах, що кількість рядків коду залежить від мови програмування та вимагає деталей, які можливо буде складно оцінити до завершення роботи над проектом .

Що стосується валідації методів оцінювання, переважна більшість дослідницьких підходів базується на використанні історичних даних. Крім того, більшість досліджень стосується промислового контексту.

Зібрати інформацію про реальні промислові проекти дуже складно. Більшість компаній не передають дані про свої проекти. Технології змінюються настільки швидко, що стало важко створити стандартну модель для оцінювання. Різні компанії використовують різні підходи, характер і розмір проектів різний.

Звужуючи тему до веб-додатків, одним із перших дослідників, які ввели метрику розміру для вимірювання веб-додатків шляхом статистичного аналізу основних характеристик веб-сайтів, був Тім Брей [10]. Спочатку моделі, що використовувалися для оцінювання веб-додатків були такими ж, як ті, що використовувалися для загальних програмних рішень.

Одним із перших науковців, які представили метод, спеціально розроблений для веб-додатків, був Рейфер через метрику WO та модель WEBMO [11]. Ряд дослідницьких робіт з оцінювання як розміру, так і трудомісткості веб-додатків також були проведені Мендесом та його співробітниками [12]. Однак наразі не існує єдиної моделі, здатної адекватно оцінити розмір веб-додатку.

Розробка веб-додатків стає дуже популярною на основі концептуальних моделей, і ці моделі можна коригувати та переглядати в будь-який час у процесі розробки додатків. Прогнозування розміру веб-додатків з високою достовірністю все ще є проблемою.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення достовірності оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework. Щоб досягнути поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: виконати аналіз та порівняння моделей оцінювання розміру ПЗ, що вже існують; зібрати проекти з відкритим вихідним кодом зі створення веб-застосунків мовою Python з використанням Django Rest Framework та обрати ті з них, що можуть бути використані для створення регресійної моделі; визначити необхідні метрики з кожного проекту та перевірити отримані дані на викиди; виконати нормалізацію даних, побудувати лінійне рівняння регресії та довірчий інтервал для нього; на основі нормалізованих даних

виконати побудову нелінійного рівняння регресії та довірчого інтервалу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нормальний (або гаусівський) розподіл заклав основу для багатьох статистичних методів, не останнім з яких є класична лінійна регресія.

Практика перетворення даних, щоб вони відповідали нормальному закону за допомогою певного нормалізуючого перетворення, широко використовується через її простоту, часто ця техніка працює добре як швидке та прагматичне рішення. Спотвореність даних впливає на їх оцінювання, тому дані зі значним відхиленням від нормальності можуть бути більш придатними для аналізу після відповідного перетворення.

Тож було обрано десятковий логарифм в якості нормалізуючого перетворення для побудови регресійної моделі для оцінювання кількості рядків коду веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework. У логарифмічному перетворенні кожна змінна x замінюється на log(x) з основою 10:

$$z = \lg(x), \quad (1)$$

і зворотним до нього є наступне перетворення:

$$x = 10^z. \quad (2)$$

Багатофакторна лінійна регресійна модель в загальному випадку має вигляд:

$$Z_Y = \hat{Z}_Y + \varepsilon = b_0 + b_1 Z_{X_1} + b_2 Z_{X_2} + \cdots + b_k Z_{X_k} + \varepsilon, \quad (3)$$

де ε – це випадкова похибка, розподіл якої підпорядковується нормальному закону та має математичне очікування рівне нулю.

Нелінійна регресійна модель будується за зворотним перетворенням (2) та лінійною регресійною моделлю (3):

$$Y = 10^{\varepsilon + b_0} \mathrm{X}_1^{b_1} \mathrm{X}_2^{b_2} \cdot \ldots \cdot \mathrm{X}_k^{b_k}. \quad (4)$$

Для побудови двофакторної нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру вебзастосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework з репозиторію GitHub [13], було зібрано дані 71 проекту з відкритим кодом.

Процес збору метрик проектів, написаних мовою Python, є досить не простою задачею, оскільки фактично немає такого ПЗ, що надає повну інформацію про проект. Завдяки розширенню до PyCharm Statistic [14] було зібрано такі метрики як: кількість файлів з розширенням .py; кількість рядків коду без коментарів та порожніх рядків; кількість порожніх рядків; кількість рядків з коментарями та загальна кількість рядків. Також мовою Python було додатково написано скрипт, що підраховує кількість класів та методів в кожному з обраних проектів. З цих даних було прийнято рішення обрати наступні фактори:

– загальна кількість рядків коду проекту в тисячах (kilolines of code, KLOC), в якості значення залежної змінної Y;

– кількість класів проекту в якості першої незалежної змінної X_1;

– кількість методів проекту в якості другої незалежної змінної X_2.

Перш за все необхідно виконати первинний аналіз даних, а саме: важливо переконатися, що вибірка не містить викидів. Також важливо виконати перевірку предикторів на наявність мультиколінеарності. У регресійній моделі лінійна залежність між двома або більше незалежними змінними демонструє присутність мультиколінеарності, що безперечно є негативним явищем і не дозволяє здійснити оцінювання окремого впливу кожного фактору на залежну змінну, оскільки маємо пов'язаність факторів між собою або високий ступінь кореляції.

Серед майбутніх предикторів в моделі множинної лінійної регресії наявність мультиколінеарності визначимо за коефіцієнтами впливу дисперсії (VIFs). Для лінійної моделі множинної регресії з k-предикторами X_i, i=1,...,k, VIFs – це діагональні елементи оберненої кореляційної матриці kxk k-предикторів. Якщо значення VIFs більше за 10 то дані мають проблеми з мультиколінеарністю, а у разі, коли значення VIFs знаходяться у межах від 1 до 5, то мультиколінеарності немає [15]. Виконавши перевірку впевнились, що обрані метрики, а саме: кількість класів X_1 та кількість методів X_2 проекту не мультиколінеарні (відповідні діагональні елементи мають значення 3,1), тому можемо використовувати їх в якості двох незалежних змінних.

Для перевірки даних на викиди було використано квадрат відстані Махаланобіса і для його розрахунку побудовано коваріаційну матрицю згідно з [16, 17]. При m = 3, α = 0,05 та кількості значень n = 71 отримали квантілі розподілів Пірсона та Фішера відповідно χ^2 = 7,81 та F = 2,74.

В табл. 1 наведені вихідні дані, нормалізовані дані, а також значення квадрату відстані Махаланобіса, та додатковий *TS* (Test Statictic) для розрахунку критерію Фішера (фрагмент даних).

Отримані викиди у кількості 9 видаляємо із первинного набору даних і повторно виконуємо перевірку на викиди для набору даних із 62 проектів, в результаті якої викидів виявлено не було.

Таблиця 1

Фрагмент обробки та дослідження вихідних емпіричних даних

№	Y	X_1	X_2	Z_y	Z_{x1}	Z_{x2}	d_i^2	*TS* для d_i^2
…								
10	0,295	2	7	-0,5302	0,3010	0,8451	**14,42**	**4,60**
11	0,355	5	15	-0,4498	0,6990	1,1761	**8,24**	2,63
12	0,573	25	24	-0,2418	1,3979	1,3802	6,43	2,05
13	28,757	473	1987	1,4587	2,6749	3,2982	**8,05**	2,57
14	13,389	344	465	1,1267	2,5366	2,6675	1,67	0,53
15	4,977	90	170	0,6970	1,9542	2,2304	0,21	0,07
16	0,926	16	96	-0,0334	1,2041	1,9823	1,38	0,44
17	3,393	67	146	0,5306	1,8261	2,1644	0,12	0,04
18	4,503	313	236	0,6535	2,4955	2,3729	1,38	0,44
19	4,037	87	182	0,6061	1,9395	2,2601	0,08	0,02
20	0,529	12	26	-0,2765	1,0792	1,4150	5,08	1,62
21	6,181	131	216	0,7911	2,1173	2,3345	0,34	0,11
22	0,888	4	31	-0,0516	0,6021	1,4914	4,76	1,52
23	27,301	723	592	1,4362	2,8591	2,7723	3,45	1,10
24	1,227	74	68	0,0888	1,8692	1,8325	2,28	0,73
25	306,187	1974	17285	2,4860	3,2953	4,2377	**29,23**	**9,33**
…								

За допомогою методу найменших квадратів було знайдено коефіцієнти лінійного рівняння регресії: b_0=–1,6796, b_1=0,0534, b_2=0,9571 та з використанням формули (3) побудовано лінійну регресійну модель для нормалізованих даних:

$$Z_Y = -1{,}6796 + 0{,}0534Z_{X_1} + 0{,}9571Z_{X_2} + \varepsilon.$$

Перевіривши залишки ε на відповідність нормальному закону розподілу за допомогою критерію згоди χ^2 Пірсона, підтвердили нормальний закон розподілу ($\chi^2_{кр} = 9{,}49$, $\chi^2 = 0{,}22$), тобто лінійна регресійна модель була побудована обґрунтовано. Далі за рівнянням (4) можемо перейти до нелінійної регресійної моделі:

$$Y = 10^{\varepsilon - 1{,}6796} X_1^{0{,}0534} X_2^{0{,}9571}.$$

Для нелінійної регресійної моделі були отримані значення коефіцієнту детермінації R^2 = 0,8936, середньої величини відносної похибки *MMRE* = 0,2342 і рівню прогнозування *PRED*(0,25) = 0,6290.

Було проведено порівняння з лінійною двофакторною моделлю (R^2 = 0,8555, *MMRE* = 0,3352, *PRED*(0,25) = 0,4776), яке показало, що за всіма параметрами якості двофакторна нелінійна регресійна модель є кращою: за параметром R^2 на 4,45%, за параметром *MMRE* на 30,13%, за параметром *PRED*(0,25) на 31,70%.

Висновки. У статті було розглянуто побудову двофакторної нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework на основі логарифмічного перетворення, завдяки чому було підвищено достовірність оцінювання розміру веб-застосунків. Отриману модель, що розроблена на основі незалежних змінних, а саме значення кількості класів X_1 та кількості методів X_2 проекту, можна використовувати для виконання прогнозу значень результативного показника *Y*.

В подальшому планується побудова довірчого інтервалу та інтервалу прогнозування нелінійної регресії, а також розробка програмного забезпечення для прогнозування розміру веб-застосунків, що створюються мовою Python з використанням Django Rest Framework.

Список літератури:

1. Разработка программного обеспечения – Краткое руководство. URL: https://coderlessons.com/tutorials/akademicheskii/programmnaia-inzheneriia/razrabotka-programmnogo-obespecheniia-kratkoe-rukovodstvo (дата звернення: 21.09.2022).

2. Павленко П.М. Основи математичного моделювання систем і процесів : навч. посіб. Київ : Книжкове вид-во НАУ, 2013. 201 с.

3. Adam Hayes. Nonlinearity. URL: https://www.investopedia.com/terms/n/nonlinearity.asp (дата звернення: 21.09.2022).

4. The software quality company TIOBE. TIOBE Index for September 2022. URL: https://www.tiobe.com/tiobe-index/ (дата звернення: 21.09.2022).

5. The software quality company TIOBE. The Python Programming Language. URL: https://www.tiobe.com/tiobe-index/python/ (дата звернення: 21.09.2022).

6. Boehm B., Abts C., Chulani S. Software development cost estimation approaches – A survey. *Annals of Software Engineering*. 2000. Vol. 10. P. 177-205.

7. Kemerer C.F. An empirical validation of software cost estimation models. *Communications of the ACM*. 1987. Vol. 30, № 5. P. 416-429.

8. Reifer D.J. Estimating Web Development Costs : There Are Differences. *CROSSTALK, The Journal of Defense Software Engineering*. 2002. P. 13-17.

9. Boehm B.W. Software engineering economicsю. New Jersey : Prentice Hall, 1981. 767 p.

10. Bray T. Measuring the Web. *Computer Networks and ISDN Systems*. 1996. Vol. 28, № 7-11. P. 993-1005.

11. Reifer D.J. Web development: estimating quick-to-market software. *IEEE Software*. 2000. Vol. 17, № 6. P. 57-64.

12. Kitchenham B., Mendes E. Why Comparative Effort Prediction Studies may be Invalid. *International Conference on Predictor Models in Software Engineering (PROMISE)*. New York, 2009. P. 1-5.

13. A code hosting platform for version control and collaboration GitHub. URL: https://github.com/ (дата звернення: 10.09.2022).

14. Plugin Statistic for PyCharm. URL: https://plugins.jetbrains.com/plugin/4509-statistic (дата звернення: 15.09.2022).

15. Chatterjee S., Hadi A. Regression Analysis by Example. Fifth edition. New York: A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2012. 421 p.

16. Prykhodko, S., Prykhodko, N., Makarova, L., Pugachenko, K., Detecting outliers in multivariate non-Gaussian data on the basis of normalizing transformations, in: *Proceedings of the 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017, 846-849. https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100366

17. Prykhodko S., Prykhodko N., Makarova L., Pukhalevych A. Outlier Detection in Non-Linear Regression Analysis Based on the Normalizing Transformations. *Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), IEEE.* (Lviv-Slavske, 2020). P. 407-410.

Makarova L.M., Latanska L.O., Davlatova D.H., Koltsov A.V. A TWO-FACTOR NONLINEAR REGRESSION MODEL FOR ESTIMATING THE SIZE OF WEB APPLICATIONS DEVELOPED IN PYTHON USING DJANGO REST FRAMEWORK

In the conditions of endless technological development and aspirations for quick and convenient access to information, there is a constant need to create new software, mobile applications and web applications. Every software developer has the goal of completing tasks as quickly and qualitatively as possible, as well as creating something new before others. That is, companies strive to optimize and automate both business processes and the work of their employees as much as possible. Today, there are many programming languages, each of which has its own direction, advantages and disadvantages, and is also designed to solve specific problems and achieve certain goals. The Python programming language was chosen for the analysis because it is common among many well-known companies and is a multi-functional language that develops quickly, is easily scalable and has a very convenient, logical syntax, wide and comprehensive support from the community, a large base of frameworks and ready-made libraries to solve a wide variety of problems. After analyzing the existing frameworks for the Python, the high-level and free Django web framework was chosen, which has access to the source code and allows you to easily and quickly create secure and maintainable websites. The article discusses the problem of estimating the size of web applications created in Python using the Django Rest Framework. To achieve the goal of the work, namely to increase the reliability of the estimation of the size of web applications created in the Python language using the Django Rest Framework, a two-factor nonlinear regression model was built. Data from 71 open-source projects were selected, outlier analysis was performed, and the decimal logarithm was used as a normalization transformation to construct a linear regression model. Based on the normalized data and the inverse normalizing transformation, a nonlinear regression model was built for the original non-Gaussian data set (number of lines of code, number of classes, and number of methods). The conducted quality check and comparison with the linear two-factor model showed that the constructed two-factor nonlinear regression model is better for all quality parameters.

Key words: *nonlinear regression model, logarithmic transformation, web applications, Python, Django Rest Framework.*

УДК 004.42
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/19

Марчук Д.К.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Левківський В.Л.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Марчук Г.В.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Голенко М.Ю.
Viseven Ukraine

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ДАКТИЛЬНОЇ МОВИ УКРАЇНСЬКОЇ АБЕТКИ

У даній роботі розглянуто основні етапи розробки нового програмного забезпечення для розпізнавання дактильної мови. Дактильна мова – це можливість спілкування за допомогою жестової мови. Кожна літера зображується певним положенням пальців руки, що позначає дактильний знак – дактилему. Зазвичай, це мова якою спілкуються люди з порушенням слуху чи мовлення. У більшості таких абеток використовується одна рука. Розроблений програмний засіб може проводити розпізнавання букв як правої так і лівої рук. Об'єктом дослідження є методи і процес відстеження та розпізнавання динамічних жестів людини з застосуванням машинного навчання. Для розпізнавання дактилем використано алгоритм на основі скелета – обчислення проводяться за віртуальним скелетом людини, а частини тіла діляться на певні сегменти. Це реалізовано через метод MediaPipe, який є кросплатформним конвеєром машинного навчання, що забезпечує продуктивність у реальному часі. В роботі використано особливий різновид архітектури рекурентних нейронних мереж, здатний до навчання, а саме модель довготривалої короткочасної пам'яті LSTM (Long short-term memory), який довів свою ефективність. Для навчання і тренування мережі створено унікальний набір даних для української дактильної абетки. В роботі також розглянуто результати навчання декількох моделей з різними функціями активації. Проаналізовано та досліджено показники втрат і точності. Проведено опис інтерфейсу при роботі з програмним продуктом і зазначено варіанти та можливості його використання. Було досліджено ефективність роботи програмного забезпечення у реальних умовах, перевірено результат якості та точності розпізнавання української дактильної абетки та створення речень з перекладених знаків.

Ключові слова: *розпізнавання, дактильна мова, дактилема, нейронна мережа, машинне навчання, RNN.*

Постановка проблеми. Дактильною мовою користуються люди з особливими потребами для обміну інформацією між собою та іншими людьми. Мова має свою абетку, словник і синтаксис, який суттєво відрізняється від звичайної. Навіть з цією альтернативною формою спілкування дуже складно спілкуватися у широкій громадськості, оскільки розуміння мови жестів потребує тривалого навчання та практики. Як наслідок, цей розрив створює значну соціальну ізоляцію серед людей з вадами слуху та мови в суспільстві, в якому вони співіснують. Щоб подолати цей розрив, потрібна надійна допоміжна технологія, яка може розпізнавати дактильну мову і перекладати її.

Саме тут методи розпізнавання та машинного навчання відіграють важливу роль допомагаючи автоматизувати процес ідентифікації жестів. На даний момент часу систем розпізнавання української дактильної мови та алфавіту у відкритому доступі немає. Так само, як і даних для машинного навчання нейроних моделей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні методи штучного інтелекту застосовуються у різних сферах нашого життя. Згорткові нейронні мережі є одним із найпоширеніших типів нейронних мереж, які використовуються в комп'ютерному баченні. Наприклад в роботі [1] використовується згорткова нейронна мережа для розпізнавання рукописного тексту. У статті [2]

розглянуто нову систему для фільтрації спаму та реклами, яка надає засоби для швидкого визначення та фільтрації спам-контенту, реклами та контенту для дорослих поєднуючи класичні методи із сучасними, які базуються на використанні нейронних мереж.

Рекурентні нейронні мережі мають багато застосувань. У роботі [3] запропоновано програмну реалізацію з використанням методів штучного інтелекту для пошуку вільного місця на парковці. Розроблена система надає змогу користувачам авто здійснювати пошук вільних місць, витрачаючи при цьому мінімум часу. У статті [4] описано основні алгоритми аналізу потоку кадрів відеоданих, шо надходять з камер міста. Основною метою дослідження є мінімізація часу на пошук вільного місця для паркування автомобіля.

В роботі [5] проведено аналіз нейронної мережі Хопфілда, мереж Елмана і Джордана, ESN-мережі, рекурсивної мережі і рекурентної мережі з довгою короткостроковою пам'яттю для безпосереднього визначення оптимальної архітектури мережі для обробки великих текстових даних

Наприклад, рекурентні нейронні мережі використовувалася для прогнозування курсу акцій [6], машинного перекладу [7] і створення музики [8]. Месюра В. та Гранік М. [9] застосовують методи штучного інтелекту для аналізу новин та доводять ефективність у вирішенні проблеми виявлення фейкових новин.

Формулювання цілей статті. На основі аналізу предметної області постає необхідність дослідження методів розпізнавання дактильної мови та розробці програмного забезпечення. Для реалізації цієї мети були поставлені такі завдання:

– провести аналіз методів відстеження та розпізнавання динамічних жестів людини.

– створити набір даних для розпізнавання літер дактильної абетки;

– розробити обчислювально-ефективну модель і алгоритм розпізнавання динамічних жестів людини.

– провести експерименти по оцінці надійності і працездатності системи в реальному часі.

Виклад основного матеріалу. Українська жестова мова – природна візуально-жестова мовна система з власною лексико-граматичною структурою, що сформувалась еволюційним шляхом і використовується як основний або один з основних засобів спілкування жестомовних осіб, які постійно проживають або впродовж тривалого часу проживали на території України. Крім цього, зазначають, що українська жестова мова є мовою спільноти жестомовних осіб, до яких відносять людей із порушеннями слуху чи мовлення.

Українська дактильна абетка допоміжна система української жестової мови, в якій кожному жесту однієї руки (зазвичай нерухомою правою, зігнутою в лікті) відповідає літера української мови; багато дактилем зовні схожі на відповідні літери української абетки.

Сучасна українська дактильна абетка нараховує 33 дактильних знаки, тобто стільки ж, скільки літер в українській абетці [10]. Кожна дактилема відповідно позначає графему і відтворюється згідно з мовленнєвою нормою. Залежно від типу вхідних даних, підхід до інтерпретації жесту може здійснюватися різними способами. Однак більшість методів спираються на ключові покажчики, представлені в тривимірній системі координат. На основі їх відносного руху жест можна виявити з високою точністю, залежно від якості введення та обраному методу.

Щоб інтерпретувати рухи тіла, потрібно класифікувати їх за загальними властивостями та повідомленням, яке рухи можуть виражати. Наприклад, на мові жестів кожен жест представляє слово чи фразу.

У літературі розрізняють 2 різні підходи до розпізнавання жестів: на основі 3D-моделі та на основі зовнішнього вигляду. Перший метод використовує тривимірну інформацію про основні елементи тіла, щоб отримати кілька важливих параметрів, як положення долоні або орієнтація суглобів руки. З іншого боку, такі системи на основі зовнішнього вигляду використовують зображення або відео для безпосередньої його інтерпретації.

Для точності будь якої нейронної мережі необхідна велика кількість даних для її навчання. Нажаль, для української жестової мови такі датасети відсутні у вільному доступі. Для реалізації прогамного продукту створимо власний набір даних для розпізнавання.

Для створення набору даних використаємо замість зображень відеозаписи, які в подальшому будуть розбиватись на 30 кадрів. Набір даних буде складатись з 36 класів, з яких 33 це знаки дактильної абетки, які відповідають кількості у звичайному українському алфавіті та 3 спеціальні класи — фон, вставка пробілу між словами і знак видалення літери. В кожному класі буде 100 відеозаписів розбитих на 30 кадрів, що в результаті становитиме 3000 кадрів. Абетка містить як статичні жести, так і динамічні, саме тому буде доречніше використовувати відеозаписи з орієнтирами

Mediapipe для кожного кадру ніж просто набір даних з зображеннями.

Для створення датасету було написано програмний додаток на мові Python з використанням Mediapipe і OpenCV. Під час запису відео MediaPipe малює орієнтири безпосередньо на зображенні.

Процес навчання вимагає створення, класифікації та перемішування даних, щоб вони були подані в конвеєр машинного навчання. Саме тому всі орієнтири з зображення зберігаються у масив бібліотеки Numpy. Після чого такі масиви з координатами орієнтирів для кожного кадра зберігаються у файли з розширенням .NPY для майбутнього навчання моделі. Замість потоку з веб камери OpenCV, на вхід можна передавати і звичайні відео, що суттєво може зменшити витрати у часі. На кожний клас необхідно записати приблизно ~100 відео для забезпечення необхідної кількості даних для навчання моделі.

Записані відео і координати з них мають бути різноманітними та записаними з різних відстаней та положень для покращення кінцевого результату. Відео необхідно записувати окремо для кожної руки, щоб мати можливість розпізнавати жести з різних сторін, що лише збільшує мінімальну необхідну кількість відеозаписів. Mediapipe інколи видає хибні дані у розпізнаванні координат з відео і якщо під час відео трапляються помилки у відображенні орієнтирів, то вони обов'язково залишають відбиток і додають хибних даних у значення записуваного класу.

Для навчання алгоритму розпізнавання була використана модель рекурентної нейронної мережі. Рекурентні нейронні мережі є найкращою підходящою архітектурою, оскільки мова жестів являє собою послідовність рухів рук і алгоритм розпізнавання повинен зберігати та використовувати інформацію послідовно. Вхідними даними для моделі є вектор, що складається з 63 точок даних. Кожна рука має 21 орієнтир, точка з координатами x, y і z створена для двох рук. Оскільки в деяких відео було видно лише одну руку, ліві точки даних були заповнені нулями.

Спроектована нейронна мережа складається з 6 шарів, 3 з яких приховані шари. Модель буде використовувати змішані функції активації, адже під час дослідження та експериментів, вони видали найкращий результат порівняно з іншою конфігурацією, коли всі шари використовували функцію активації ReLU. Саме тому перші три шари використовують функції активації з параметром activation=tahn та рекурентну активацію з параметром reccurent_activation=sigmoid. Модель з даними параметрами не тільки покращила свою роботу в декілька разів за швидкістю та точність, а й ще показала набагато кращий результат порівняно з іншими спробами тренування. На шарах Dense функції активації залишились ReLU і у останньому шарі softmax.

Дані навчання були розділені на дві частини: навчання та перевірка. Використані дані перевірки становили 10% від усіх даних. Остаточне навчання проводилося для 1000 епох, що зайняло приблизно декілька годин з використанням графічного процесору у Google Collabaratory. Остаточна досягнута точність склала 92,54%.

Для дослідження якості та точності навченої моделі використовуємо Tensorboard. Tensorboard дозволяє у реальному часі за допомогою інтерактивного веб-інтерфейсу відстежувати процес навчання. На графіках помаранчева лінія відповідає за тренування моделі, а блакитна за валідацію даних. Графік (рис. 1) відображає зростання точності за кількістю епох, вона без помилок починає впевнено видавати точність після 70–80 епох з точністю до 0.9–0.98.

Графік (рис. 2) відображає після якої епохи втрати під час навчання моделі почали зменшуватись. Як бачимо на рисунку втрати після 70 епох значно зменшились від значення 1.8 до 0.2–0.1.

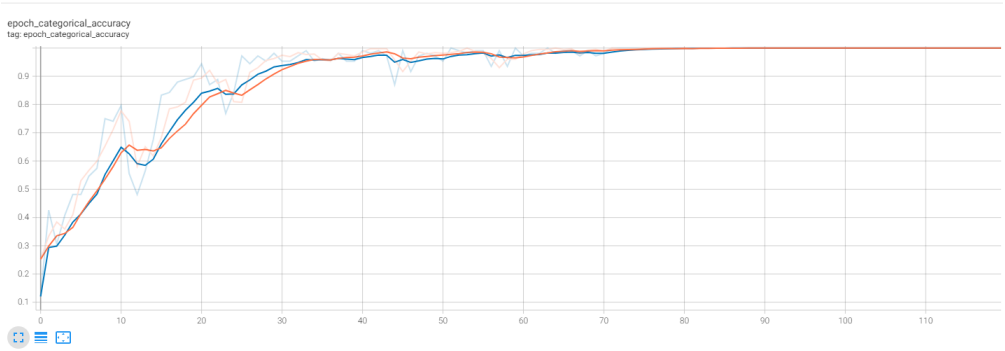


Рис. 1. Результати останньої навченої моделі зі зростанням точності після 70-80 епох

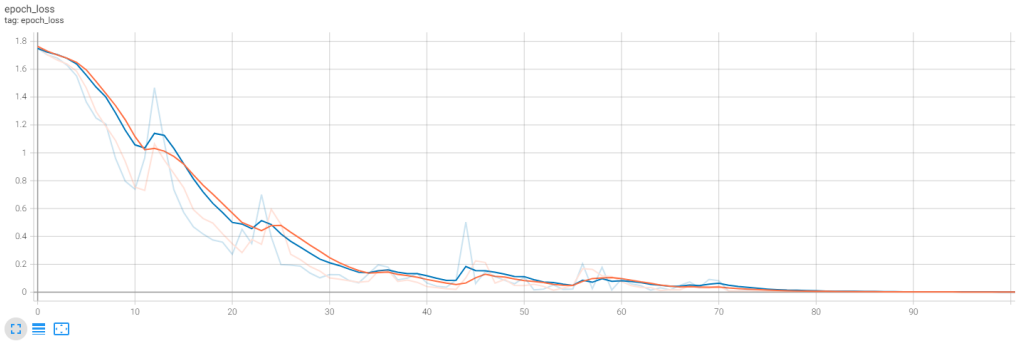


Рис. 2. Результати останньої навченої моделі зі зменшенням втрат після 70-80 епох

Наступні два графіки (рис. 3 та рис. 4) відображають оцінки точності та втрат навченої моделі. На них можна помітити, що стабільна точність та зменшення втрат було досягнуто після 300 епох.

За результатами навчання можна зробити висновок, що завдяки вибору коректних функцій активації точність та швидкість моделі навчання значно зросла.

На основі створеної моделі було розроблено програмне забезпечення для розпізнавання української дактильної мови. Початкове меню програми надає користувачам можливість вибрати необхідний варіант роботи з програмою в залежності від їх потреб – створити власний набір даних або одразу перейти до розпізнавання дактильної абетки (рис. 5).

При натисканні кнопки створення датасету відкривається вікно, у якому відображається зображення з веб-камери. На камеру потрібно показати дактильний знак, для його запису для майбутнього розпізнавання. Після успішного запису необхідної кількості відео, вікно автоматично закривається

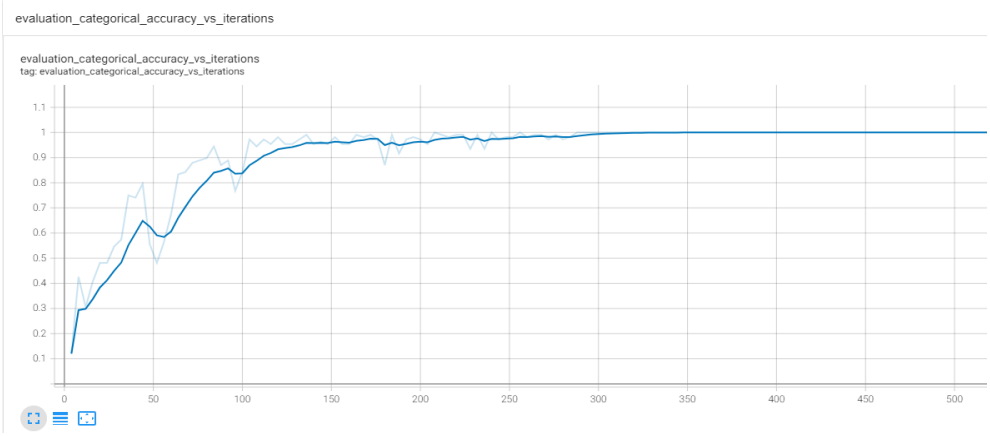


Рис. 3. Результати оцінки останньої навченої моделі зі зменшенням втрат після 250 епох

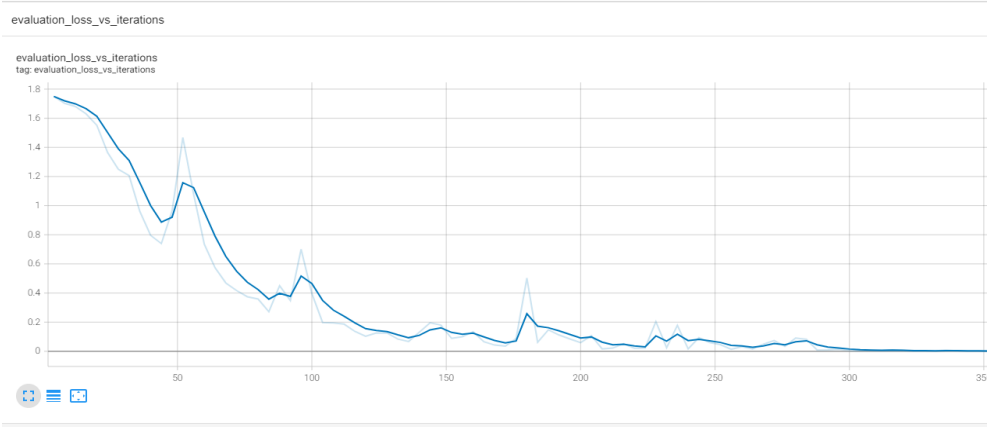


Рис. 4. Результати оцінки останньої навченої моделі зі зменшенням втрат після 290

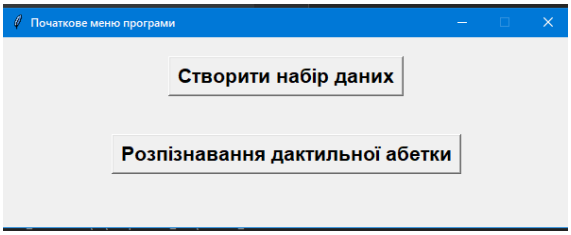


Рис. 5. Початкове меню програми

та програма готова до створення набору даних для іншого класу.

Відкривши програму в режимі розпізнавання дактильної абетки з'явиться головне вікно програми продемонстроване на рисунку 6. Червоною рамкою виділено область, де відображається зображення з веб-камери. У даній області також буде відображатись вірогідність розпізнавання і коректно розпізнаний знак дактильної абетки.

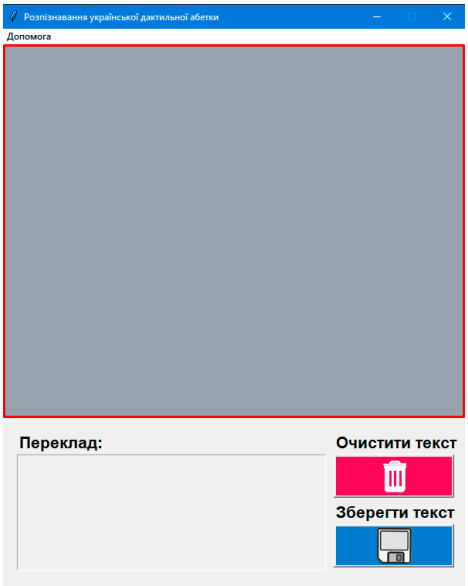


Рис. 6. Вікно розпізнавання дактильної абетки

Основне поле з результатом перекладеного знака дактильної мови у літеру по замовчуванню є заблокованим для користувача і вмикається лише при розпізнаванні і внесенні результату.

Зверху біля назви вікна програми можемо побачити меню з назвою "Допомога". Якщо скористатись ним, то з'явиться контекстне меню з двома параметрами "Дактильна абетка" та "Вийти з програми".

При натисканні на пункт меню "Дактильна абетка" відкривається нове вікно з зображенням всіх літер української дактильної мови для вивчення знаків дактильної абетки.

Було проведено тестування для перевірки ефективності використання додатка. На рисунках 7 та 8 зображено результати розпізнавання деяких літер дактильної абетки.

При послідовному відображенні знаків програма взмозі скласти літери в слова, які в подальшому можна зберегти до текстового документу(рис. 9).

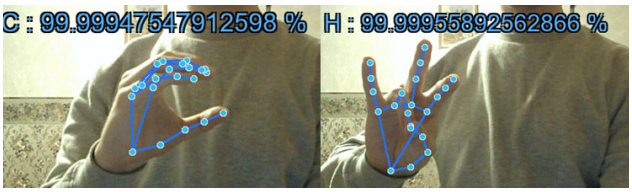


Рис. 7. Результати розпізнавання літер С та Н

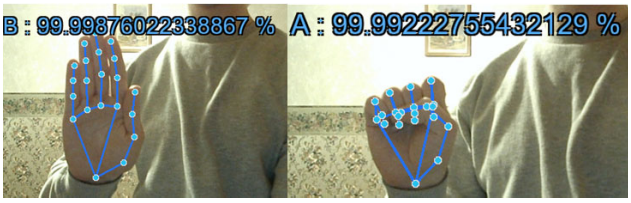


Рис. 8. Результати розпізнавання літер В та А

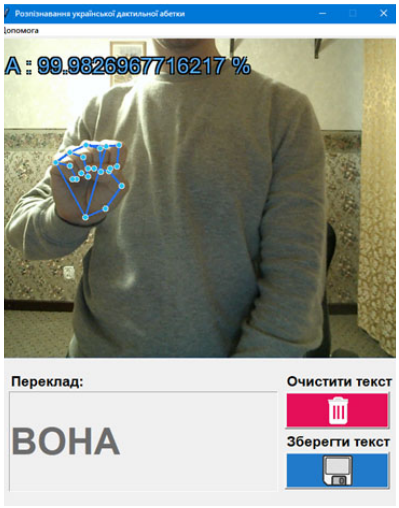


Рис. 9. Результат перекладу та відображення слова «ВОНА»

Висновки. В результаті проведених досліджень було:

– проведено аналіз методів відстеження та розпізнавання динамічних жестів людини.

– створено набір даних для розпізнавання літер дактильної абетки;

– розроблено обчислювально-ефективну модель і алгоритм розпізнавання динамічних жестів людини.

– проведено експерименти по оцінці надійності і працездатності системи в реальному часі.

Таким чином отримано програмний продукт для розпізнавання української дактильної мови. Працездатність та ефективність використання було доведено в результаті проведених експериментів.

Список літератури:

1. Ковальчук, А. М., Марчук, Г. В., Марчук, Д. К. Застосування згорткової нейронної мережі для розпізнавання рукописних символів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Том 30 (69) Ч. 1. № 4. 2019.

2. Suhoniak, I.I., Yefimenko, A.A., Marchuk, G.V., Feschenko, D.I.. (2020). DECISION SUPPORT SYSTEM DEVELOPMENTFOR BLOCKING UNWANTED CONTENT BY NEURAL NETWORKS. Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/19

3. Левківський В.Л., Марчук Г.В., Ципоренко В.В., Марчук Д.К. Комп'ютерна програма» Алгоритмічно-програмне забезпечення обробки та аналізу потоку кадрів відеоданих, що надходять з камер міста», 2021. URL: http://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/8019/109822.pdf?sequence=1&isAllowed=y

4. Levkivskyi V., Marchuk D., Lobanchykova N., Pilkevych I., Salamatov D. Available parking places recognition system. CEUR Workshop Proceedings 4th Workshop for Young Scientists in Computer Science & Software Engineering Volume 3077 (2022). pp.123-134 URL: http://ceur-ws.org/Vol-3077/paper07.pdf

5. Nguyen, A. і Sidorov, Y. 2018. Рекурентна нейронна мережа для обробки великих текстових даних. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 4, 50 (Вер 2018), 135-138. DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.4.135

6. Sreelekshmy Selvin, R Vinayakumar, EA Gopalakrishnan, Vijay Krishna Menon, and KP Soman. Stock price prediction using lstm, rnn and cnnsliding window model. In 2017 international conference on advances in computing, communications and informatics (icacci), pages 1643–1647. IEEE, 2017.

7. Kyunghyun Cho, Bart van Merriënboer, Caglar Gulcehre, Dzmitry Bahdanau, Fethi Bougares, Holger Schwenk, and Yoshua Bengio. 2014. Learning Phrase Representations using RNN Encoder–Decoder for Statistical Machine Translation. In Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP), pages 1724–1734, Doha, Qatar. Association for Computational Linguistics. URL: https://aclanthology.org/D14-1179.pdf

8. Kratarth Goel, Raunaq Vohra, and Jajati Keshari Sahoo. Polyphonic music generation by modeling temporal dependencies using a rnn-dbn.In International Conference on Artificial Neural Networks, pages 217–224. Springer, 2014.

9. M. Granik and V. Mesyura, «Fake news detection using naive Bayes classifier,» 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017, pp. 900-903, URL: https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100379

10. Лихошерстов Д.О., Лебедев Д.Ю. Аналіз сучасних систем розпізнавання дактильної-жестової мови для систем сурдоперекладу. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки Том 32 (71) № 6. 2021. Ч. 1. С. 44-48. URL: https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/07

Marchuk D.K., Levkivskyi V.L., Marchuk G.V., Holenko M.Yu. DACTYLIC LANGUAGE RECOGNITION SYSTEM OF THE UKRAINIAN ALPHABET

This work considers the main development stages of new software for dactylic speech recognition. Dactylic language is a process of communication using sign language. Each letter is represented by a certain position of the fingers on the hand, which denotes a dactyl sign – a dactylem. Usually, this is the language used by people with hearing or speech impairments. Most of these alphabets use one hand. The developed software can recognize letters of both right and left hands. The research object is the methods and process of tracking and recognizing dynamic human gestures using machine learning. A skeleton-based algorithm is used for dactyl recognition – calculations are performed on a virtual human skeleton, and body parts are divided into certain segments. This is implemented through the MediaPipe method, which is a cross-platform machine learning pipeline that provides real-time performance. This work uses a special architecture type of recurrent neural networks capable of learning, namely the model of LSTM (Long short-term memory), which has proven its efficiency. A unique dataset for the Ukrainian dactyl alphabet has been created for training the network. The paper also examines the results of training several models with different activation functions. The loss and accuracy indicators were analyzed and investigated. The interface when working with the software product is described, and the options with possibilities of its use are indicated. The effectiveness of the software in real conditions was investigated, the result of the quality and accuracy of recognizing the Ukrainian dactyl alphabet and creating sentences from translated signs was checked.

Key words: *recognition, dactyl language, dactylema, neural network, machine learning, RNN.*

УДК 004.056.53:[004.7:004.032.26]
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/20

Пахомова В.М.
Український державний університет науки і технологій

Мотиленко В.А.
Український державний університет науки і технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ RBF ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ SMURF АТАК НА ОСНОВІ БАЗИ ДАНИХ KDDCUP

Для виявлення мережевих атак у режимі реального часу використовуються системи виявлення вторгнень. Одним із найбільш ефективних підходів у класифікуванні великого обсягу даних є застосування нейромережевої технології, що дозволяє виявляти не тільки відомі мережеві атаки, але й виявляти нові. На сьогодні відомо, що помилкові спрацьовування *відбуваються не завжди на одних і тих самих мережевих пакетах при аналізі за допомогою різних типів нейронних мереж: багатошарового персептрону; мережі Кохонена або самоорганізуючої карти; радіально-базисної мережі; нейронечіткої мережі, а також їх комбінацій. Для визначення мережевих атак категорії DoS з використанням бази даних KDDCup створено мовою Rust програму «RBF_DoS», в основу якої покладена мережа RBF конфігурації N-M-K, де N – кількість вхідних нейронів (параметри мережевого трафіку); M – кількість нейронів прихованого шару (кількість базисних функцій); K – кількість результуючих нейронів (мережеві класи атак) за методом стохастичного градієнтного спуску, у якості функції належності прихованих нейронів взято Гаусовську функцію. Проведено апробацію програми «RBF_DoS» на основі RBF конфігурації 29-50-3 для визначення кластерів (Normal; Smurf; Another_attack) з використанням наступних вибірок: навчальної, що складалася із 200000 прикладів на кожний кластер; тестової, що складалася із 10000 прикладів на кожний кластер; контрольної, що складалася із 100 прикладів на кожний кластер. На створеній програмі «RBF_DoS» проведено дослідження точності та середньоквадратичної похибки RBF за наступними параметрами: епохами навчання; довжиною навчальної вибірки; кількістю прихованих нейронів. Визначено, що при виявленні атак мережевого класу Smurf найменше значення середньоквадратичної похибки RBF досягалося за 10 епох навчання з використанням 101 прихованих нейронів, при цьому достатньо мати навчальну вибірку із 2408 прикладів; точність визначення атаки Smurf склало 0,99.*

Ключові слова: *атака, Smurf, RBF, конфігурація, Гаусовська функція, точність, похибка, вибірка, епоха.*

Постановка проблеми. Для виявлення мережевих атак у режимі реального часу використовуються системи виявлення вторгнень. Одним із найбільш ефективних підходів у класифікуванні великого обсягу даних є застосування нейромережевої технології, що дозволяє виявляти не тільки відомі мережеві атаки, але й виявляти нові.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі відомо про існування наступних категорій атак: DoS; R2L; U2R; Probe, зокрема значна кількість джерел присвячена дослідженню DoS-атак [6, 8, 13, 15, 18]. У загалі для виявлення атак на комп'ютерну мережу можливе використання наступних нейронних мереж (НМ): багатошарового персептрону (Multi Layer Perceptron, MLP) [3-4, 7, 18]; мережі Кохонена або самоорганізуючої карти (Self Organizing Map, SOM) [7, 13]; радіально-базисної мережі (Radial Basis Function Network, RBF) [7, 9] та використання нейронечіткої технології (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, ANFIS) [5-6, 9], проте значна кількість джерел присвячена дослідженню атак на основі використання MLP. На сьогодні відомо, що помилкові спрацьовування також відбуваються не завжди на одних і тих самих мережевих пакетах при аналізі за допомогою різних типів НМ. Так, зокрема, до основних переваг використання RBF мережі можна віднести [1]: спрощену структуру мережі (наявність лише одного прихованого шару); високу швидкість навчання; здатність навчатися на неоднорідній вибірці даних; здатність моделювати випадкові процеси. Але проблемою RBF-мережі є вибір кількості радіально-базисних функцій [10-11, 16-17]. У [10] зазначено, що число необхідних радіально-базисних функцій росте експоненціально із зростанням числа вхідних змінних. Тому для визначення DoS атак доцільно

провести дослідження можливості використання RBF мережі.

Формулювання цілей статті. Проведені дослідження ставили за мету розвиток методики визначення мережевих атак категорії DoS. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: розробити методику виявлення мережевих атак засобами мережі RBF; при виконанні машинного навчанні виявити оптимальні параметри НМ, що забезпечить високий рівень достовірності виявлення вторгнень в комп'ютерну мережу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Категорія DoS характеризується генерацією великого обсягу трафіку, що призводить до перевантаження та блокування сервера. Відомі наступні класи мережевих атак відповідно до категорії DoS: Back, Land, Neptune, Pod, Smurf, Teardrop. У якості початкових даних використана відкрита база даних KDDCup [12].

Проведений аналіз бази даних KDDCup показав, що до її складу надходить: 2203 записів для мережевого класу Back; 21 – для Land; 1072017 – для Neptune; 264 – для Pod; 2807886 – для Smurf; 979 – для Teardrop; 972781 – для Normal (не має атаки), тому для подальшого дослідження сфокусовано увагу на численніших кластерах (Smurf і Normal). Smurf – це розподілена атака відмови в обслуговуванні, в якій велика кількість пакетів Internet Control Message Protocol (ICMP) з підробленою вихідною IP-адресою передбачуваної жертви транслюється в комп'ютерну мережу з використанням широкомовної IP-адреси. Більшість пристроїв у мережі за про мовчанням дадуть відповідь на вихідну IP-адресу. Якщо кількість машин у мережі, які отримують та відповідають на ці пакети, дуже велика, комп'ютер жертви буде переповнений трафіком. Це може сповільнити роботу комп'ютера жертви настільки, що з ним буде неможливо працювати.

Математичний апарат. У якості математичного апарату використана RBF мережа, структура якої подана на рис. 1.

RBF-мережа по своїй структурі відноситься до двошарової мережі, в який використовується єдиний прихований шар (радіально-базисний) з фіксованим нелінійним перетворенням вектора входу з постійними ваговими коефіцієнтами. Нейрони прихованого шару діють за принципом центрування на елементах навчальної вибірки. Навколо кожного центру існую область, яка зветься радіусом. Специфіка RBF-мережі полягає у тому, що в них налагоджуються тільки вагові коефіцієнти лінійного вихідного шару, що в свою чергу, сприяє швидкому процесу навчання мережі.

У якості вхідних змінних НМ використані із бази даних KDDCup [12] параметри мережевого трафіку $x_1 \ldots x_n$ (n=29 [2]; табл. 1).

У якості результуючих нейронів $y_1 \ldots y_K$ (k=3), де y_1 відповідає Normal (атаки не було); y_2 – Smurf; y_3 – Another_attack. Вихід НМ є лінійною комбінацією набору базових функцій:

$$y_k(x) = \sum_{j=1}^{M} w_{jk} \cdot \Phi_j(x),$$

де w_{jk} – вагові коефіцієнти; $\Phi_j(x)$ – базисні функції, що визначаються як:

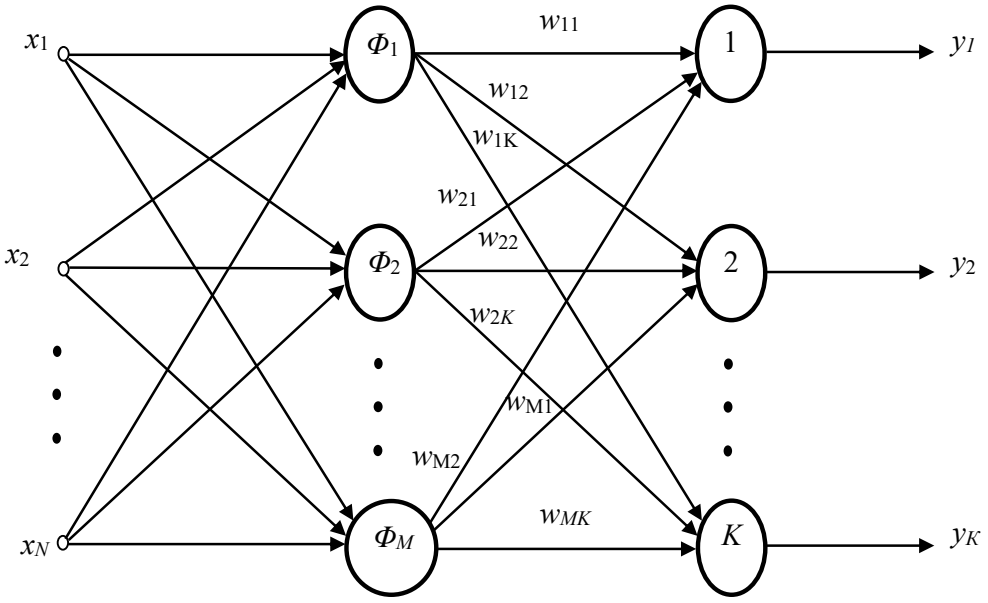


Рис. 1. Структура мережі RBF

Таблиця 1

Співвідношення нейронів і параметрів мережевого трафіку

Нейрон	Параметр	Нейрон	Параметр
x1	duraction	x16	srv_rerror_rate
x2	src_bytes	x17	same_srv_rate
x3	dst_bytes	x18	diff_srv_rate
x4	urgent	x19	srv_diff_host_rate
x5	hot	x20	dst_host_count
x6	su_attempted	x21	dst_host_srv_count
x7	root_shell	x22	dst_host_same_srv_rate
x8	num_failed_logins	x23	dst_host_diff_srv_rate
x9	is_host_login	x24	dst_host_same_src_port_rate
x10	is_guest_login	x25	dst_host_srv_diff_host_rate
x11	count	x26	dst_host_serror_rate
x12	srv_count	x27	dst_host_srv_serror_rate
x13	serror_rate	x28	dst_host_rerror_rate
x14	srv_serror_rate	x29	dst_host_srv_rerror_rate
x15	rerror_rate	y	label

$$\Phi_j(x) = e^{-\frac{|x-\mu_j|^2}{\sigma_j^2}},$$

де μ_j – координата центру j-ой функції RBF; σ_j – радіус *j*-ой функції RBF.

Формування вибірок. Згенеровано наступні вибірки: 1) навчальну, що складалася із 200000 прикладів на кожний кластер; 2) тестову, що складалася із 10000 прикладів на кожний кластер; 3) контрольну, що складалася із 100 прикладів на кожний кластер. У якості прикладу наведений фрагмент контрольної вибірки:

0,1032,0,0,0,0,0,0,0.0,0.0,511,511,0.0,0.0,0.0,0.0,
1.0,0.0,0.0,255.0,255.0,1.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
0.0,0.0,smurf
0,0,0,0,0,0,0,0,0.0,0.0,1,1,0.0,0.0,1.0,1.0,1.0,0.0,
0.0,12.0,239.0,1.0,0.0,0.08,0.12,0.0,0.0,1.0,1.0,
normal
0,0,0,0,0,0,0,0,0.0,0.0,241,10,1.0,1.0,0.0,0.0,0.04,
0.06,0.0,255.0,9.0,0.04,0.05,0.0,0.0,1.0,1.0,0.0,
0.0,neptune

Алгоритм навчання НМ: 1) зчитати вхідні параметри; 2) завантажити масив даних з файлу для тренування НМ; 3) створити об'єкт НМ, вибравши необхідну кількість випадкових записів – це центри базисних функцій (кожен центр відповідає одному прихованому нейрону); 4) передати масив даних для навчання НМ з використанням методу стохастичного градієнтного спуску; 5) перемішати масив даних; 6) повторити п.п. 4–5 для заданої кількості епох; 7) зберегти НМ з найменшим значенням помилки; 8) повторити п.п. 3–7 для заданої кількості ітерацій. Алгоритм тестування НМ: 1) зчитати вхідні параметри; 2) зчитати коефіцієнти для налаштування НМ з файлу моделі; 3) завантажити коефіцієнти в об'єкт НМ; 4) завантажити масив даних з файлу; 5) передати елемент у функцію підрахунку результату в НМ; 6) підрахувати середньоквадратичне відхилення та точність НМ.

Створення програми. У якості мови програмування обрано Rust [14], яка орієнтована на безпеку та забезпечує високий паралелізм виконання завдань. Однією із особливостей Rust є використання trait, що підтримують об'єктно-орієнтоване програмування, і позначають спільну поведінку різних типів, що дозволяє уникати помилок на етапі компіляції. Загальна структура складеної програми «RBF_DoS» показана на рис. 2.

Дослідження параметрів НМ. На програмі «RBF_DoS» проведено ряд дослідів: дослідження точності та середньоквадратичної похибки за різною кількістю епох навчання НМ (рис. 3), за різною довжиною навчальної вибірки (рис. 4) та за різною кількістю прихованих нейронів (рис. 3). Із рис. 3 видно, що найменше значення похибки НМ досягнуто протягом 10 епох навчання; при цьому точність визначення атаки Smurf склало 0,99. Із рис. 4 видно, що найменше значення середньоквадратичної похибки НМ досягалося на навчальних вибірках, довжина яких 2408 і 2806 прикладів. Із рис. 5 видно, що найменше значення середньоквадратичної похибки навчання досягалося на НМ з використанням 101 прихованих нейронів (базисних функцій).

Висновки. Для визначення мережевих атак категорії DoS на основі використання бази даних KDDCup99 створена мовою Rust програма «RBF_DoS» на основі реалізації мережі RBF

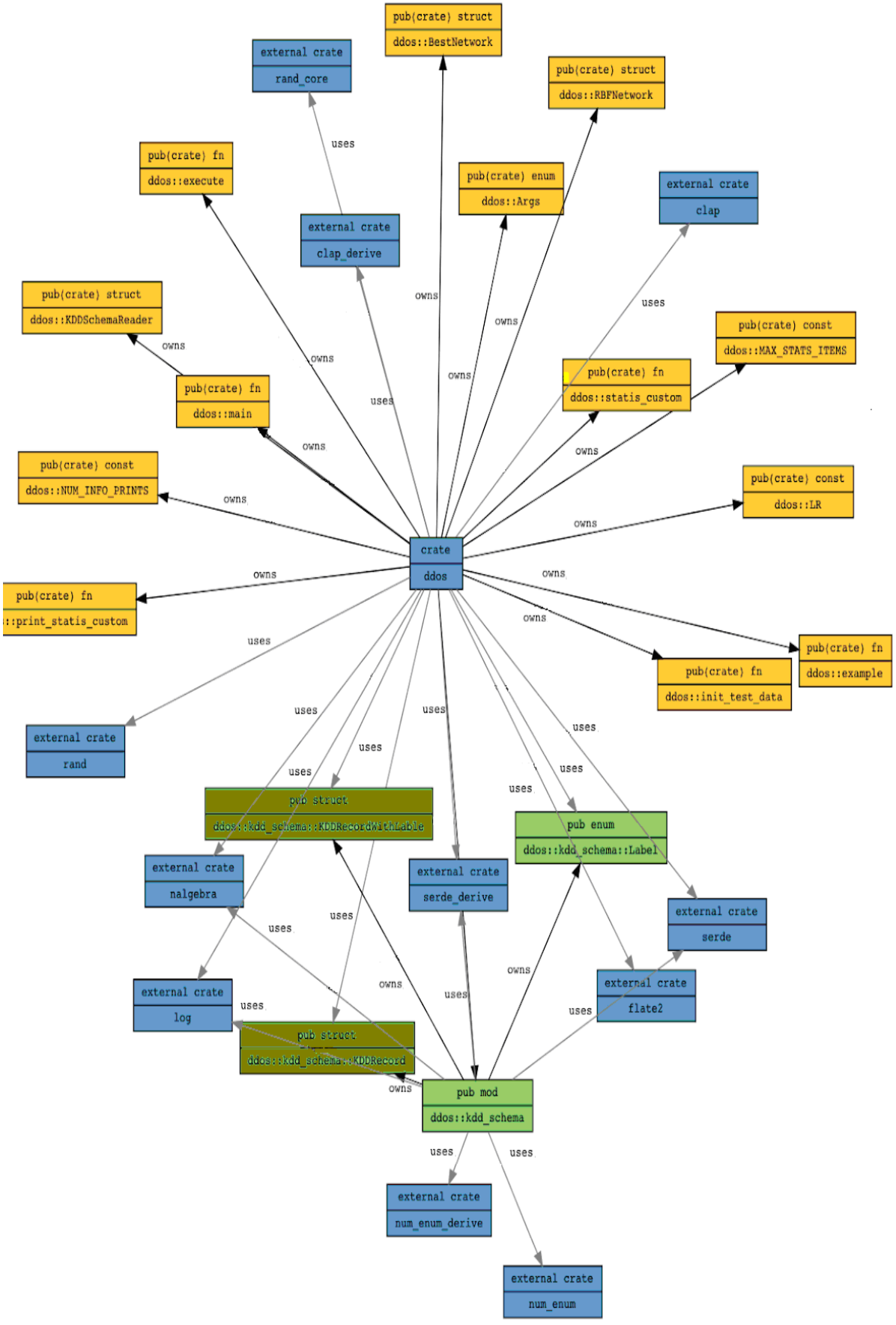


Рис. 2. Загальна структура складеної програми “RBF_DoS”

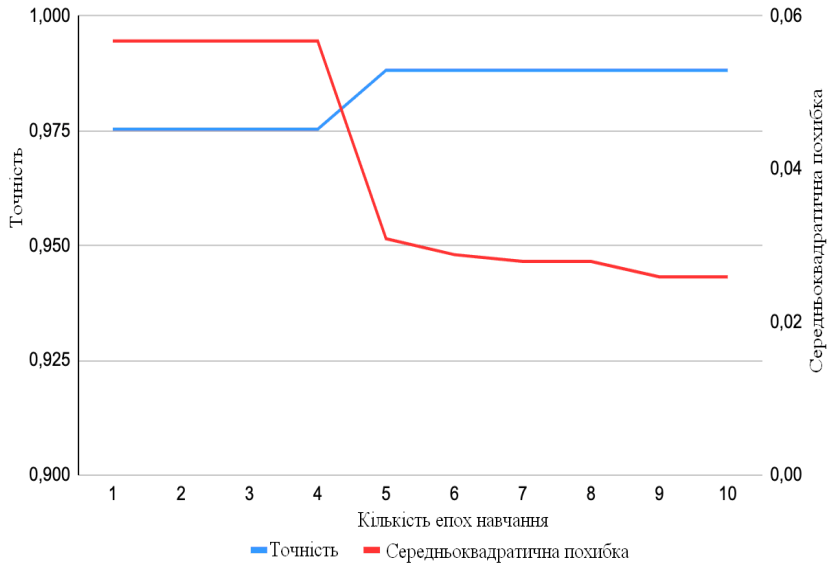


Рис. 3. Точність і похибка НМ за кількістю епох навчання

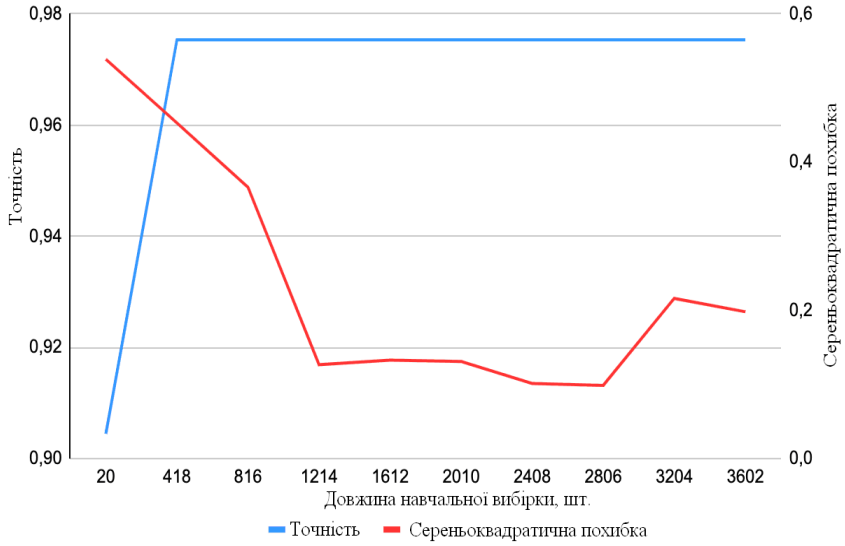


Рис. 4. Точність і похибка НМ за довжиною навчальної вибірки

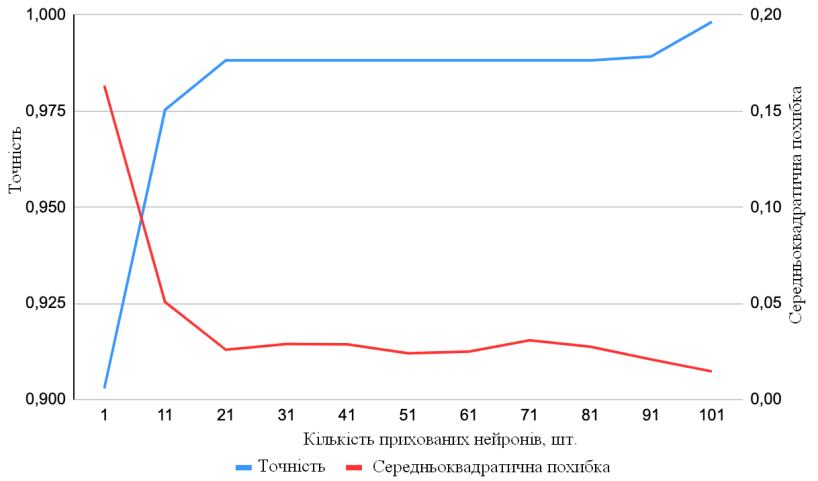


Рис. 5. Точність і похибка НМ за кількістю прихованих нейронів

конфігурації N-M-K, де N – кількість вхідних нейронів (параметри мережевого трафіку); M – кількість нейронів прихованого шару (кількість базисних функцій); K – кількість результуючих нейронів, у якості функції належності прихованих нейронів взято Гаусовську функцію (ширина розподілу 0,1). Проведена апробація програми «RBF_DoS», основу якої складала мережа RBF конфігурації 29-50-3 для визначення наступних кластерів: Normal; Smurf; Another_attack, робота якої залежить від кількості та положення радіально-базисних функцій.

На створеній програмі «RBF_DoS» проведено дослідження точності та середньоквадратичної похибки RBF. Визначено, що найменше значення середньоквадратичної похибки RBF досягалося за 10 епох навчання при використанні 101 прихованих нейронів (радіально-базисних функцій), при цьому достатньо мати навчальну вибірку із 2408 прикладів; точність визначення атаки Smurf склало 0,99.

У подальшому для виявлення мережевих атак доцільно провести дослідження деяких комбінованих варіантів з використанням мережі RBF.

Список літератури:

1. Бодянский Е. В., Руденко О. Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2004. 369 с.
2. Котов В. Д., Васильев В. И. Система обнаружения сетевых вторжений на основе механизмов иммунной модели. *Известия Южного федерального университета. Технические науки.* 2011. С. 180-189. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-obnaruzheniya-setevyh-vtorzheniy-na-osnove-mehanizmov-immunnoy-modeli/viewer
3. Мустафаев А. Г. Нейросетевая система обнаружения компьютерных атак на основе анализа сетевого трафика. *Вопросы безопасности.* 2016. № 2. С. 1–7. DOI: 10.7256.2409-7543.2016.2.18834
4. Пахомова В. М., Коннов М. С. Дослідження двох підходів до виявлення мережних атак із використанням нейромережної технології. *Наука та прогрес транспорту.* 2020. № 3 (87). С. 81-93. URL: https://doi.org/10.15802/stp2020/208233
5. Пахомова В. М., Маслак А. В. Визначення атак категорії Probe з використанням бази даних KDDCup99 та нейронечіткої технології. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. Том 33 (72). № 5, 2022. С. 135–140. DOI: https://doi.org/10.32872/2663-5941/2022.5/19
6. Слеповичев И. И., Ирматов П. В., Комарова М. С., Бежин А. А. Обнаружение DDoS-атак нечеткой нейронной сетью. *Известия Саратовского университета*. Серия: «Математика. Механика. Информатика». 2017. № 3. С. 84–89.
7. Фролов П. В., Чухраев И. В., Гришанов К. М. Применение искусственных нейронных сетей в системах обнаружения вторжений. *Системный администратор*. 2018. № 9 (190). URL: http://samag.ru/archive/article/3724
8. Alguliyev R. M., Aliguliyev R. M., Imamverdiyev Y. N., Sukhostat L. V. An improved ensemble approach for DoS attacks detection. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2018. № 2. С. 73-82. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-2-8
9. Amini M., Rezaeenour J., Hadavandi E. A Neural Network Ensemble Classifier for Effective Intrusion Detection using Fuzzy Clustering and Radial Basis Function Networks. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*. 2016. Vol. 25. Iss. 02. pp. 1-32. DOI: https://doi.org/10.1142/s0218213015500335
10. Bajer D., Zoric B., Martinovic G. Automatic design of radial basis function networks through enhanced different evolution. *Hybrid artificial intelligent systems*: Springer. 2015. pp. 244–256.
11. Beheim L., Zitouni A. New RBF neural network classifier with optimized hidden neurons number. *CiteSeerX 10.1.1.497.5646*. Belloir, Fabien. January 2004.
12. KDDCup1999Data.URL:http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html
13. Pakhomova V. Determination of network attacks using neural network technologies. Chapter 8. pp. 113-128. Prospektive globale wissenschaftliche trends: Innovative Technik, Transport, Sicherheit. *Monografische Reihe «Europaische Wissenschaft»*. Buch 7. Teil 8. Germany: Karlsruhe, 2021. 168 p.
14. Rust: A language empowering everyone to build reliable and efficient software. URL: https://www.rust-lang.org
15. Saied A., Overill R. E., Radzik T. Detection of known and unknown DDoS attacks using Artificial Neural Networks. *Neurocomputing*. 2016. Vol. 172. pp. 385–393. URL: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.04.101
16. Schwenker F., Kestler H. A. Three learning phases for radial-basis-function networks. *Neural Networks 14*: Palm, Günther, 2001. pp. 439-458. DOI: 10.1016/s0893-6080(01)00027-2
17. Wu Y., Wang H., Zhang B., Du. Using radial basis function networks for function approximation and classification. *ISRN Appl Math*. 2012. pp. 1–34.

18. Zhukovyts'kyy I. V., Pakhomova V. M., Ostapets D. O., Tsyhanok O. I. Detection of attacks on a computer network based on the use of neural network complex. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 5 (89). pp. 68–79.

Pakhomova V.M., Motylenko V.A. STUDYING THE POSSIBILITY OF USING RBF FOR DETERMINING SMURF ATTACKS BASED ON THE KDDCup DATABASE

Intrusion detection systems are used to detect network attacks in real time. One of the most effective approaches in classifying a large volume of data is the use of neural network technology, which allows detecting not only known network attacks, but also new ones. Today, it is known that false positives do not always occur on the same network packets when analyzed using different types of neural networks: multilayer perceptron; Kohonen network or self-organizing map; radial base network; neurofuzzy network, as well as their combinations. To determine network attacks of the DoS category using the KDDCup database, the program «RBF_DoS» was created in the Rust language, based on the implementation of the RBF network of the N-M-K configuration, where N is the number of input neurons (network traffic parameters); M is the number of hidden layer neurons (the number of basis functions); K is the number of resulting neurons (network classes of attacks) by the method of stochastic gradient descent, the Gaussian function is taken as the membership function of hidden neurons. Approbation of the «RBF_DoS» program was carried out based on RBF configuration 29-50-3 to determine the following clusters (Normal; Smurfs; Another_attack) using the following samples: training, which consisted of 200,000 examples for each cluster; test, consisting of 10,000 examples for each cluster; control, consisting of 100 examples for each cluster. The created program «RBF_DoS» carried out a study of the accuracy and root mean square error of RBF according to the following parameters: training epochs; the length of the training sample; by the number of hidden neurons.It was determined that when detecting attacks of the Smurf network class, the smallest RBF value was achieved in 10 training epochs using 101 hidden neurons, while it is sufficient to have a training sample of 2408 examples; the accuracy of determining the Smurf attack was 0.99.

Key words: *attack, Smurf, RBF, configuration, Gaussian function, precision, error, sampling, epoch.*

УДК 681.51
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/21

Рибальченко М.О.
Український державний університет науки і технологій

Маначин І.О.
Український державний університет науки і технологій

Потап О.Ю.
Український державний університет науки і технологій

Шибакінський В.І.
Український державний університет науки і технологій

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НА БАЗІ SCADA-СИСТЕМИ ТА ПРИКЛАДНОГО ПАКЕТУ ВІЗУАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розробка АСУ сучасних технологічних процесів – складна і відповідальна задача, рішення якої проводиться в кілька етапів: від складання математичної моделі до проектування людино-машинного інтерфейсу. Комплекс, який би включав і математичну модель, і людино-машинний інтерфейс дозволив би виконувати імітаційне моделювання технологічного процесу в різних режимах роботи при впливах, що програмно формуються засобами людино-машинного інтерфейсу, а також зробити вибір найбільш зручних для користувача засобів візуалізації технологічного процесу і способів формування керуючих впливів.

В статті розроблено комплекс для вивчення та дослідження системи управління технологічним процесом. Він дозволяє демонструвати основні можливості SCADA-систем; виконувати передачу даних з програмного пакета математичного моделювання в SCADA-систему і навпаки; оперативно обчислювати дані, що надійшли; працювати в режимі реального часу. В якості SCADA пакету обраний SCADA пакет Softlogic S3, який є українським продуктом (ТОВ «RTS-Ukraine») та має повну підтримку технології OPC. Як пакет візуального моделювання обраний Matlab / Simulink. Як OPC сервер обраний сервер OPC Matrikon. Розробка комплексу виконувалась для системи регулювання температури методичної печі.

Використовуючи даний комплекс-тренажер, можна здобути навички щодо налаштування та підтримки АСУ різноманітних рівнів. Окрім того, система дозволяє вносити зміни не лише до регулятора, а і змінювати сам об'єкт, що суттєво розширює можливості. Оскільки система може працювати з моделлю, а не тільки з реальним об'єктом, систему можна використовувати для моделювання позаштатних ситуацій, і відповідно оцінювати дії оператора в даних ситуаціях.

Ключові слова: *комплекс, тренажер, SCADA, імітація, сервер, OPC, моделювання, дослідження.*

Постановка проблеми. Розробка АСУ сучасних технологічних процесів – складна і відповідальна задача, рішення якої проводиться в кілька етапів: від складання математичної моделі до проектування людино-машинного інтерфейсу. Комплекс, який би включав і математичну модель, і людино-машинний інтерфейс дозволив би вирішити наступні задачі:

1) імітаційне моделювання технологічного процесу в різних режимах роботи при впливах, що програмно формуються засобами людино-машинного інтерфейсу;

2) вибір найбільш зручних для користувача засобів візуалізації технологічного процесу і способів формування керуючих впливів.

Такий комплекс може бути побудований на базі таких програмних продуктів, як SCADA – система, програма візуального моделювання та засоби міжпрограмного зв'язку.

Сучасні пакети SCADA (людино машинний інтерфейс / диспетчерське управління і збір даних) дозволяють досить швидко створити людино- машинний інтерфейс для індустріальних і дослідницьких установок. Ці програмні продукти широко представлені на світовому ринку.

Найбільш популярні SCADA-системи наведено нижче:

– InTouch (Wonderware) – США;
– Citect (CI Technology) – Австралія;

– FIX (Intellution) – США;
– Genesis (Iconics Co) – США;
– Sitex (Jade Software) – Великобританія;
– TraceMode (AdAstrA) – Росія;
– Cimplicity (GE Fanuc) – США;
– Softlogic S3 (RTS Ukraine) – Україна.

При такому різноманітті SCADA продуктів природно виникає питання про вибір.

В якості критеріїв вибору SCADA-систем для роботи у складі лабораторного комплексу є:

– доступність демо-версії системи;
– сумісність з операційними системами Windows XP/7 /8/10/11;
– підтримка стандарту OPC-технології (OLE for Process Control – сімейство програмних технологій, що надають єдиний інтерфейс для управління об'єктами автоматизації і технологічними процесами) для передачі даних;
– доступність технічної та навчальної документації.

Треба зазначити, що в SCADA пакетах немає розвинених засобів створення моделі технологічного процесу. Найбільш придатними для моделювання самого процесу, є універсальні пакети візуального моделювання, такі як MATLAB/Simulink фірми MathWorks і VisSim32 фірми VisualSolution.

Постає логічне питання про засоби міжпрограмного зв'язку SCADA-систем та пакетів візуального моделювання. Динамічний обмін даними може бути забезпечений за допомогою технології DDE (DynamicDataExchange – динамічний обмін даними) або OPC (OLE for Process Control).

Комунікаційний протокол DDE був розроблений компанією Microsoft для обміну даними між різними Windows-додатками і їх синхронізації. Однак при високому потоці передачі даних цей механізм не дуже підходить внаслідок низької надійності і швидкості передачі повідомлень.

Технологія обміну даними OPC описує інтерфейс обміну даними між пристроями управління технологічними процесами. OPC ґрунтується на технології OLE / COM / DCOM. Дана технологія існує в наборі різних специфікацій, таких як OPC DA (Data Access), OPC AE (Alarms & Events), OPC HDA (Historical Data Access), OPC Batch, OPC UA (United Architecture) і інші.

Існує дуже багато OPC серверів, наприклад, OPC-сервер CoDeSys, Tibbo, **Owen OPC Server, MatrikonOPC та ін. Кожен з них має свої недоліки та переваги.**

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [1] описується підхід до емуляції автоматизованих систем управління технологічними процесами з використанням таких програм як MATLAB, Trace Mode, CoDeSys SP PLCWinNT та OPC-сервер CoDeSys. Таким чином, задіяно чотири програмні компоненти, налаштування яких для роботи у комплексі-тренажері не є простою задачею. Автори роботи [2] також розглядають інформаційну взаємодію SCADA пакетів та пакетів візуального моделювання при розробці тренажерів оперативного персоналу та моделюванні АСУ ТП. Було показано можливості взаємодії SCADA-пакету Genie та пакету візуального моделювання VisSim [2]. Процес двостороннього динамічного зв'язку пакетів VisSim та Genie описано також у роботі [3] на прикладі системи підлеглого керування двигуном постійного струму. Автори двох останніх робіт використовуються для міжпрограмного обміну комунікаційний протокол DDE, що як було зазначено вище, має низьку надійність при високому потоці передачі даних. Крім того, усі застосовані для цієї задачі SCADA-пакети не є вітчизняними розробками, що було б доречним.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Таким чином, у роботі ставилась задача розробки комплексу для вивчення та дослідження системи управління технологічним процесом.

Такий комплекс повинен вирішувати наступні завдання:

– демонстрація можливостей SCADA-систем;
– передача даних з програмного пакета математичного моделювання, в SCADA-систему і навпаки;
– оперативна обчислювальна обробка даних, що надійшли;
– представлення інформації в зручному для подальшої обробки вигляді;
– робота в режимі реального часу.

В якості SCADA пакету обраний SCADA пакет Softlogic S3, який є українським продуктом (ТОВ «RTS-Ukraine») та має повну підтримку технології OPC. Як пакет візуального моделювання обраний MATLAB/Simulink. Як OPC сервер обраний сервер OPC Matrikon, який є безкоштовною для невиробничого використання програмою і може поширюватися відкрито. Це повнофункціональний додаток без обмежень.

Викладення основного матеріалу. Спрощена схема взаємодії об'єктів в автоматизованій системі управління технологічним процесом представлена на рисунку 1.

Як програма для організації верхнього рівня може бути використана будь-яка сучасна

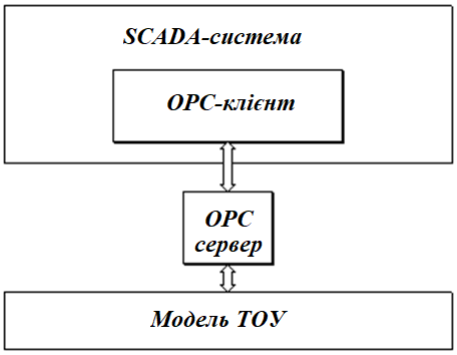


Рис. 1. Структурна схема комплексу для дослідження систем управління

SCADA-система диспетчеризації. За допомогою SCADA-системи диспетчеризації можна здійснювати візуалізацію роботи агрегатів об'єкта управління, архівування будь-яких параметрів, архівування подій, сигналізацію аварій, попереджень і управління технологічним процесом.

OPC-сервер призначений для автоматизованого збору технологічних даних з локальних систем автоматики, подальшої логічної обробки і зберігання зібраних даних з метою надання користувачам та стороннім системам оперативної інформації.

Програмовані логічні контролери (ПЛК) та датчики являють собою нижній, апаратний рівень системи автоматизованого управління, що надає інформацію про поточний стан об'єкта управління.

В роботі в якості датчиків і об'єкта управління виступає імітаційна модель, розроблена в MATLAB / Simulink.

Розробка комплексу виконана для системи регулювання температури методичної печі. Був обраний закон регулювання та розраховані параметри регулятора [4].

Першим етапом у створенні комплексу є налаштування OPC-сервера. Matrikon OPC – вільно розповсюджуваний програмний пакет, який складається з трьох частин: MatrikonOPC Analyzer, MatrikonOPC Explorer, MatrikonOPC Server for Simulation.

Спочатку виконується налаштування MatrikonOPC Server for Simulation. Перед додаванням тегів необхідно створити нову групу змінних (new alias group) – наприклад, ACS_HMI_opc.

В проекті передбачено 6 змінних: X – завдання температури в печі, Y – поточне значення температури в печі, Z – збурення, Kd – коефіцієнт диференційної складової регулятора , Kp – коефіцієнт пропорційної складової регулятора, Ki – коефіцієнт інтегральної складової регулятора (рис. 2).

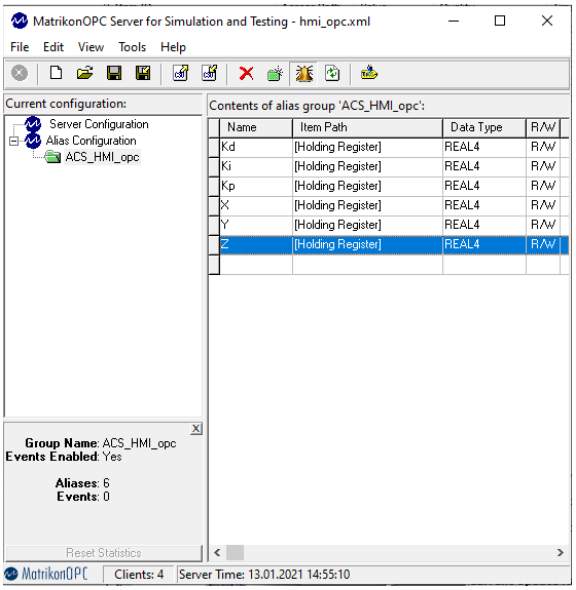


Рис. 2. Змінні проекту

Після додавання всіх змінних треба зберегти поточну конфігурацію в файл.

Далі виконується налаштування MatrikonOPC Explorer (рис. 3).

У лівій частині розташована панель вибору сервера. Можливий вибір сервера як на локальному комп'ютері, так і в локальній мережі або мережі інтернет. Для вибору сервера на локальному комп'ютері на вкладці «Localhost» обирається необхідний сервер. Відбувається підключення до сервера. Тепер можна переглядати і редагувати теги, одержувані від сервера.

Наступним кроком є створення Simulink-моделі методичної печі і налаштування OPC-клієнта в MATLAB.

Бібліотека OPC Toolbox MATLAB/Simulink надає набір інтерфейсів для роботи з OPC-серверами. OPC Toolbox дозволяє зчитувати і записувати дані в OPC-сервер.

Використовуємо MATLAB/Simulink для створення моделі теплового об'єкта. Для отримання перехідної характеристики в реальному часі використовуємо режим симуляції. Для реалізації обміну даними, використовуємо OPC Toolbox пакету Simulink – блоки OPC Configuration, OPC Read та OPCWrite.

Блок OPC Configuration використовується для перегляду та вибору зареєстрованих OPC серверів.

В блоці OPC Read додаємо теги, що будуть зчитані з OPC-сервера. При роботі з MatriconOPC в Simulink теги потрібно прописувати вручну, дотримуючись наступного синтаксису: «Alias

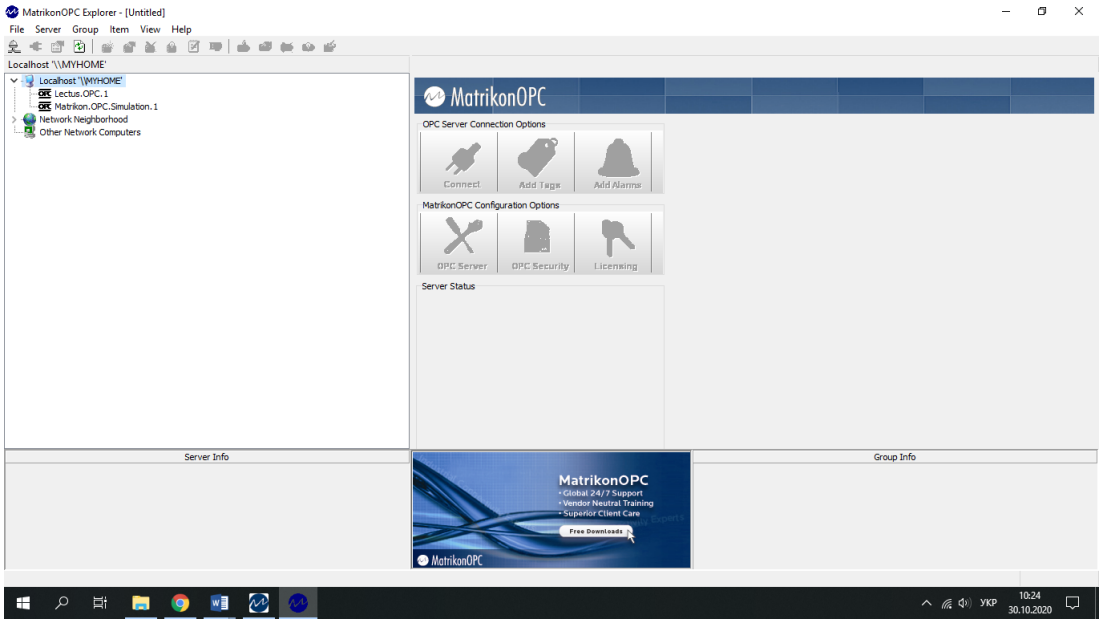


Рис. 3. Головне вікно програми MatrikonOPC Explorer

Group.Alias Name». Тобто назва тега складається з 2 частин – імені групи змінних і імені самої змінної, що задаються в MatrikonOPC Server for Simulation (рис. 4).

Тепер модель може отримувати значення тега з OPC-сервера. Дане значення буде виводитись через вихід «V» блоку OPC Read.

Для передачі даних в OPC сервер будемо використовувати блок OPC Write. Налаштування блоку OPC Write не відрізняється від налаштування блоку OPC Read.

Модель Simulink з доданими блоками OPC Write та OPC Read представлена на рис. 5.

Отже, виставляємо час симуляції і можна запускати модель.

Останній етап – це конфігурування HMI-проекту у SCADA-системі Softlogic S3 [4].

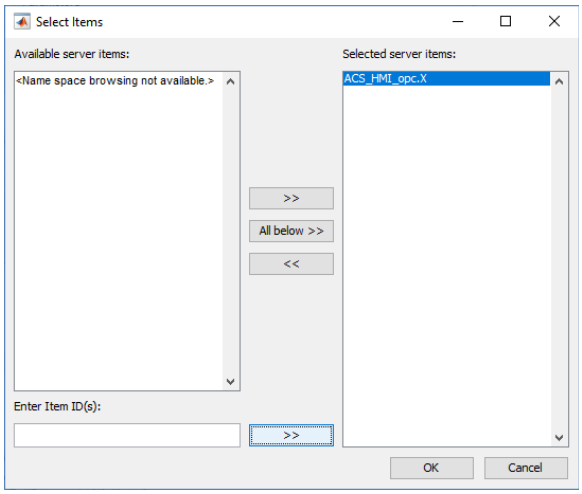


Рис. 4. Додавання тега

S3–проект є кореневим елементом дерева проекту в середовищі S3-IDE і може містити в собі довільну кількість QNX- та HMI-проектів [5].

Основне призначення HMI-проекту – це організація графічного інтерфейсу для доступу до даних системи керування. Також, використовуючи облікові записи HMI-проекту, можливо розділити доступ до даних між різними користувачами.

Головна особливість HMI-проекту S3 – його кросплатформеність, тобто доступ до даних може бути організовано як під Windows, так і під Linux, або під будь-якою операційною системою, для якої існує повноцінна реалізація віртуальної машини Java (Java Runtime Environment).

HMI-проект дозволяє встановлювати зв'язок з іншими (відмінними від S3) проектами й отримувати дані, використовуючи технологію OPC (OLE for Process Controll). Ці дані доступні у вигляді змінних HMI-проекту й можуть бути використані для відображення на мнемосхемах.

Дерево створеного HMI-проекту буде виглядати, як показано на рис. 6.

Далі необхідно додати OPC-сервер у проект.

Зауважимо, що саме клієнтська частина для доступу до OPC-серверів реалізована в HMI-проекті. У якості OPC-сервера може бути використаний будь-який OPC-сервер, що задовольняє специфікації «OPC Data Access Custom Interface Specification 2.05A» (OPC DA версії 2.05a).

Для підключення OPC-сервера необхідно налаштувати доступ через DCOM, незалежно від того, де розташований OPC-сервер: на одному вузлі з HMI-проектом (локальному вузлі) або на вузлі,

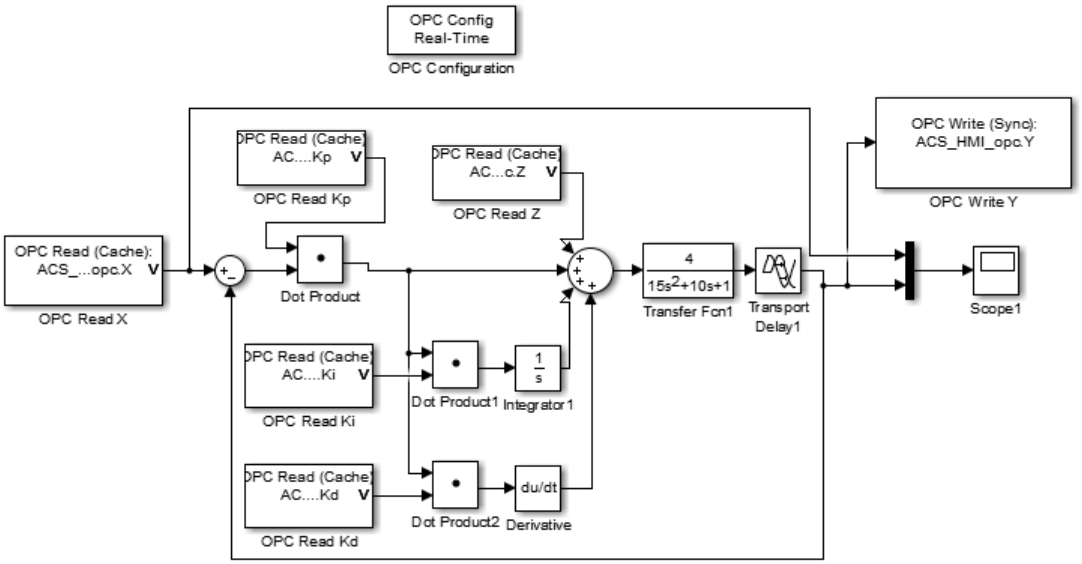


Рис. 5. Модель у пакеті Simulink

пов'язаному з HMI-проектом по SMB протоколу (віддаленому вузлі).

Налагодження та підключення OPC-сервера складається з наступних етапів:

– налаштування DCOM;
– конфігурація OPC сервера;
– конфігурація тегів;
– призначення тегів змінним HMI-проекту.

Додаємо OPC сервер у проект. Після пошуку на локальному вузлі доступних OPC серверів обираємо необхідний, а саме Matrikon.OPC.Simulation.1 (рис. 7).

Після того як параметри OPC-сервера описані, переходимо до конфігурації тегів.

Таблиця тегів може бути викликана з спливаючого меню OPC-сервера. Спливаюче меню таблиці тегів дозволяє додавати, видаляти і редагувати властивості тегів.

В роботі три теги, що відповідають за завдання заданного значення температури та параметрів ПІД-регулятора, мають напрямок OUT. Вони будуть задаватися з HMI-проекту та передаватися у модель системи керування технологічним процесом, що реалізовано у MATLAB/Simulink. Один тег має напрямок IN. Він є вхідним у HMI-проект з моделі у MATLAB/Simulink (рис. 8).

Створимо потрібні нам змінні. Вони мають прив'язку не до каналу драйвера, а до певних входів/виходів моделі АСР температури.

Проект буде містити 6 аналогових змінних, що відповідають внутрішнім і зовнішнім діям у системі регулювання температури та параметрам пристрою управління: Kp, Ki, Kd, x, y, z.

Всі змінні в нашому проекті є локальними (внутрішніми) й будуть знаходитись в гілці контролера Temperature_control_system. Таблицю змінних приведено на рис. 9.

Операторський пульт в HMI-проекті (рис. 10) містить: поля для введення (заданого значення температури в печі Тзад й настроювальних пара-

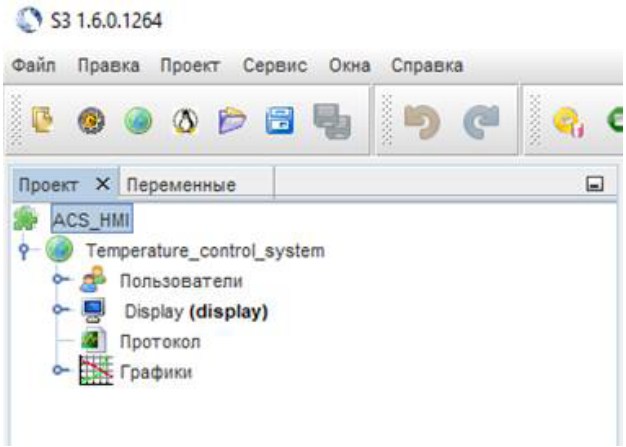


Рис. 6. S3-проект з HMI-проектом

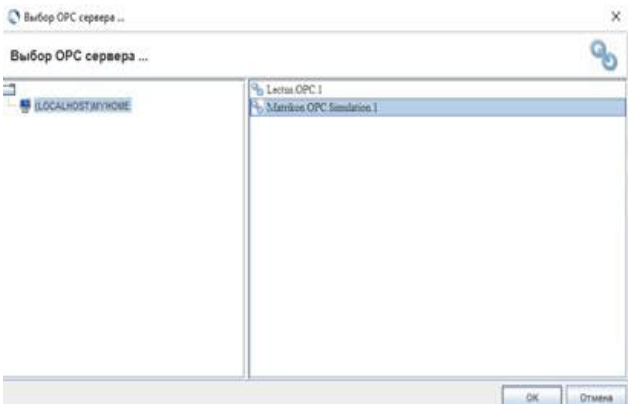


Рис. 7. Пошук доступних OPC серверів

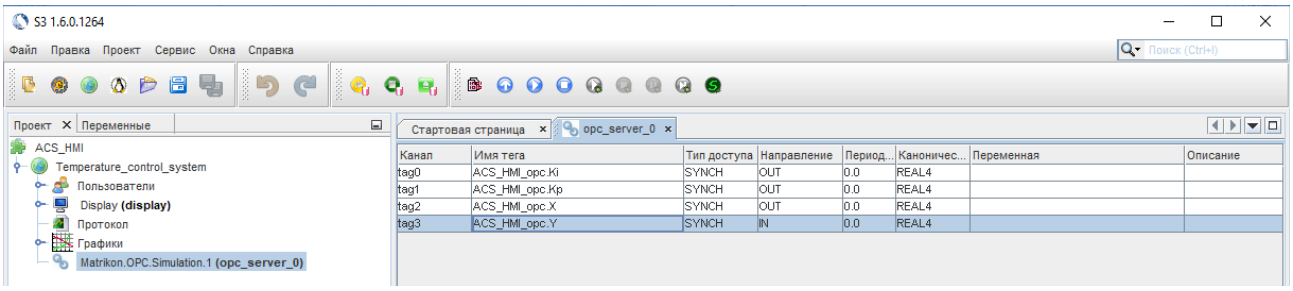


Рис. 8. Процес додавання тегів

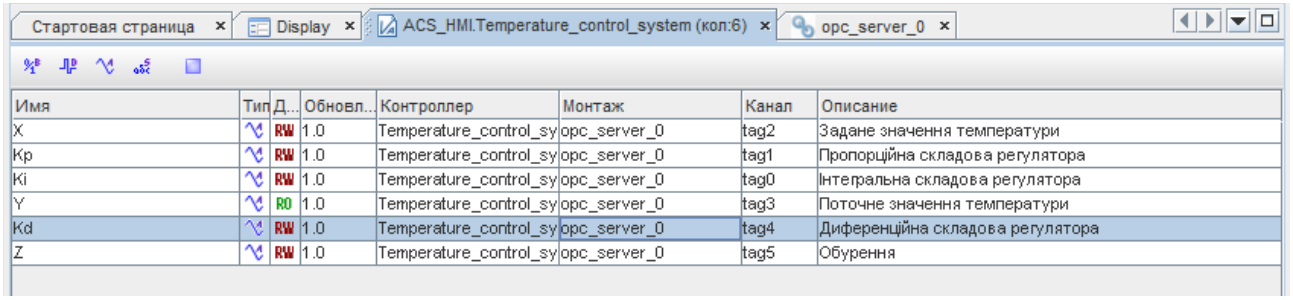


Рис. 9. Таблиця змінних

метрів регулятора Kp, Ki, Kd), поле для виведення поточного значення температури, а також поле графік, що необхідний для відображення графіку зміни температури.

Всі компоненти операторського пульту прив'яжемо до потрібних змінних.

Після того, як організовано процеси відображення в проекті S3-IDE і проведено компіляцію проекту, його можна запускати.

Операторський пульт в HMI-проекті (рис. 10) містить: поля для введення (заданого значення температури в печі Тзад й настроювальних параметрів регулятора Kp, Ki, Kd), поле для виведення поточного значення температури, а також поле графік, що необхідний для відображення графіку зміни температури.

Всі компоненти операторського пульту прив'яжемо до потрібних змінних.

Після того, як організовано процеси відображення в проекті S3-IDE і проведено компіляцію проекту, його можна запускати.

Для того, щоб система коректно працювала, необхідно витримувати чітку послідовність дій при запуску комплексу. Спочатку необхідно впевнитись, що запущено OPC-сервер, потім встановити у Simulink час моделювання і запустити

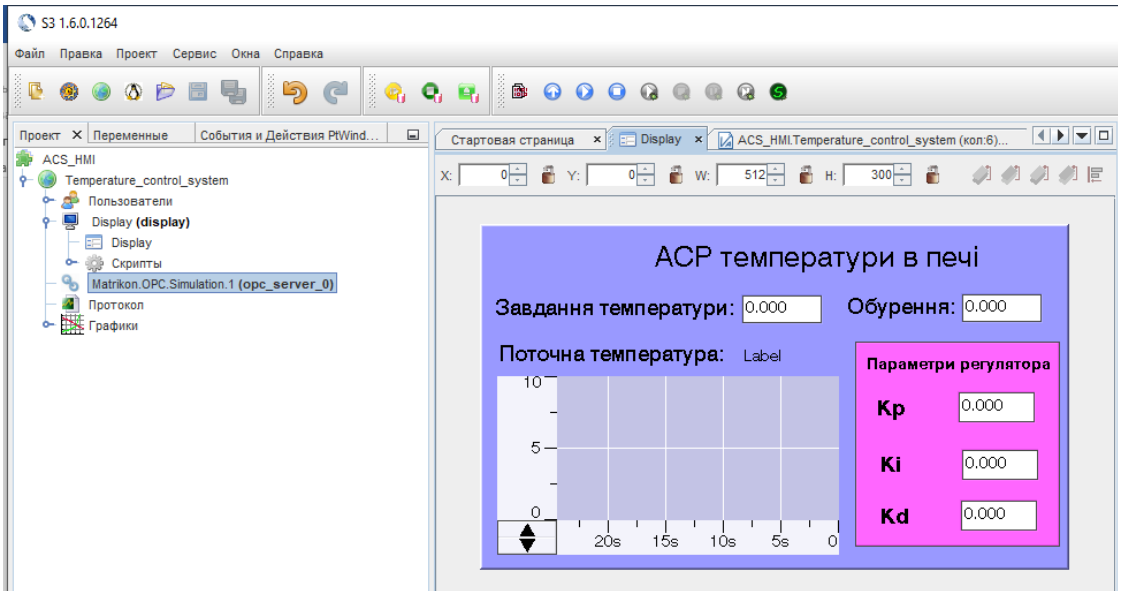


Рис. 10. Операторський пульт

Simulink-модель. Далі треба повернутися до операторського інтерфейсу і запустити проект на виконання. Перш за все необхідно ввести задане значення параметра, що регулюється. А також ввести значення параметрів регулятора.

Вікно Simulink буде мати вигляд, як на рис.11. Запущений проект S3 представлений на рис. 12, а загальне вікно MatrikonOPC Explorer на рис. 13.

Як видно з графіка отриманого перехідного процесу перерегулювання не перевищує 5%, час регулювання 60 с, статична помилка дорівнює 0. При стрибкоподібній зміні збурювання, наведеного до входу об'єкта (10% хода виконавчого

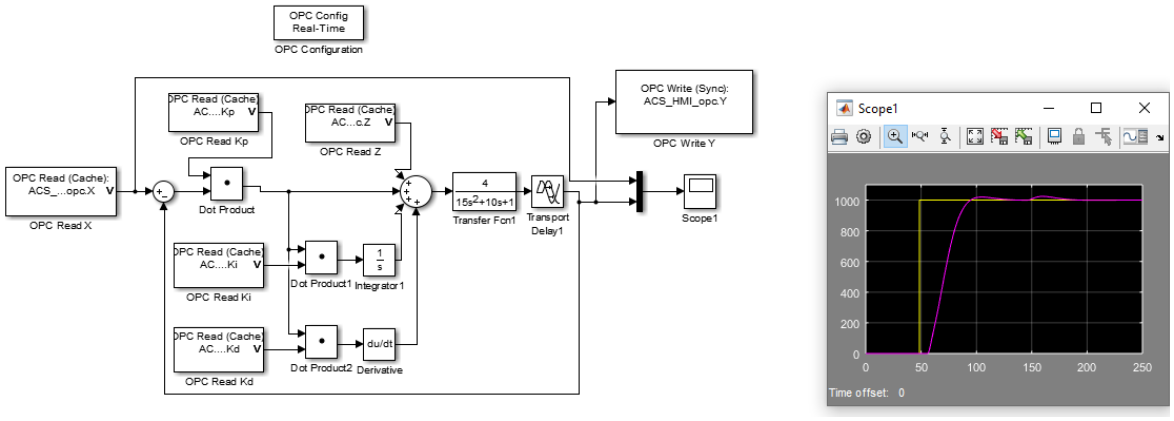


Рис. 11. Запущений процес моделювання у Simulink



Рис. 12. Запущений S3-проект

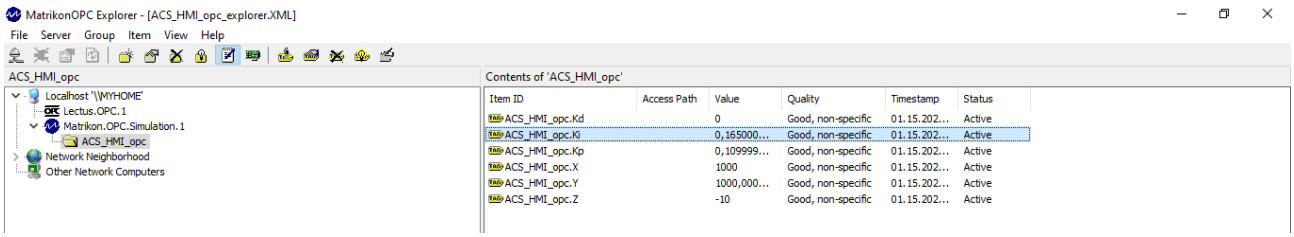


Рис. 13. Загальне вікно MatrikonOPC Explorer

механізму), графік перехідного процесу – аперіодичний, динамічне відхилення – 20 ^{0}C.

Висновки. Розроблений комплекс дозволяє здобути навички щодо налаштування та підтримки АСУ різноманітних рівнів. Окрім того, система дозволяє вносити зміни не лише до регулятора, а і змінювати сам об'єкт, що суттєво розширює можливості. Оскільки система може працювати з моделлю, а не тільки з реальним об'єктом, систему можна використовувати для моделювання позаштатних ситуацій, і відповідно оцінювати дії оператора в даних ситуаціях. Оскільки всі дії відбуваються в контрольованому середовищі без ризику для життя і здоров'я, а також без фінансових витрат, такий комплекс-тренажер допомагає виробляти певні навички у персоналу.

Список літератури:

1. Рыбалев А. Н. Разработка и эмулирование АСУ ТП с использованием программ разных производителей и типов/ А. Н. Рыбалев, Ф. А. Николаец. *Вестник АмГУ.* Вып. 65, 2014. С. 73–82.

2. Р. Ахметсафин, Р. Ахметсафина, Ю. Курсов. Разработка тренажеров и отладка проектов АСУ ТП на базе пакетов MMI/SCADA. *Современные технологии автоматизации*. № 3, 1998. С. 37–41.

3. С.В. Бейцун. Основи комп'ютерно-інтегрованого управління: Конспект лекцій та методичні вказівки до індивідуального завдання. Днепропетровск : НМетАУ, 2009. 45с.

4. О.П. Єгоров, М.О. Рибальченко, І.О. Маначин. Цифрові методи дослідження та розрахунку регуляторів в системах автоматичного керування : навчальний посібник. Дніпро : УДУНТ, 2022 .122 с

5. Тригуб И.Г., Радченко В.П., Меледин Н.В. Программирование систем реального времени. Проектирование автоматизированных систем управления в SCADA/SoftLogic S3 : учебное пособие. Днепропетровск : НМетАУ, 2012. 105 с.

Rybalchenko M.O., Manachyn I.O., Potap O.Yu., Shybakinskyi V.I. DEVELOPMENT OF A COMPLEX FOR RESEARCH OF CONTROL SYSTEMS BASED ON SCADA SYSTEM AND APPLIED VISUAL MODELING PACKAGE

The development of ACS of modern technological processes is a complex and responsible task, the solution of which is carried out in several stages: from the development of a mathematical model to the design of a human-machine interface. The complex, which would include both a mathematical model and a human-machine interface, would make it possible to carry out simulation modeling of the technological process in various modes of operation under the effects that are programmed by means of the human-machine interface, as well as to make a choice of the most user-friendly means of visualization of the technological process and ways of forming governing influences.

The article developed a complex for studying and researching the technological process management system. It allows you to demonstrate the main capabilities of SCADA systems; transfer data from the mathematical modeling software package to the SCADA system and vice versa; quickly calculate the received data; work in real time. The Softlogic S3 SCADA package was selected as the SCADA package, which is a Ukrainian product (RTS-Ukraine LLC) and has full support for OPC technology. MATLAB / Simulink is chosen as a visual modeling package. Matrikon OPC server is selected as OPC server. The development of the complex was carried out for the temperature control system of the methodical furnace.

Using this simulator complex, you can acquire skills in setting up and maintaining ACS of various levels. In addition, the system allows you to make changes not only to the regulator, but also to change the object itself, which significantly expands the possibilities. Since the system can work with a model, and not only with a real object, the system can be used to simulate off-duty situations, and accordingly evaluate the actions of the operator in these situations.

Key words: *complex, simulator, SCADA, simulation, server, OPC, simulation, research.*

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 536.24:621.184.4: 621.184.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/22

Абдулін М.З.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шелешей Т.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Беднарська І.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Будя Ю.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

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

ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КОТЛОАГРЕГАТІВ КВГМ 100 ШЛЯХОМ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ

Головними напрямками розвитку теплової енергетики не лише в Україні, а й у світі є: зменшення негативного впливу на навколишнє середовище шляхом удосконалення, модернізації фільтрів та золоуловлювальних установок; підвищення ефективності циклів паротурбінних установок; розвиток котельних агрегатів; удосконаленння схем енергоблоків; впровадження когенераційних систем; підвищення рівня автоматизації технологічних процесів; удосконалення додаткового обладнення ТЕС. Під час спалювання вугілля та мазуту в атмосферу виділяються зола із частин ками неспаленого палива, сірчистий і сірчаний ангідриди SO_2 і SO_3, оксиди азоту NO і NO_2, деяка кількість фтористих сполук та гідрокарбонати, а також газоподібні продукти неповного згорання. Природний газ в екологічному плані є найчистішим видом палива. Проте і під час добре організованого спалювання природного газу утворюються шкідливі речовини: діоксид вуглецю CO_2, оксиди азоту.

Менший об`єм вихорів дозволяє проводити пуск та експлуатацію ПП з меншою витратою палива, що забезпечує безпечність пуску та відсутність теплових ударів. Покращення сумішоутворюючих властивостей пальників підвищує надійність роботи при достатньо малому коефіцієнті надлишкового повітря, як наслідок, при підвищених значеннях середньої температури факелу в топковому просторі.

При дослідженні ККД за прямим балансом було обраховано, що приріст становить 1,5 % на навантаженнях 30% від номінального і близько 5% при умові його роботи в режимах (60-65%) від номінального. Дані результати свідчать про зниження питомої витрати палива. Окрім того використання комплексу, який складається з пальників зі струменево-нішевою технологією та встановлення частотними перетворювачами на дуттєвих механізмах дає можливість вельми зменшити споживання електроенергії. Також слід зауважити, що в підсумку модернізації поліпшились експлуатаційні показники котлоагрегату, такі як: незагрозливе плинне запалення, плинна переміна експлуатаційних навантажень, збагачений обсяг коригування робочих навантажень, підвищення ступеня безпеки роботи котлоагрегату.

На техніко-економічні та екологічні показники котла КВГМ впливає безліч різних показників в тому числі і температура вихідних газів. Під час проведення дослідження було встановлено, що температура вихідних газів впливає на низку параметрів, таких як: коефіцієнт корисної дії котла, питома витрата теплоти, втрата теплоти з відхідними газами, показники емісії оксидів азоту та вуглецю.

Ключові слова: *екологічні проблеми енергетики, шкідливі викиди, технології спалювання, Струменево-нишова технологія, котлоагрегат.*

Постановка проблеми. Не можливо уявити собі розвиток будь якої країни без розвитку її енергетики. Адже на протязі всієї історії людства відбувався й розвиток її здібності використовувати сили природи. На початку часів люди навчились використовувати силу тварин – віл, кінь, бик і тд. Пізніше підкорили собі силу вітру – перші вітряки та млини, та води – водяне колесо. Згодом стало зрозуміло, що вітер та вода це не все, що дарує нам матінка природа. Вугілля та нафта – стали основним паливом промислової революції 18 та 19 століть. За допомогою зусиль багатьох вчених людство відкрило для себе силу пари та її потенціал в енергетиці. На початку 20 століття головними видами палива було органічне палива: вугілля, торф, нафта, природний газ і тд. Наступним етапом стало підкорення енергії атомного ядра, на жаль, не тільки в мирних цілях. Однак перший атомний реактор, що був запущений в США 1951 року став новою сходинкою в розвитку енергетики. Зараз, вже у 21 столітті і досі триває цей розвиток. Будуються реактори на основі термоядерного синтезу, обговорюються шляхи розгортання сонячних панелей у космосі – прогрес не стоїть на місці і надалі він буде тільки пришвидшуватись [1].

Кожний історичний етап розвитку науки і техніки ставить перед ученими та інженерами багато проблем. Одна з основних проблем сучасності і найближчого майбутнього – забезпечення людства достатньою кількістю енергії. Проблема ця досить гостра, тому що має не тільки суто технічний характер. Слова енергія та енергетична криза щодня вимовляють з екранів телевізорів, не сходять зі сторінок журналів і газет, не кажучи вже про спеціальні видання. Енергетична ситуація в окремих державах істотно впливає на життєвий рівень і культуру населення, позначається на внутрішній і зовнішній політиці. Країни без ПЕР докладають великих зусиль, щоб забезпечити себе потрібними джерелами енергії. Країни – експортери нафти, нафтові монополії одержують величезні прибутки і надприбутки. З другого боку, інші країни виношують політичні і військові плани перерозподілу та збереження нафтових і газових промислів [1–2].

Україна, завдяки географії, має доволі вигідне розташування не тільки в плані економіки, але й енергетики. Адже має кілька великих річок на яких побудовані ГЕС – гідроелектростанції. Велику степову зону для освоєння вітрової та сонячної енергетики. Значні поклади вугілля та природного газу. Певні поклади газу також знайдені на дні шельфу Чорного Моря. Задовільні запаси уранових руд.

Вся енергетична галузь України об'єднана в ОЕС – Об'єднану Енергетичну систему. Вона налічує 8 ГЕС та 3 гідроакумулюючих гідроелектростаній (ГАЕС), 4 діючі атомні станції, 15 теплових електростанцій, 43 ТЕЦ – теплоелектроцентралей, багато сонячних електростанцій (зокрема і друга найбільша СЕС у Нікопольському районі Дніпровської області) та безліч вітрових станцій ВЕС. Однак все ж найбільшого поширення набули саме теплові електростанції.

Теплова електрична станція (ТЕС) – електростанція, яка використовує хімічну енергію органічного палива (вугілля, торф, мазут, природний газ і тд) для підігріву робочого тіла (найчастіше вода) в топці котла, доведення до станупари із певними параметрами та використання її кінетичного енергії для розвитку крутного моменту турбіни. Крутний момент ротора турбіни передається статору генератора, де виробляється електричний струм за допомогою явища електромагнітної індукції. Можна виділити два типи ТЕС: КЕС – конденсаційна електростанція, яка відпускає споживачу лише електричну енергію; ТЕЦ – теплоелектроцентраль, що крім електричної відпускає споживачу і теплову (у вигляді гарячої води або пари). В Україні найпоширенішими є саме ТЕЦ. Найчастіше їх будуть на межі великих міст чи на окраїні аби дотриматись усіх норм.Під час спалювання палива у топці котла виділяється велика кількість тепла, що в свою чергу передається теплоносію (найчастіше це підготовлена вода). За рахунок чого вода перетворюється на пару і далі потрапляє в турбоагрегат, де енерія пари перетворюється на кінетичну енергію обертання ротора турбіни. Після чого кінетична енергія ротора передається статору електрогенератора, де ця енергія перетворюється в електричну. Відпрацьована пара потрапляє до конденсатора, де конденсується у воду та готується до нового циклу. Як було наведено вище, для спалювання в топці котла

на теплових станціях використовується органічне паливо, що в свою чергу створює ряд певних проблем: велика енергозалежність від енергоресурсів; шкідливий вплив на екологію.

Формулювання цілей статті. Тому головними напрямками розвитку теплової енергетики не лише в Україні, а й у світі є: зменшення негативного впливу на навколишнє середовище шляхом удосконалення, модернізації фільтрів та золоуловлювальних установок; підвищення ефективності циклів паротурбінних установок; розвиток котельних агрегатів; удосконаленння схем енергоблоків; впровадження когенераційних систем; підвищення рівння автоматизації технологічних процесів; удосконалення додаткового обладнення ТЕС [3, 5].

Основними причинами, що призводять до катастрофічного стану довкілля є: використання низькосортного палива; застаріла технологія виробництва та обладнання; висока енерго- та матеріаломісткість; високий рівень концентрації промислових об'єктів; несприятлива структура промислового виробництва з високою концентрацією екологічно небезпечних технологій виробництва; відсутність належних природоохоронних систем (очисних споруд, оборотних систем водозабезпечення тощо) та низький рівень експлуатації існуючих природоохоронних об'єктів; відсутність належного правового та економічного механізмів, які стимулювали б розвиток екологічно безпечних технологій та природоохоронних систем; відсутність належного контролю за охороною довкілля [4].

Під час спалювання вугілля в атмосферу виділяються зола із частин ками неспаленого палива, сірчистий і сірчаний ангідриди SO_2 і SO_3, оксиди азоту NO і NO_2, деяка кількість фтористих сполук та гідрокарбонати, а також газоподібні продукти неповного згорання. Летка зола іноді містить, крім нетоксичних складових, шкідливі домішки. Так, в золі донецьких антрацитів у незначній кількості міститься арсен, а в золі екібастузького вугілля і деяких інших родовищ – вільний діоксид кремнію, у золі сланців і вугілля Кансько-Ачинського басейну – вільний діоксид кальцію [3, 5].

У процесі спалювання мазуту в атмосферне повітря з димом і газами надходять: сірчистий і сірчаний ангідриди SO_2 і SO_3, оксиди азоту (NO і NO_2, газоподібні і тверді продукти неповного згорання палива, сполуки ванадію, солей натрію, а також речовини, які видаляють з поверхні котлів під час їх очищення.

Природний газ в екологічному плані є найчистішим видом палива. Проте і під час добре організованого спалювання природного газу утворюються шкідливі речовини: діоксид вуглецю CO_2, оксиди азоту. Еволюція не терпить застою. Розвиток цивілізації неможливо уявити без зростання споживання енергії та енергоресурсів. І все ж тут можливі підходи як загального (глобального), так і місцевого (локального) плану.

Виклад основного матеріалу. У глобальному плані – це регулювання виробництва енергії і зростання споживання енергоресурсів на державному і міжнародному рівні; перехід на нові, екологічно чисті й енергоощадні технології виробництва енергії; перегляд ставлення до процесу енергоспоживання, до визнаних людських цінностей, укладу життя як окремої людини, так і людства загалом. Реалізація зазначених процесів потребує розробки довгострокових державних програм, розрахованих на багато десятків років. Паралельно з визначеним вище, щоб знизити вплив енергетики на біосферу, треба розглядати такі заходи, які вже сьогодні можуть дати істотну віддачу. Так, знизити викиди шкідливих речовин енергетичними об'єктами можна подальшим заміщенням мазуту природним газом, удосконаленням пальникових пристроїв, організацією багатоступеневого спалювання палива, застосуванням прогресивних способів очищення палива від сірки, підвищенням ефективності виробництва теплової та електричної енергії, дотриманням спеціальних режимів спалювання палива, застосуванням сучасних технологій очищення димових газів від SO_2 та NOx та іншими заходами, включаючи створення і впровадження тарифної і цінової політики, що стимулює розробку і впровадження екологічно чистих технологій і устаткування.

Велику роль у згладжуванні енергетичної проблеми і підвищенні життєвого добробуту населення відіграє енергозбереження – один з пріоритетних напрямів сучасної енергетичної політики. Так, економія 1 т вугілля зменшує викиди золи на 250 кг, оксидів сірки – приблизно на 2 кг, оксидів азоту – на 3 кг, оксиду вуглецю – на 10 кг; економія 1 т мазуту скорочує викиди сірчистого ангідриду на 40 кг, оксиду вуглецю – на 12 кг; економія 1 000 $м^3$ природного газу зменшує викиди оксиду азоту на 2,5 кг, оксиду вуглецю – на 8 кг. У результаті підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів за рахунок термодинамічних факторів можливе істотне зниження питомої витрати палива на виробництво 1 кВт-год електроенергії, що підвищує екологічну безпеку енергетичних об'єктів. Ще актуальнішим є розвиток і використання відновлюваних джерел

енергії. Останнє особливо важливо в контексті заходів, вжитих міжнародним співтовариством щодо зниження дії «парникового ефекту», і виконання інших зобов'язань, пов'язаних із можливою зміною клімату Землі [6].

Яскравим прикладом модернізації являється струменево-нішова технологія спалювання палива. Струменево-нішова технологія (СНТ) спалювання палива з керуючою структурою течії горючого й окислювача заснована на рівномірній роздачі газу в потоці повітря без застосування закрутки потоку й утворення стійкої вихрової структури, яка забезпечує сумішоутворення та стабілізацію горіння з самоохолодженням пальникового модулю.

В струменево-нішовій системі в широких межах зміни режимних факторів (швидкість газу, повітря, тиск та температура) реалізуються стійкі та легкокеровані вихрові структури з високою інтенсивністю турбулентності потоків пального та окиснювача, а також зони зворотних струмів, які забезпечують якісне сумішоутворення з необхідним рівнем пальної концентрації та надійну аеродинамічну стабілізацію горіння. Об`єм вихорів значно менший, ніж у звичайних пальникових приладів вихрового типу, тому їх вплив на пульсації в топці котла, а також ерозійний вплив на амбразуру та інші елементи котла відносно малий [7].

Менший об`єм вихорів дозволяє проводити пуск та експлуатацію ПП з меншою витратою палива, що забезпечує безпечність пуску та відсутність теплових ударів. Покращення сумішоутворюючих властивостей пальників підвищує надійність роботи при достатньо малому коефіцієнті надлишкового повітря, як наслідок, при підвищених значеннях середньої температури факелу в топковому просторі.

За допомогою СНТ вдалося вирішити багато супутніх задач: ліквідовані вібраційні явища на різних котлах за рахунок упорядкування аеродинаміки протікання, забезпечилось стійке виробництво теплової енергії (що дало суттєвий соціальний ефект) і т. д. Для всіх представлених досліджень в якості експериментальної установки використовувався котлоагрегат типу КВГМ-100 та враховувались його характеристики.

При дослідженні ККД за прямим балансом було обраховано, що приріст котлоагрегату становить 1,5 % на навантаженнях 30% від номінального і близько 5% при умові його роботи в режимах (60–65%) від номінального. Дані результати свідчать про зниження питомої витрати деякого палива близько 4–10 г/Гкал за різних навантаженнях.

Окрім низки теплотехнічних показників під час дослідів визначався вплив пальників на навколишнє середовище. Вміст двоокису вуглецю, кисню та значення коефіцієнту надлишку повітря та значення викидів шкідливих речовин, які забруднюють навколишнє середовище. Всі вище вказані дослідження проводились за допомоги експрес методу прямими замірами. Вміст оксидів азоту та вуглецю в димових газах в залежності від навантаження котла КВГМ-100 до та після модернізації за допомогою пальників струменево-нішевої технологіїї представлена на рисунках 1–2.

За відомостями режимної карти до та після модернізації котла на основі СНТ дала можливість понизити питому витрату палива на виробіток Гкал тепла порядку 4,58%. Заощадження палива в режимі роботи 92,7 ККД (значення навантаження 47 Гкал/год) становить 3,03%, за умови роботи 89,8 ККД (значення навантаження 74 Гкал/год) становить 6,11%. Після проведення модернізації ККД котлоагрегату по всього обсязі навантажень різниться на 0,43%, а до проведення модернізації обсяг відхилень становив 4,6%.

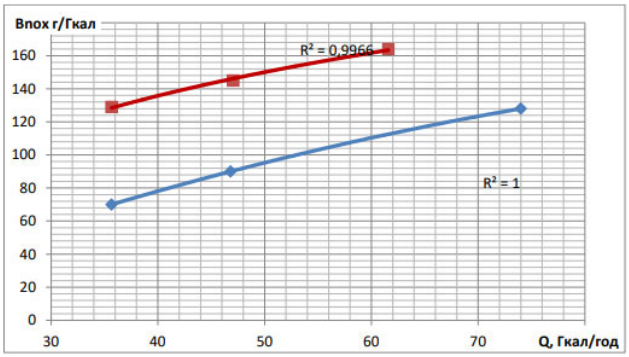


Рис. 1. Вміст оксидів азоту в димових газах в залежності від навантаження котла КВГМ-100 до та після модернізації за допомогою пальників струменево-нішевої технології

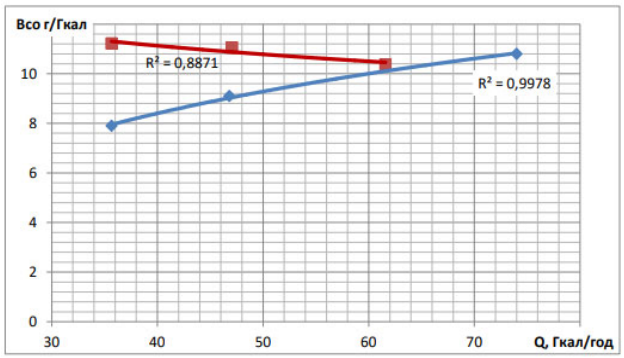


Рис. 2. Вміст оксидів вуглецю в димових газах в залежності від навантаження котла КВГМ-100 до та після модернізації за допомогою пальників струменево-нішевої технології

Окрім того використання комплексу, який складається з пальників зі струменево-нішевою технологією та встановлення частотними перетворювачами на дутьєвих механізмах дає можливість вельми зменшити споживання електроенергії. Також слід зауважити, що в підсумку модернізації поліпшились експлуатаційні показники котлоагрегату, такі як: незагрозливе плинне запалення, плинна переміна експлуатаційних навантажень, збагачений обсяг коригування робочих навантажень, підвищення ступеня безпеки роботи котлоагрегату. З приростом температури відхідних газів на кожен 1 ºС витрати теплоти з відхідними газами зростають на 0,023% до моменту модернізації, а вже після модернізації цей показник становить 0,04%. Але встановлено, що рівень втрат з відхідними газами до модернізації набагато вищий ніж після неї.

Висновки. Використання ефективної технології спалювання на котлоагрегатах КВГМ-100 показує покращення економічних та екологічних показників котельних агрегатів на всіх режимах його роботи, а саме: приріст ККД, зменшення питомої витрати умовного палива; зменшення витрати природного газу; зменшення витрати охолоджуючої води на пароохолоджувачі, зменшення рівня емісій оксидів азоту і вуглецю.

Список літератури:

1. Національний план скорочення викидів від великих електростанцій від 08.11.2017 № 796-р. Київ. Розпорядження Кабінету Міністрів України. С. 99.

2. Шелешей, Т., Беднарська, І., Майєр, Л., Юрчук, В. Порівняльний аналіз рівня емісії оксидів азоту при спалюванні антрацитового штибуна різних енергетичних установках. Молодий вчений. 2020. № 5 (81), С. 129-132.

3. Волчин І. А., Гапоніч Л. С., Згоран І. П. Вибір технології десульфурації димових газів для українських вугільних ТЕС. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2018. Т. 24. № 4. С. 154–168.

4. Zhang, G.; Huang, X.; Liao, W.; Kang, S.; Ren, M.; Jing Hai, J. Measurement of dioxin emissions from a small-scale waste incinerator in the absence of air pollution controls. Int. J. Environ. Res. Public Health 2019, 16, 1267.

5. Абдулин М. З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. Научно-технический журнал «Новости теплоснабжения». 2005. С. 37-38.

6. Абдулин, М. З., Г. Р. Дворцин, and А. М. Жученко. Технология сжигания–определяющий фактор эффективности огнетехнических объектов. Научно-технический журнал «Новости теплоснабжения». М 4 (2008): 31-34.

7. М.З. Абдулін, Т.В. Шелешей, А.А. Куник. Аналіз впливу топкового режиму на температуру відхідних газів в котлоагрегатах при їх модернізації на основі струменево-нішевої технології. Modern Scientific Researches. Yolnat PE, Minsk, Belarus, 2020. Issue № 11. Part 2 – С. 43-51.

Abdulin M.Z., Sheleshei T.V., Bednarska I.S., Budia Yu.S., Yurchuk V.S. IMPROVEMENT OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF KVGM 100 BOILER UNITS BY MODERNIZATION OF BURNER DEVICES

The main directions of thermal energy development not only in Ukraine, but also in the world are: reducing the negative impact on the environment by improving and modernizing filters and ash collection units; increasing the efficiency of cycles of steam turbine installations; development of boiler units; improvement of schemes of power units; introduction of cogeneration systems; increasing the level of automation of technological processes; improvement of additional TPP equipment. During the burning of coal and fuel oil, ash from particles of unburned fuel, sulfurous and sulfurous anhydrides SO_2 and SO_3, nitrogen oxides NO and NO_2, a certain amount of fluorine compounds and hydrocarbons, as well as gaseous products of incomplete combustion are released into the atmosphere. Natural gas is ecologically the cleanest type of fuel. However, even during the well-organized combustion of natural gas, harmful substances are formed: carbon dioxide CO_2, nitrogen oxides.

Smaller volume of vortices allows starting and operation of PP with lower fuel consumption, which ensures safety of starting and absence of thermal shocks. The improvement of the mixture-forming properties of the burners increases the reliability of operation with a sufficiently small coefficient of excess air, as a result, with increased values of the average temperature of the torch in the furnace space.

During the study of the efficiency of the direct balance, it was calculated that the increase of the boiler unit is 1.5% at loads 30% of the nominal and about 5% under the condition of its operation in modes (60-65%) of the nominal. In addition, the use of a complex consisting of burners with jet-niche technology and installation of frequency converters on essential mechanisms makes it possible to greatly reduce electricity consumption.

It should also be noted that as a result of the modernization, the operational indicators of the boiler unit have improved, such as: non-threatening fluid ignition, smooth change of operating loads, enriched volume of adjustment of working loads, increase in the degree of safety of the boiler unit.

Many different indicators, including the temperature of the outgoing gases, affect the technical, economic and environmental indicators of the KVGM boiler. During the research, it was established that the temperature of the outgoing gases affects a number of parameters, such as: the efficiency of the boiler, specific heat consumption, heat loss with the exhaust gases, emission indicators of nitrogen and carbon oxides.

Key words: *environmental problems of energy, harmful emissions, combustion technologies, Jet-niche technology, boiler unit*

УДК 662.995:662.997
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/23

Бєляновська О.А.
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Сухий К.М.
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Пустовой Г.М.
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Єрьомін О.О.
Національна металургійна академія України

Сухий М.К.
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Фролова Л.А.
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

КРИТЕРІЇ ПІДБОРУ РОБОЧИХ ПАР ДЛЯ АДСОРБЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Встановлено загальні принципи та розроблено алгоритм підбору робочих пар «адсорбент – хладоагент» для адсорбційних холодильних установок. Визначено основні вимоги до адсорбентів та хладоагентів. Порівняно основні переваги та недоліки хладоагентів – води, метанолу, етанолу та аміаку та проаналізовано границі їх застосування, які визначаються температурою охолоджуваного середовища, яку необхідно підтримувати. Обґрунтовано основні критерії підбору робочих пар: вид та потенціал джерела теплоти для регенерації адсорбента, наявність контакту людини, адсорбента та адсорбата при експлуатації адсорбційної холодильної установки, обмежує температуру регенерації адсорбента до 90°С та визначає необхідність використання нетоксичних речовин в якості хладоагентів. Показано, що іншим ключовим напрямком при підборі робочих пар для адсорбційних холодильних установок є холодопродуктивність та адсорбційна ємність адсорбента, яка визначає масу та об'єм адсорбента, які необхідні для забезпечення необхідної холодопродуктивності, що визначає габаритні розміри адсорбера. Показано основні переваги та недоліки основних хладоагентів. Показано основні переваги використання композитів «сіль в поринній матриці» в порівнянні з традиційними адсорбційними середовищами.

Ключові слова: *адсорбційна холодильна установка, гранична адсорбція, хладоагент, композитний адсорбент.*

Постановка проблеми. Парові компресорні холодильні установки та системи кондиціонування залишаються одними з найбільш серйозних енергоспоживачів [1, с. 147–154]. Альтернативою цим пристроям є адсорбційні холодильні установки, які є перспективними для охолодження, виробництва льоду та автоматичного кондиціонування, збереження ліків та харчових продуктів в віддалених районах [2, с. 105–315]. До переваг адсорбційних холодильних установок відносяться відсутність рухомих частей, стійкість до вібрацій, широкий вибір адсорбентів, невелика вартість, простота конструкції системи та експлуатації. До недоліків та обмежень даних пристроїв слід віднести значні габаритні розміри та низьку пропускну здатність при їх експлуатації. Ключевим фактором, який визначає експлуатаційні характеристики подібних пристроїв є робоча пара «адсорбент – адсорбат».

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Адсорбційна холодильна установка включає наряду з холодильною камерою, випарником та конденсатором, адсорбер заповнений адорбентом, який поглинає адсорбат, тобто робочу речовину, в результаті випаровування якої відбувається відведення теплоти від охолоджуваного середовища,

та пристрій для підведення теплоти до адсорбенту при його регенерації, наприклад, сонячний колектор [3, с. 165–171]. Робота здійснюється в два етапи: отримання холоду та регенерація адсорбенту.

В якості робочих пар в адсорбційних холодильних установках використовують активоване вугілля, цеолітові молекулярні сита та силікагелі. В останніх в якості адсорбата використовують переважно воду. Також використовують сверхактивоване вугілля та волокно з активованого вугілля [2, с. 105–315], а в якості хладоагента використовують етанол або метанол. Swaraj Kumar B. та ін. [4] запропонували методику підбору термохімічного матеріалу для гібридной системи акумулювання теплової енергії. Було б доцільно запропонувати оцінити ефективність робочих пар для адсорбційних холодильних установок.

Мета роботи – розробити алгоритм підбору робочих пар для адсорбційних холодильних установок. Для досягнення даної мети поставлені наступні задачі:

– визначити основні вимоги до робочих рідин – хладоагентів;

– порівняти основні переваги та недоліки хладоагентів;

– визначити основні вимоги до адсорбентів;

– встановити основні фактори, які впливають на вибір адсорбента.

Виклад основного матеріалу дослідження. Першим кроком при підборі робочих пар є встановлення робочої речовини (хладоагенту), тобто адсорбату. Типові вимоги до неї:

а) низький питомий об’єм в рідкому стані;

б) низька молекулярна маса;

в) низька в’язкість;

г) висока теплопровідність;

д) хімічна стабільність при експлуатаційному інтервалі температур;

е) нетоксинність, неагресивність, негорючість;

ж) відсутність екологічних проблем при експлуатації;

з) доступність;

и) низька вартість;

к) можливо нижча теплота випаровування;

л) можливо низькі тиски насичення при температурах експлуатації.

Для холодильних машин та установок до цих вимог додаються температура випаровування нижче 0°С та висока прихована теплота випаровування.

Крім того, слід встановити:

а) чи планується її використання в безпосередньому контакту за людиною;

б) до якої температури необхідно охолодити середовище;

в) яким має бути падіння температури.

При безпосередньому контакті робочої рідини з людиною, вочевидь, необхідно використовувати не лише доступну рідину, але й безпечну, тобто воду. До переваг води відносяться високі значення прихованої теплоти випаровування та малий питомий об’єм в рідкому стані, що сприяє невеликим значенням маси хладоагента, яка необхідна для відведення теплоти від охолоджуваного середовища (табл. 1).

Метанол, етанол та аміак видаються значно менш ефективними. Але охолодження в цьому випадку буде лише до 0–5°С, інакше можна використовувати метанол, етанол, аміак та ін.

До того, важливим критерієм є температура регенерації адсорбента, яка за наявності контакта з людиною повинна відповідати діючим санітарним нормам. В той же час, поглинання адсорбата тобто адсорбція, та теплота адсорбції визначають масу адсорбента в адсорбційному модулі, тобто в кінцевому сенсі конструктивні параметри сонячного колектора Так, показано, що гранична адсорбція має бути не менш за 0,5 кг/кг, що дозволяє досягти компактного розміру адсорбційного модуля.

До підбору робочих рідин (холодагентів) для адсорбційних холодильних установок (рис.) додаються наступні критерії підбору: температура в холодильній камері та теплота випаровування.

Так, вода дозволяє досягти високих значень холодопродуктивності, але низьких температур в холодильній камері в цих умовах досягти термодинамічно неможливо. Альтернативою стають аміак, етиловий спирт, метиловий спирт тощо.

До ключових факторів при підборі адсорбента слід віднести граничну адсорбцію, яка визначає необхідні масу та об’єм адсорбенту (табл. 2).

Об’єм традиційних силікагелів, необхідних для експлуатації адсорбційної холодильної установки 0,09–0,54 м^3. Значні об’єми вимагають для для регенерації, вочевидь, значних витрат теплоносіїв

Таблиця 1

Маса хладоагента, яка необхідна для відведення від холодильної камери 55271 кДж/добу

Робоча рідина	T_{ev}, °С	ΔH_{ev}, (кДж/кг)	Маса хладоагента
Вода (чиста)	0	2450 [5, p. 808]	22,56
Метанол	–97.6	1170 [5, p. 808]	47,24
Аміак	–77.3	1370 [5, p. 808]	40,34
Етанол	–	919 [6, p. 4707]	60,14

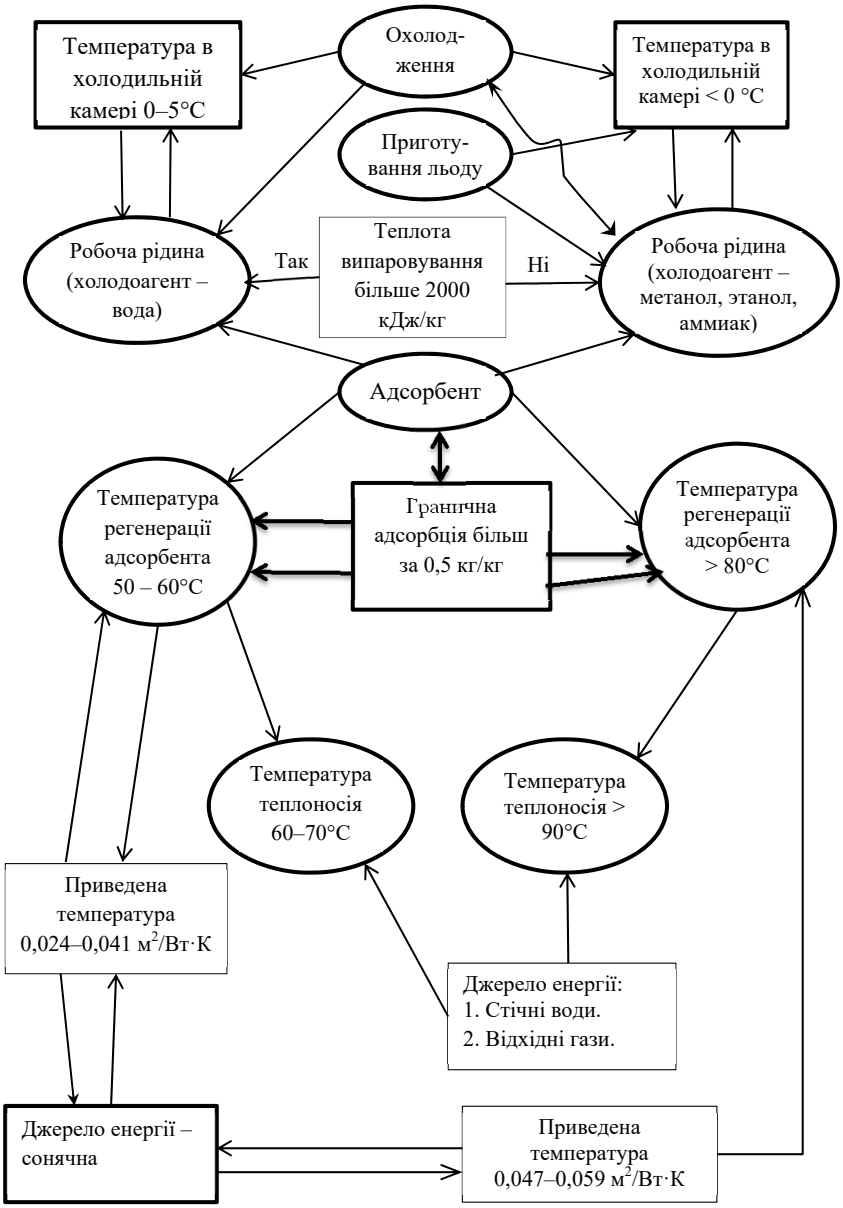


Рис. Алгоритм підбору адсорбента та робочої рідини для систем холодопостачання

Таблиця 2

Маса адсорбента, яка необхідна для поглинання 22,56 кг води, яка необхідна для відведення від холодильної камери 55271 кДж/добу

Адсорбент	Гранична адсорбція A_{lim}, кг/кг	Маса адсорбента, кг	Об'єм адсорбента, м³	Температура регенерації, °С	Джерело
Силікагель КСМ № 6п	0.20	112,8	0,16	150	[7]
Силікагель КСК № 1	0,06	376,0	0,54	150	[7]
Силікагель КСМ № 6с	0,33	68,364	0,09	150	[7]
Силікагель Type 3A	0.32	70,5	0,11	100	[8, pp. 1631–1642]
Силікагель RD	0.36	62,67	0,09	100	[8, pp. 1631–1642]
Силікоалюмофосфат	0,25	90,24	0,13	60	[9, p. 85–95]
Силікагель 20 % – натрій ацетат 80 %	1,046	40,50	0,06	60	[10, p. 52–58]
Силікагель 20 % – натрій сульфат 80 %	0,557	21,57	0,03	90	[10, p. 52–58]

з доволі високими значеннями температури. Мінімальні значення мас та об'ємів адсорбента отримані для композитів «силікагель – натрій ацетат» та «силікагель – натрій сульфат», гранична адсорбція води якими перевищує традиційні силікагелі близько в 2–4 рази.

З точки зору конструктивних обмежень, слід використовувати адсорбенти, гранична адсорбція яких не менш за 0,5 кг/кг. Для регенерації адсорбента доцільно використовувати стічні води або відхідні гази з температурами, які не менш, ніж на 10°С більше температур регенерації. Іншим варіантом є енергія випромінювання, яка підводиться за допомогою сонячного колектора.

При підборі колекторів слід враховувати приведені температури та температури регенерації адсорбентів. Десорбція води з адсорбентів з температурою регенерації в інтервалі 50–60ºС відбувається, якщо середня температура теплоносія на 20–35°С більше температури навколишнього середовища, що при середній інтенсивності сонячного випромінювання в 850 Вт/м^2 відповідає діапазону приведеної температури 0,024–0,041 (м^2·К)/Вт [11, с. 9–15].

При температурі регенерації адсорбента більше за 80ºС температура теплоносія має бути вищою, ніж температура навколишнього середовища на 40–50°С, що відповідає діапазону приведених $T_{пр}$ = 0,047–0,059 (м^2·К)/Вт та вище [11, p. 9–15].

Отже, ключевими критеріями при підборі є наявність контакту з людиною протягом циклу, що визначає температуру регенерації адсорбента та характер джерела теплової енергії, яке використовується для регенерації.

З іншого боку, холодопродуктивність адсорбційної холодильної установки визначається прихованою теплотою пароутворення робочої рідини. Крім того, необхідно врахувати і потенціал джерела. Слід також враховувати максимальну величину адсорбції і, отже, масу та об'єм абсорбента, яка необхідна поглинання робочої рідни протягом циклу, і отже, конструктивні характеристики адсорбційної холодильної установки.

Висновки:

1. Розроблено загальні принципи та розроблено алгоритм підбору робочих пар «адсорбент – адсорбат» для адсорбційних холодильних установок. Визначено ключеві принципи та критерії підбору адсорбентів та хладоагентів.

2. Обгрунтовано, що основними критеріями підбору робочих пар вид та потенціал джерела теплоти для регенерації адсорбента, наявність контакту людини, адсорбента та адсорбата при експлуатації теплотрансформатора, яка обумовлює необхідність використання нетоксичних та неагресивних речовин та обмежує температуру регенерації адсорбента до 90°С. Показано, що іншим ключовим напрямком при підборі робочих пар для адсорбційних холодильних установок є холодопродуктивність та адсорбційна ємність адсорбента, яка масу та об'єм адсорбента, яка необхідна для компенсації необхідного теплового навантаження, що визначає габаритні розміри адсорбера.

3. Обгрунтовано критерії підбора робочих пар для холодильних машин та установок: температура охолоджуваного середовища, яка визначає вид використовуваного адсорбату – хладоагенту, теплота випаровування хладоагенту, вид та потенціал джерела теплової енергії, який використовується для регенерації адсорбента, гранична адсорбція адсорбента.

Список літератури:

1. Keleher M., Narayanan R. Performance analysis of alternative HVAC systems incorporating renewable energies in sub-tropical climates // *Energy Procedia*. 2019. Vol. 160. P. 147–154

2. Zhang X., Wang F., Lei X., Wang Y., Wang Y. Influential factors and optimization analysis of adsorption refrigeration system performance // *AIP Advances*. 2020. Vol. 10, 105315. doi: 10.1063/5.0026131

3. Бєляновська, О. А., Пустовой, Г. М., Сухий, К. М., Губинський, М. В., Сухий, М. П., Дорошенко, О. В., Сергієнко, Я. О. Експлуатація адсорбційних холодильних установок на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» для зберігання сільськогосподарської продукції // Холодильна техніка та технологія. 2019. Т. 55(3). С. 165–171.

4. Swaraj Kumar B., Varghese J., Jacob J. Optimal Thermochemical Material Selection for a Hybrid Thermal Energy Storage System for Low Temperature Applications Using Multi Criteria Optimization Technique, Materials Science for Energy Technologies (2022), doi: https://doi.org/10.1016/j.mset. 2022.10.005

5. Girnik I., Tokarev M., Aristov Yu. Thermodynamic Analysis ofWorking Fluids for a New "Heat from Cold" Cycle // Entropy. 2020. Vol. 22. P. 808.

6. Boruta, P.; Bujok, T.; Mika, Ł.; Sztekler, K. Adsorbents, Working Pairs and Coated Beds for Natural Refrigerants in Adsorption Chillers—State of the Art. Energies. 2021. Vol. 14. P. 4707. https://doi.org/10.3390/en14154707

7. State Standard 3956-76. Silica gel for industrial use. Specifications. M., Publishing Office of State Standards, 13.

8. Ng K.C., Chua N.T., Chung C.Y., Loke C.H., Kasiwagi T., Akisawa A., Saha B.B. (2001). Experimental investigation of silica gel water adsorption isotherm characteristics. Applied Thermal Engineering. 21, 1631–1642.

9. 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. P. 85–95.

10. Sukhyy K., Belyanovskaya E., Kovalenko V., Kotok V., Sukhyy M., Kolomiyets E., Gubynskyi M., Yeromin 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, № 1. P. 52–58.

11. Сухий К.М., Козлов Я.М., Бєляновська О.А., Прокопенко О.М., Суха І.В., Дорошенко О.М. Експлуатаційні характеристики полімерних сонячних колекторів для адсорбційних холодильних геліоустановок // Холодильна техніка і технологія. 2018. Т. 54, № 1. С. 9–15.

Belyanovskaya E.A., Sukhyy K.M., Pustovoy G.M., Yeromin O.O., Sukhyy M.K., Frolova L.A.

CHOICE CRITERIA OF WORKING PAIRS FOR ADSORPTIVE CHILLERS

General principles have been established and an algorithm for the selection of working pairs 'adsorbent – refrigerant' for adsorption refrigerating units has been proposed. The main requirements for adsorbents and refrigerants are defined. The main advantages and disadvantages of refrigerants such as water, methanol, ethanol and ammonia are compared, and the limits of their use, which are determined by the temperature of the cooled medium which must be maintained are analyzed. The main criteria for the selection of working pairs are substantiated: the type and potential of the heat source for the regeneration of the adsorbent, the presence of human contact, the adsorbent and the adsorbate during the operation of the adsorption refrigerating unit, limits the temperature of the regeneration of the adsorbent to 90°C and determines the need to use non-toxic substances as refrigerants. It is shown that another key direction in the selection of working pairs for adsorption refrigeration units is the cooling capacity and adsorption capacity of the adsorbent, which determines the mass and volume of the adsorbent, which is necessary to ensure the necessary cooling capacity, which determines the overall dimensions of the adsorber. The crucial advantages and disadvantages of the main refrigerants are shown. The main advantages of using composites 'salt in porous matrix' compared to traditional adsorption media are shown.

Key words: *adsorptive chiller, maximal adsorption, refrigerant, composite adsorbent.*

УДК 543.322:544.475:621.175.1
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/24

Кочмарський В.З.
Національний університет водного господарства і природокористування

Костюк О.В.
Національний університет водного господарства і природокористування

Тимейчук О.Ю.
Національний університет водного господарства і природокористування

Куба В.В.
Національний університет водного господарства і природокористування

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ШВИДКОСТІ ВИДІЛЕННЯ $CaCO_3$ В КВАЗІСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ ОБОРОТНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ

Розглядаються низькотемпературні відкладення, зокрема, твердого $CaCO_3$, що є основним компонентом забруднень теплообмінників на електростанціях та підприємствах, особливо тих, що використовують оборотні системи охолодження (ОСО). Для аналізу умов виділення $CaCO_3$ з оборотних вод сформульовано кінетичні рівняння для розчинних солей та активної концентрації іонів кальцію Ca^{2+}. Показано, що характерний час перехідних процесів концентрування як для розчинних солей, так і для іонів Ca^{2+} рівний добутку динамічного параметра $\varphi = G_{ж}/(G_{ж} - G_{вп})$ на період заміщення води в ОСО водою підживлення ($T_{ж}$), $T = \varphi \cdot T_{ж}$.

Отримані співвідношення між водними потоками в ОСО та динамічним параметром φ, що справедливі за умови сталості водного об'єму ОСО. Ці співвідношення дозволяють контролювати величини потоків продувки та випарювання, визначити потрібну величину підживлення ОСО та оцінювати ефективність роботи градирень.

Сформульовано поняття квазістаціонарного режиму роботи ОСО. В цьому наближенні отримано вираз для швидкості виділення $CaCO_3$ як функцію якості води та режиму роботи ОСО. Розроблено алгоритм розрахунку граничної концентрації іонів Ca^{2+}, яка встановлюється в оборотній воді у квазістаціонарному режимі.

Отримані вирази застосовані для аналізу стабільності оборотної води конкретної ОСО у якій використовують пом'якшення води підживлення освітленням. На підставі розрахованого рівня стабільності оборотної води робиться висновок про необхідність додаткових заходів щодо зменшення швидкості виділення $CaCO_3$, наприклад, підкисленням та додаванням інгібіторів відкладень.

Методика розрахунку граничної концентрації іонів кальцію може також використовуватися для створення керуючого алгоритму в схемі автоматизації управління роботою ОСО для досягнення її максимальної ефективності.

Ключові слова: *оборотна вода, підживлення, кінетичні рівняння, швидкість виділення, карбонат кальцію, квазістаціонарний режим, динамічний параметр.*

Вступ. Оборотні системи охолодження електростанцій та промислових підприємств поряд з виконанням своєї прямої функції – охолодження конденсаторів турбін чи інших технологічних теплообмінників є досконалим інструментом економії найціннішого природного ресурсу – води.

На сьогодні використовують три основні типи оборотних систем охолодження, в подальшому ОСО: зі ставками охолодження, градирнями та бризкальними басейнами [1]. Реальні ОСО часто включають комбінації основних типів. Будучи ефективними засобом економії водних ресурсів, ОСО поряд з цим мають специфічні недоліки [2] які є наслідками нагріву охолодної води (ОВ) та концентрування солей завдяки її випаровуванню і полягають у виділенні відкладень на поверхнях теплопередачі.

Проаналізувавши склад забруднень низькотемпературних теплообмінників більше ніж двадцяти електростанцій, автори [2] дійшли висновку, що основним компонентом відкладень є карбонат кальцію. Тому, стратегія протидії відкладенням

повинна ґрунтуватися на аналізі динаміки концентрації іонів кальцію в ОВ, з врахуванням режимів роботи ОСО та фізико-хімічних процесів, що протікають в оборотній воді.

Модель процесу виділення карбонату кальцію в ОСО, разом з даними якості води, повинна бути основою для автоматизації контролю за станом кальцій-карбонатної підсистеми ОВ, тобто за її здатністю до виділення $CaCO_3$ [3] та забезпечення і підтримання потрібного рівня стабільності ОВ.

Формулювання моделі. Інтенсивність виділення $CaCO_3$ в оборотній воді можна оцінити шляхом одномоментного зіставлення концентрацій добре розчинних солей (трасерів) з концентрацією малорозчинних (накипінів), наприклад, іонів Ca^{2+} [3], оскільки менше, порівняно з трасерами, концентрування накипінів пов'язано саме з їх виділенням у вигляді твердої фази з ОВ. Таке зіставлення є основою фізико-хімічної та математичної моделі динаміки цих іонів в ОСО, яка розглядається в роботі.

Для розуміння структури та аналізу роботи ОСО розглянемо її спрощену схему див. рис. 1.

Вона складається з теплообмінних апаратів 1, охолоджувача води (тут градирні) 2, циркуляційного насоса 3, насоса градирні НГ та системи водоводів 4. Нагріта в технологічних теплообмінниках 1 вода охолоджується у градирні 2 переважно завдяки випаровуванню і повертається в теплообмінники. Орієнтовні величини потоків ОСО такі: потік випаровування $G_{вп}$ становить (1.0 ÷ 1.5)% від потоку оборотної води G_o, краплинного виносу $G_{крп}$ = (0.05 ÷ 0.5)%, а потік фільтрації $G_ф$ переважно менший від 0.05%. Час обороту ОВ в ОСО становить (0.5–1.5) год. Тому вода підживлення швидко перемішується з основним потоком і за декілька оборотів ОВ в ній встановлюється майже однорідний розподіл компонентів. Температура нагріву ОВ в теплообмінниках (7–10)°С. Утворення відкладень на поверхнях теплообміну починається з карбонату кальцію оскільки у приповерхневому шарі трубок теплообмінників температура ОВ вища ніж у ядрі потоку і внаслідок зниження розчинності $CaCO_3$ при рості температури він формує первинний шар на трубній системі. Шар $CaCO_3$ служить основою для органічних відкладень різної природи. Загалом відкладення мають шарувату структуру і теплопровідність на один-два порядки меншу ніж матеріал трубок.

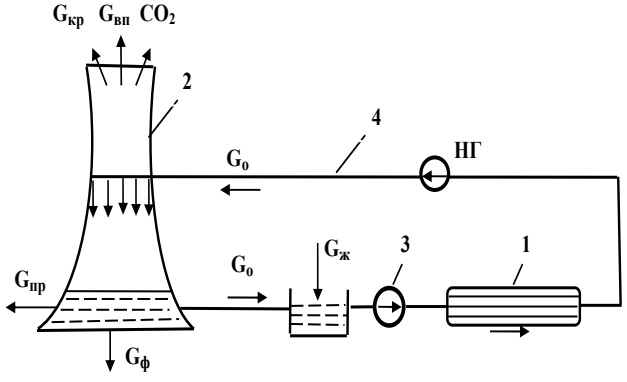


Рис. 1. Спрощена схема оборотної системи охолодження з градирнею

Випаровування влітку забезпечує 80–90% розсіювання тепла, яке подається в градирні, завдяки тому, що 1кг пари виносить ≈ (2.4…2.5)МДж теплоти, проте, як вже згадувалось, це ж випаровування є причиною концентрування солей в оборотній воді та зв'язаного з ним виділенням $CaCO_3$ [1–4]. Взимку винос теплоти випаровуванням зменшується і споживання свіжої води та концентрування солей теж знижується. Тобто якість ОВ та її здатність до виділення відкладень має сезонний характер як і режим роботи ОСО.

Вода підживлення має нижчий солевміст, ніж оборотна, тому для його зниження оборотну воду скидають в оточення, поповнюючи систему водою підживлення (продувка ОСО) з витратою $G_ж$. За скиди продувних вод підприємствам доводиться платити, особливо при перевищенні ГДС, тому пошук способів мінімізації об'ємів продувки є актуальним завданням.

Звернемо увагу на це, що продувка в ОСО ділиться на контрольовану та неконтрольовану у вигляді краплинного виносу та фільтрації. В подальшому говорячи про витрату продувки матимемо на увазі повну продувку.

Враховуючи практично однорідний розподіл солей по тракту ОВ, динамічний баланс розчинних солей представимо рівнянням [3],

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{\varphi \cdot T_ж} \cdot (\varphi \cdot C_0 - C),\ T_ж = \frac{V}{G_ж},\ \varphi = \frac{G_ж}{G_ж - G_{вп}}, \quad (1)$$

якщо V= Const, то

$$G_ж = G_{вп} + G_{пр}, \quad (2)$$

і відповідно до (1) та (2) можемо отримати корисні співвідношення між потоками ОСО,

$$\varphi = \frac{G_ж}{G_{пр}},\ T_{пр} = \frac{V}{G_{пр}} = \varphi \cdot T_{ж};$$

$$G_{вп} = \left(1 - \frac{1}{\varphi}\right) \cdot G_ж; \quad (3)$$

$$G_{пр} = \frac{G_ж}{\varphi} = \frac{G_{вп}}{\varphi - 1}.$$

У виразі (3) $T_ж$ – час заміщення водного об'єму ОСО водою підживлення; $T_{пр}$ – час опорожнення водного об'єму ОСО продувкою; φ – ***динамічний параметр*** ОСО, його фізичний зміст стає зрозумілим, якщо концентрація розчинних солей в ОСО досягає рівноваги (умовно при t →∞). Тобто,

$$\varphi_\infty \to k = C_\infty / C_0, \qquad (4)$$

Співвідношення (3) є дуже корисними оскільки дозволяють узгоджувати водообмін в ОСО та контролювати, наприклад, якість роботи градирні. До речі, часто експлуатаційний персонал прагнучи економити забір свіжої водив впроваджує дорогу заміну водоуловлювачів у градирнях, знижуючи неконтрольовану продувку з краплинним виносом, і буває вимушений на величину зекономленої води збільшувати величину продувки, або, див. (3) та (4), погоджуватися на ріст солевмісту в ОВ з усіма наслідками.

При сталих режимних параметрах ОСО ($G_ж$, V, C_0 та φ) рівняння (5) інтегрується і отримуємо залежність C(t) [4], яка описує режим накопичення розчинних солей в ОСО,

$$C(t) = C_0 \cdot \left[\varphi_\infty - (\varphi_\infty - 1) \cdot e^{-\frac{t - t_0}{T_{пр}}} \right], \qquad (5)$$

при великих часах з (5) отримуємо, що $C_\infty = C_0 \cdot \varphi_\infty$ з якого випливає (4).

З (5) бачимо, що характерним часовим параметром в ОСО є величина

$$T = T_{пр} = \varphi_\infty \cdot T_ж,$$

За час $(t - t_0) > 4 \cdot T_{пр}$ відхилення C(t) від стаціонарного стану не ***перевищує 2%*** і концентрація розчинних солей в ОСО стає ***практично рівною*** $C_\infty = C_0 \cdot \varphi_\infty$. Тому використовувати наближення dC/dt→0 потрібно з обережністю особливо для змінних режимів роботи ОСО.

Перейдемо до аналізу динаміки солей, що зазнають в ОСО фазових перетворень, наприклад, карбонату кальцію.

Зауважимо, що в нормативних документах, які регулюють роботу ОСО пропонують для оцінки ймовірності відкладень розглядати загальну жорсткість (твердість) ОВ, а не кальцієву [5, 6]. Карбонат магнію, маючи майже на два порядки більшу розчинність ніж карбонат кальцію, в ОСО практично не виділяється з ОВ (за винятком процесу змішаної кристалізації $Ca(Mg)CO_3$. Іони магнію, подібно до трасерів, накопичуються в ОВ, і тому використовувати загальну жорсткість для оцінки можливості відкладень в ОСО не коректно.

Щоб простежити за виділенням $CaCO_3$ з оборотної води слід сформулювати кінетичне рівняння для активної концентрації іонів кальцію.

Якщо не брати до уваги інші канали зміни концентрації іонів Ca^{2+}, то рівняння для цих іонів формально отримується з (1) додаванням у праву частину (5) члена, який описує виділення $CaCO_3$,

$$\frac{dC_{Ca}}{dt} = \frac{1}{\varphi \cdot T_ж} \cdot \left(\varphi \cdot C_{Ca0} - C_{Ca} \right) - \frac{dC_{CaCO_3}}{dt}. \qquad (6)$$

Перший член правої частини (9) представляє водообмін в ОСО і аналогічний (1), а другий зміну активної концентрації іонів Ca^{2+} внаслідок їх переходу в $CaCO_3$. Існує багато фізико-хімічних моделей кінетики виділення $CaCO_3$ [4]. Проте тут приймаємо найпростіший варіант [7]. Вважаємо, що процес перетворення $Ca^{2+} \to CaCO_3$ відбувається за схемою

$$Ca^{2+} + HCO_3^- \to CaCO_3\downarrow + H^+. \qquad (7)$$

Цій реакції відповідає вираз для швидкості утворення $CaCO_3$

$$\frac{dC_{CaCO_3}}{dt} = K \cdot C_{HCO_3^-} \cdot C_{Ca^{2+}}. \qquad (8)$$

Отже кінетичне рівняння для іонів Ca^{2+} в ОВ приймає вигляд,

$$\frac{dC_{Ca}}{dt} = \frac{1}{\varphi \cdot T_ж} \cdot \left(\varphi \cdot C_{Ca0} - C_{Ca} \right) - K \cdot C_{HCO_3^-} \cdot C_{Ca}. \qquad (9)$$

Якщо залежності від часу параметрів (9) відомі, то величину $C_{Ca}(t)$ можна визначити чисельним інтегруванням. Проте нас цікавить усталений режим роботи ОСО в якому $\frac{dC_{Ca}}{dt} \approx 0$. Якщо використати цю умову то (9) перетворюється в алгебраїчне рівняння з якого визначаємо концентрації іонів кальцію в ОВ для режиму роботи, коли концентрація Ca^{2+} підтримується сталою внаслідок компенсації переходу іонів кальцію в $CaCO_3$ його подачею в ОСО з водою підживлення. Такий режим роботи ОСО ***назвемо <u>квазістаціонарним</u>.***

Отже гранична концентрація іонів кальцію у квазістаціонарному режимі,

$$C_{Ca\infty} = \frac{\varphi \cdot C_{Ca0}}{1 + \varphi \cdot T_п \cdot K \cdot C_{HCO_3}} = \frac{G_ж \cdot C_{Ca0}}{G_{пр} + K \cdot V \cdot C_{HCO_3}}. \qquad (10)$$

Отриманий вираз разом з (8) дозволяє визначити швидкість виділення $CaCO_3$ у ***квазістаціонарному процесі***, що реалізується в ОСО, на підставі даних про режимні параметри ОСО та якість ОВ [8],

$$\frac{dC_{CaCO_3}}{dt} = G_ж \cdot \frac{K \cdot C_{Ca0} \cdot C_{HCO_3}}{G_{пр} + K \cdot V \cdot C_{HCO_3}}. \qquad (11)$$

Зауважимо, що наближення $\frac{dC_{Ca}}{dt} = 0$ яке відповідає сталій концентрації кальцію в ОСО,

насправді не вимагає незмінності в часі швидкості виділення $CaCO_3$ оскільки параметри режиму роботи ОСО, див (11), можуть змінюватися.

З (11) випливає, що зменшити швидкість виділення $CaCO_3$ з ОВ (підвищити її стабільність щодо виділення $CaCO_3$) можна змінюючи вміст іонів Ca^{2+} у воді підживлення (пом'якшення води), переведенням тимчасової твердості (концентрації бікарбонатів) у постійну шляхом підкислення та застосуванням інгібіторів відкладень (регулювання величини К) [8].

Приклад

Застосуємо отримані результати до ОСО ТЕС потужністю 4х300 МВт у якій використовують пом'якшення води підживлення.

Приймаємо величини: $\varphi = 3.5$; $T_ж = 42$ год.; $K = 1.33\cdot10^{-3}$м^3/(г-іон)·год.; $C_{Ca0} = 0.7$ (г-іон)/м^3, $C_{HCO3} = 3$(г-іон)/м^3, $G_ж = 3320$м^3/год., $G_{пр} = 920$ м^3/год.

Тоді за (10) отримуємо граничну величину концентрації іонів в усталеному режимі роботи ОСО

$$C_{Ca\,oo} = 1.54\text{(г-іон)/м}^3 = 2.20 \cdot C_{Ca0},$$

що менше від концентрації іонів кальцію, яка була б при відсутності виділення карбонату кальцію,

$$\varphi \cdot C_{Ca0} = 3.5\cdot0.7 = 2.45\ \text{(г-іон)/м}^3.$$

Визначимо зміну концентрації іонів Ca^{2+} оборотної води, яка виникає впродовж часу виходу на квазістаціонарний стан, внаслідок перетворення в $CaCO_3$,

$$\Delta C_{CaCO3} = \varphi\cdot C_{Ca0} - 2.20C_{Ca0} = 0.91C_{Ca0}\ \text{г-моль/м}^3, \quad (12)$$

що становить 37% від концентрації іонів кальцію, яка вноситься в ОСО з водою підживлення.

За формулою (11) розраховуємо швидкість виділення $CaCO_{3тв}$ з ОВ [9]. Вона за вказаних умов рівна

$$9.8\cdot10^{-3}\text{(г-моль)/(м}^3\cdot\text{год.)}.$$

Маючи величину концентрації іонів Ca^{2+} в усталеному (квазістаціонарному) режимі роботи ОСО можемо розрахувати індекс стабільності оборотної води [10]

$$\psi = C_{Ca\infty}/(\varphi\cdot C_{Ca0}) = 63\%.$$

Він, звичайно, недостатній для задовільної роботи ОСО і стабільність ОВ необхідно підвищити, наприклад, підкисленням води підживлення чи застосуванням інгібіторів відкладень (регулювання концентрації бікарбонатних іонів та величини К). Такий спосіб стабілізації ОВ використовують на Рівненській АЕС, забезпечуючи стабільність ОВ на рівні 85–90%.

Висновки

1. Отримано рівняння для динаміки концентрації іонів Ca^{2+} в оборотній воді, яке враховує водообмін та фізико-хімічний процес утворення карбонату кальцію.

2. Показано, що часом, який характеризує перехідні процеси в ОСО як для трасерів, так і для накипінів, є добуток $\varphi\cdot T_ж$, якщо $V_{OCO} = Const$, то $\varphi\cdot T_ж = T_{пр}$ – часу опорожнення водного об'єму ОСО продувкою.

3. Наближення стаціонарності процесів в ОСО, яке часто використовується в розрахунках більшістю авторів, справедливе (дає похибку меншу від 2%) лише для процесів, які змінюються з характерними часами більшими $4\cdot\varphi\cdot T_ж$. Оцінка цієї величини для ОСО електростанцій залежно від ступеня випарювання змінюється в межах $T \approx (25–160)$ діб. Тому для процесів з меншими характерними часами наближення стаціонарності потрібно використовувати з обережністю.

4. Потрібно мати на увазі, що вирази (3), які описують співвідношення між потоками в ОСО, справедливі за умови сталості в часі водного об'єму ОСО. Проте основних рівнянь, динаміки трасерів (1) та накипінів (6), це обмеження не стосується.

5. Отримано вираз для оцінки граничної концентрації іонів Ca^{2+}, яка встановлюється в оборотній воді у квазістаціонарному наближенні, див. (10). Порівнюючи величину граничного Ca^{2+} з концентрацією $\varphi\cdot C_{Ca0}$, яка була б за відсутності виділення твердого $CaCO_3$, можна судити про очікувану інтенсивність виділення $CaCO_3$ та ріст відкладень в ОСО.

6. Кількість $CaCO_3$, яка виділяється в ОСО у ***квазістаціонарному*** режимі роботи ОСО залежить від концентрації іонів кальцію у воді підживлення, інтенсивності підживлення та динамічного фактору φ, див. (11).

7. Слід розуміти, що засоби протидії відкладенням: стабілізація, підкислення чи ін. не можуть повністю усунути відкладення, а лише забезпечують їх прийнятний рівень.

Список літератури:

1. Кучеренко Д.И., Гладков В.А. Оборотное водоснабжение. (Системы водяного охлаждения). Москва : Стройиздат. 1980. 169 с.

2. Кочмарский В.З., Поспелов Д.Н. Состояние проблемы противонакипной обработки воды в СССР. – Київ: Знання. 1986. 20 с.

3. Кочмарський В.З. Кінетична модель карбонатної системи в умовах оборотного водопостачання // Вісник Укр. державної акад. водного господарства. Рівне. 1998. Вип. 1, ч. 1. С. 236–243.

4. Гаєвський В.Р., Кочмарський В.З. Підвищення ефективності оборотних систем охолодження мінімізацією кальцій-карбонатних відкладень. Рівне: НУВГП, 2018. 154 с. ISBN 978-966-327-383-9

5. ДБН В.2.5-74:2013. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування.

6. Методические указания по предотвращению минеральных и органических отложений в конденсаторах турбин и их очистке: РД 34.22.501-87. офиц. Изд. Москва : СПО Союзтехэнерго СССР. 1988. 41 с.

7. Plummer L. N. Critical review of the kinetics of calcite dissolution and precipitation. In Jenne E., ed., Chemical Modeling – Speciation, Sorption, Solubility, and Kinetics in Aqueous Systems. / L. N. Plummer, D. L. Parkhurst . M. L. Wigley // Am. Chem. Soc.: Washington, D.C. 1979. P. 537–575.

8. Кочмарський В.З., Трофимчук І.П., Куба В.В. Особливості поведінки трасерів та виділення твердого $CaCO_3$ в оборотних системах охолодження.// ВіВТ. НТвісті. № 1(22), 2018. Ст. 39–49. https://doi.org/10. 20535/22189300221 201814442

9. Кочмарський В.З. Контроль стабілізаційної обробки охолодної води.// Енергетика і електрифікація. № 2. 2020. Ст. 24–30.

10. Кочмарський В.З., Костюк О.П., Тимейчук О. Ю., Куба В.В. Динаміка відкладень та вплив на їх ріст імпульсного режиму течії охолодної води.// Вч. зап. Таврійського нац. універ. ім. В.І. Вернадького. Сер.: Техн. наки. Том 33 (72) № 5, 2022. Ст. 216–221. DOI https://doi.org/10.32782/2663-941/2022.5/32

Kochmarskii V.Z., Kostiuk O.P., Tymeichuk O.Yu., Kuba V.V. ALGORITHM FOR CALCULATING THE RATE OF $CaCO_3$ RELEASE IN THE QUASI-STATE MODE OF RCS OPERATION

Low-temperature deposits are considered, in particular, solid $CaCO_3$, which is the main component of contamination of heat exchangers at power plants and enterprises, especially those that use circulating cooling systems (RCS). To analyze the conditions for the release of $CaCO_3$ from recycled water, kinetic equations for soluble salts and the active concentration of calcium ions (Ca^{2+}) were formulated. It is shown that the characteristic time of transient concentration processes for both soluble salts and Ca^{2+} ions is equal to the product of the dynamic parameter $\varphi = G_f/(G_f - G_{ev})$ for the period of replacement of water in RCS with feed water (T_f), $T = \varphi \cdot T_f$.

The obtained relations between water flows in RCS and the dynamic parameter φ, which are valid under the condition of constancy of the water volume of RCS. These ratios make it possible to control the amounts of blowdown and evaporation flows, to determine the required amount of cooling water supply and to evaluate the efficiency of cooling towers.

The concept of the quasi-stationary mode of operation of the RCS is formulated. In this approximation, an expression for the rate of $CaCO_3$ release as a function of water quality and RCS operation mode is obtained. An algorithm for calculating the limit concentration of Ca^{2+} ions, which is set in circulating water in a quasi-stationary mode, has been developed.

The obtained expressions are used to analyze the stability of the circulating water of a specific RCS in which softening of the feed water by lighting is used. Based on the calculated level of circulating water stability, a conclusion is made about the need for additional measures to reduce the rate of $CaCO_3$ release, for example, by acidification and addition of sediment inhibitors.

The method of calculating the limit concentration of calcium ions can also be used to create a control algorithm in the scheme of automating the operation of the RCS to achieve its maximum efficiency.

Key words: *circulating water, feeding, kinetic equations, release rate, calcium carbonate, quasi-stationary regime, dynamic parameter.*

УДК 628.165
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/25

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

Соломаха А.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Притула Н.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Швець Н.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ ТЕРМІЧНОГО ЗНЕСОЛЕННЯ ВОДИ З ВІДКРИТИМ І ЗАКРИТИМ ПОВІТРЯНИМ ЦИКЛОМ

Проаналізовано сучасний стан і перспективи світового водоспоживання. Наведено технічні рішення для розв'язання проблем прісної води. Описано основні переваги та недоліки термічних методів опріснення і технології на основі мембран. Показано, що вказані недоліки можна усунути, використовуючи цикл зволоження–осушення повітря для децентралізованого отримання знесоленої води.

Описано принципові схеми опріснювальних установок із закритим водяним контуром, які працюють за принципом відкритого або закритого повітряного циклу з підігріванням води у проміжному теплообміннику, та розглянуто принципи їх роботи. Процеси зволоження–осушення повітря для кожного циклу побудовано у діаграмі t-d. Розроблено математичну модель для визначення оптимальних теплових характеристик розглянутих систем.

На основі комплексного термодинамічного аналізу закритого і відкритого циклів зволоження–осушення повітря встановлено вплив температур солоної води на вході та виході з осушувача на коефіцієнт енергетичної ефективності, коефіцієнт відновлення води й коефіцієнт масової витрати опріснювальної установки. Показано зміну витрати води й повітря, потрібних, щоб забезпечити постійну продуктивність системи, залежно від способу циркуляції повітря. Отримана точка «оптимуму» – температура води на вході до осушувача 15 °С. За нижчих значень відкрита повітряна схема має вищі коефіцієнти енергетичної ефективності й відновлення води. За інших умов доцільно застосовувати закриту повітряну схему.

Наведена математична модель і отримані результати можна використати на стадії проєктування систем опріснення води за допомогою циклу зволоження–осушення повітря для невеликих готелів та пансіонатів на морських узбережжях України та Європи, а також у приватних будівлях у регіонах із високою інтенсивністю сонячної радіації.

Ключові слова: *відкритий та закритий цикл, зволоження–осушення повітря, математична модель, термічне опріснення, термодинамічний аналіз.*

Постановка проблеми. Вода – це найважливіший ресурс для якісного життя людини. Легкий доступ до достатньої кількості води для використання та гігієни в житлових будинках, школах та медичних закладах потрібний для здоров'я і добробуту людини та має стати передумовою для гідного життя у XXI столітті. Однак через швидке зростання населення та урбанізацію надмірно використовують природну прісну воду в світі, що призводить до дефіциту води, забруднення та порушення роботи екосистем [1–3]. Найчастіше забруднюють воду, оскільки неналежним чином очищують відходи життєдіяльності та обробляють промислові та сільськогосподарські залишки.

Прогнози, які ґрунтуються на даних про населення Світового банку та базі даних FAO

AQUASTAT щодо наявності прісної води, показують, що до 2050 року 2 мільярди людей, які живуть у 44 країнах, імовірно, страждатимуть від дефіциту води, з яких 95% можуть проживати в країнах, що розвиваються [4].

Нині лише 40% поверхневих водних об'єктів Європи є екологічно чистими. Близько 140 мільйонів європейців живуть у районах надмірної експлуатації підземних вод. Цей дорогоцінний запас у недалекому майбутньому буде забруднений та виснажений, що призведе до обмежень використання води як домашніми господарствами, так і промисловістю. Також виникнуть інші проблеми, зокрема втрата водно-болотних угідь, опустелювання, низький стік річок та проникнення солі в прибережні водоносні горизонти [1].

Слід зауважити, що населення великих міст усього світу споживає води занадто багато. Так, у Нью-Йорку на одного жителя припадає 600 л/добу води, в Парижі – біля 500 л/добу, Києві – 353 л/добу. В Україні на 1 душу населення припадає в середньому 238 л/добу прісної води [5].

Як бачимо, перспектива світового водоспоживання цілком безрадісна, враховуючи, що тренд на збільшення питомих витрат природної прісної води повністю зберігається за одночасного збільшення населення Землі та зростанні обсягів промислового та сільськогосподарського виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Потенційні технічні рішення для розв'язання дефіциту води такі [1–5]: економити воду; ***повторно використовувати стічні й дощові води; опріснювати морську та солонувату воду***; підвищувати ефективність технологічних процесів у сільському господарстві та промисловості; зменшувати витоки в комунальному водопостачанні.

Широкомасштабне опріснення морської води почалося в 1960-х роках із використанням термічних процесів. До 2000 року на ринку домінували термічні багатоступеневі установки миттєвого скипання та з регенерацією отриманої пари в наступних ступенях, які використовують лише для досить великого (понад 100 тис. т на добу) виробництва прісної води [6]. Технологію зворотного осмосу на основі мембрани для очищення солонуватої води презентовано на ринку в 1970-х роках. Починаючи з 1980-х років, досягнення в галузі мембранної технології та матеріалів уможливили використання зворотного осмосу для опріснення морської води [7]. Унаслідок цього прогресу, починаючи з 1999 року, технології на основі мембран, зокрема зворотний осмос, електродіаліз і нанофільтрація, стали найбільш панівними на ринку опріснення води як у промислових, так і у невеликих масштабах.

Незважаючи на поширення мембранних технологій, вони мають певні недоліки: істотне енергоспоживання, екологічні проблеми (великий вуглецевий слід, викиди парникових газів), хімічні викиди та експлуатаційні проблеми (потреба в спеціалізованому навчанні персоналу, забруднення мембран) [8]. Альтернативним варіантом децентралізованого отримання прісної води є технологія зволоження–осушення повітря (humidification dehumidification, HDH). Невеликі опріснювальні установки такого типу мають низку переваг порівняно з мембранами: працюють за низьких температур, легко інтегруються з поновлювальними та вторинними джерелами енергії, мають високу технологічність конструкції [8; 9].

У доступних літературних джерелах бракує інформації стосовно зв'язку термодинамічного аналізу з оптимальною інженерною конструкцією HDH-систем. Так, у наукових статтях [10–12] наведено математичні моделі циклу зволоження–осушення повітря з нагріванням води. Проаналізовано вплив швидкості потоку сирої води, а також конструктивних розмірів осушувача і зволожувача на швидкість виробництва прісної води. Однак теплових характеристик, які так само не залежать від швидкості виготовлення води та розміру обладнання, не подано.

Постановка завдання. Провести комплексний термодинамічний аналіз закритого і відкритого циклів зволоження–осушення повітря з підігріванням води у проміжному теплообміннику та подати оптимальні умови роботи HDH-систем.

Виклад основного матеріалу дослідження. Принцип роботи HDH-систем. Схему опріснювальної установки, яка працює за принципом відкритого повітряного – закритого водяного циклів з підігріванням води (open air – close water with water heating, OAOW-WH), показано на рис. 1. Процеси осушення та зволоження повітря побудовано у діаграмі t-d на рис. 2.

На вхід у зволожувач (точка $1_{пов}$) надходить повітря з навколишнього середовища. Його температура t_{1n} і відносна вологість ω_{1n} залежать від пори року та погодних умов. Відносна вологість зазвичай перебуває в межах 40–60%. Під час безпосереднього контакту з гарячою водою частина води випаровується, підвищуються температура до значення t_{2n} та вологовміст повітря d_{2n}; його відносна вологість ω_{2n} наближається до 100% (точка $2_{пов}$). Нагріте і зволожене повітря надходить в осушувач, де воно контактує із трубками,

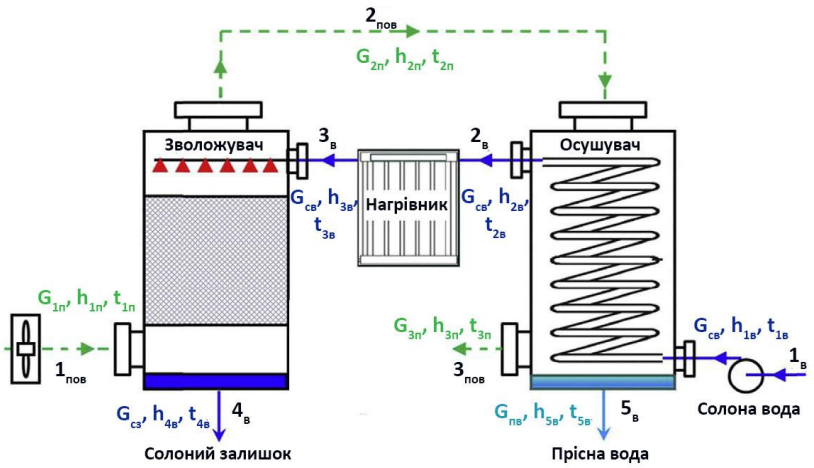


Рис. 1. Опріснювальна установка з відкритим повітряним циклом

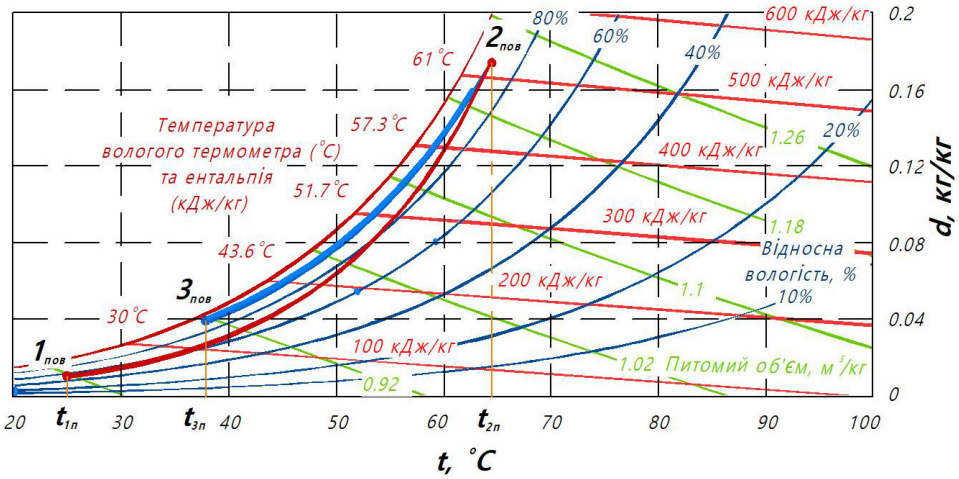


Рис. 2. Діаграма t-d для відкритого циклу зволоження – осушення повітря

якими рухається холодна свіжа вода. Повітря охолоджується до температури t_{3n}, частина водяної пари конденсується – зменшується вологовміст, відносна вологість w_{3n} при цьому залишається постійною близько 100% (точка $3_{пов}$). Охолоджене та осушене повітря відводиться в атмосферу.

Схему опріснювальної установки, яка працює за принципом закритого повітряного – закритого водяного циклів з підігріванням води (close air – close water with water heating, CAOW-WH), показано на рис. 3. Процеси зволоження та осушення повітря для цього випадку побудовано на рис. 4.

Розроблення математичної моделі. Для моделювання OAOW-WH та CAOW-WH циклів роботи опріснювальних HDH систем, показаних на рис. 1–4, зроблено такі припущення:

– установки працюють за незмінних умов;

– теплові втрати від обладнання не враховують;

– електричну потужність насоса та вентилятора вважають незначною порівняно з тепловою енергією, яка підводиться у нагрівнику;

– температура прісної води на виході з осушувача має середнє значення між температурою точки роси повітря на вході до осушувача й температурою повітря на виході з осушувача;

– відносна вологість повітря становить 100% на виході з осушувача та зволожувача.

У термодинамічні моделі, яку наведемо далі, масові та енергетичні баланси додають для кожної частини циклу, дотримуючи законів термодинаміки [13]. Зауважимо, що для математичного аналізу циклу та розрахунку його продуктивності потрібно знати такі параметри, як температуру води на вході до осушувача $t_{1в}$ та до зволожувача повітря $t_{3в}$. Мінімальна температура води в циклі на вході в установку $t_{1в}$ може коливатися в діапазоні між 10–40 °C залежно від сезонних змін температури. Натомість максимальна температура води в циклі на вході до зволожувача $t_{3в}$ має перебувати в межах 50–70 °C, щоб унеможливити утворення накипу. Ключові рівняння термодинамічної моделі мають вигляд:

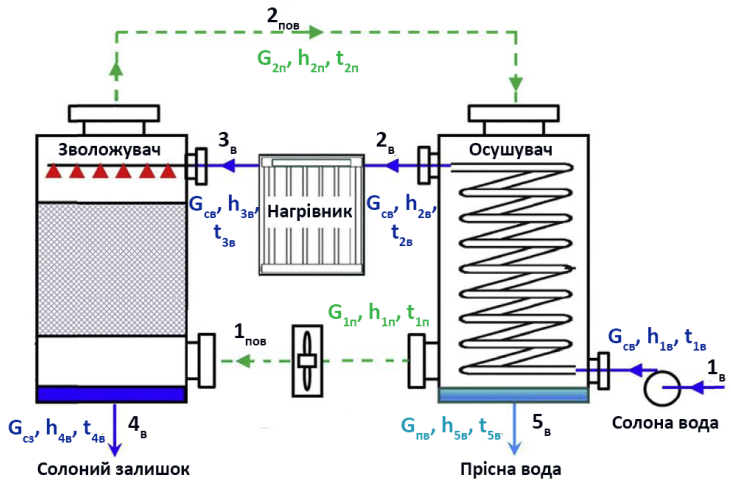


Рис. 3. Опріснювальна установка із закритим повітряним циклом

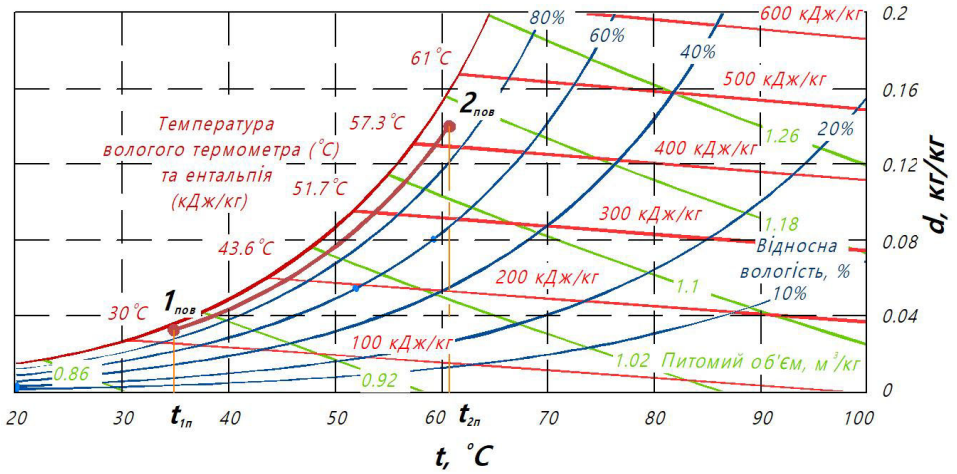


Рис. 4. Діаграма t-d для закритого циклу зволоження–осушення повітря

1. Енергетичний та масовий баланси осушувача повітря:

$$G_{св}h_{1в} + G_{2п}h_{2п} = G_{св}h_{2в} + G_{пв}h_{5в} + G_{3п}h_{3п}; \quad (1)$$

$$G_{пв} = G_{2п}\left(d_{2п} - d_{3п}\right). \quad (2)$$

2. Ефективність осушувача обчислюють за виразом:

$$\varepsilon_{ос} = \max\left(\frac{h_{2п} - h_{3п}}{h_{2п} - h_{3п}^{ideal}}; \frac{h_{2в} - h_{1в}}{h_{2в}^{ideal} - h_{1в}}\right), \quad (3)$$

де $h_{3п}^{ideal}$ – ідеальна ентальпія вихідного повітря за умови повного насичення повітря на виході, за рівності температур $t_{3п} = t_{1в}$; $h_{2в}^{ideal}$ – ідеальна ентальпія солоної води на виході з осушувача, коли температури рівні $t_{2в} = t_{2п}$.

3. Енергетичний та масовий баланси зволожувача повітря:

$$G_{1п}h_{1п} + G_{св}h_{3в} = G_{2п}h_{2п} + G_{сз}h_{4в}; \quad (4)$$

$$G_{сз} = G_{св} - G_{пв}. \quad (5)$$

4. Ефективність зволожувача:

$$\varepsilon_{зв} = \max\left(\frac{h_{2п} - h_{1п}}{h_{2п}^{ideal} - h_{1п}}; \frac{h_{3в} - h_{4в}}{h_{3в} - h_{4в}^{ideal}}\right), \quad (6)$$

де $h_{2п}^{ideal}$ – ідеальна ентальпія вихідного повітря за умови повного насичення, за рівності температур $t_{2п} = t_{3в}$; $h_{2в}^{ideal}$ – ідеальна ентальпія солоного залишку на виході зі зволожувача, коли температури рівні $t_{4в} = t_{1п}$.

5. Енергетичний баланс нагрівника можна подати у вигляді:

$$Q_{нас} = G_{св}\left(h_{3в} - h_{2в}\right). \quad (7)$$

Математичну модель, що містить рівняння (1)–(7), розв'язали за допомогою інженерного програмного забезпечення PTC Mathcad, а властивості вологого повітря та солоної води визначили за допомогою пакета CoolProp [14].) Наступний етап – визначити такі параметри продуктивності:

1. Коефіцієнт енергетичної ефективності (gain output ratio, GOR) – основний показник оцінювання роботи опріснювальної установки. Він

демонструє, скільки теплової енергії потрібно спожити установці в процесі опріснення. GOR визначають як відношення витрати виробленої прісної води, помноженої на приховану теплоту випаровування, до підведеної у циклі теплової енергії:

$$GOR = G_{пв} r / Q_{нат}. \quad (8)$$

2. Коефіцієнт відновлення води (recovery ratio, RR) – відношення витрати прісної води, яка утворюється в установці, до вхідної солоної води:

$$RR = G_{пв} / G_{св}. \quad (9)$$

3. Коефіцієнт масової витрати (mass flow rate ratio, MR) – відношення масової витрати вхідної солоної води до масової витрати зовнішнього повітря:

$$MR = G_{св} / G_{1n}. \quad (10)$$

Результати моделювання. Вплив температур солоної води на вході та виході з осушувача на основні параметри продуктивності опріснювальної установки показано на рис. 5 та 6.

Значення GOR і RR не залежать від способу циркуляції повітря та змінюються за закономірностями, встановленими в праці [15]. Значення коефіцієнта енергетичної ефективності GOR зростає зі збільшенням температури солоної води на виході з осушувача $t_{2в}$. За однакових $t_{2в}$ значення GOR тим більше, чим менша $t_{1в}$. Для забезпечення максимальних значень коефіцієнта енергетичної ефективності GOR та коефіцієнта відновлення води RR потрібно, щоб перепад температур солоної води в осушувачі був якомога більшим.

Витрата повітря, потрібна для забезпечення постійної продуктивності $G_{св}$, залежить від способу циркуляції. Водночас витрата води не змінюється залежно від схеми установки (рис. 7). У разі збільшення $t_{1в}$ вода в осушувачі нагріватиметься на меншу різницю температур. Для відведення постійної кількості теплоти від конденсації водяної пари з повітря потрібно збільшувати витрату води через теплообмінник.

Потрібна для оптимальної роботи відкритої схеми кількість повітря не залежить від $t_{1в}$. Для закритої схеми масову витрату повітря потрібно збільшувати в разі зменшення $t_{1в}$. Це зумовлено тим, що у відкритій схемі (рис. 1) повітря подається до установки з «атмосферними» параметрами (t_{1n} менше ніж 35…40 °С, ω_{1n} = 40–60%). Як було показано у праці [15], порівняно низька температура і вологість повітря у зволожувачі дає змогу завжди насичувати повітря потрібною кількістю водяної пари незалежно від інших параметрів установки ($t_{1в}$, $t_{2в}$, $t_{3в}$). Тоді масова витрата повітря залежить від лише заданою продуктивністю установки $G_{св}$.

У закритій схемі (рис. 3) температура і вологість повітря на вході до зволожувача дорівнюють температурі й вологості повітря на виході з осушувача. У двох теплообмінниках повітря змінює свої параметри (температуру і вологість) однаково, тому щоб підтримувати постійну продуктивність, потрібно змінювати витрату повітря. Унаслідок цього збільшуватиметься як температура повітря на виході з осушувача, так і ефективність зволожувача (рис. 8). Також слід зауважити, що в разі

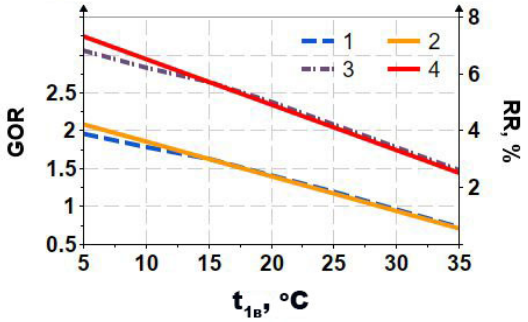


Рис. 5. Залежність *GOR* та *RR* від $t_{1в}$:
1 – *GOR*, CAOW; 2 – *GOR*, OAOW;
3 – *RR*, CAOW; 4 – *RR*, OAOW

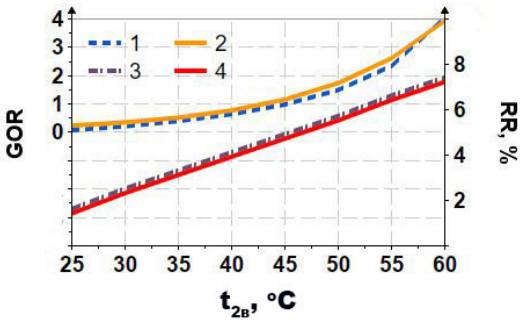


Рис. 6. Залежність *GOR* та *RR* від $t_{2в}$:
1 – *GOR*, CAOW; 2 – *GOR*, OAOW;
3 – *RR*, CAOW; 4 – *RR*, OAOW

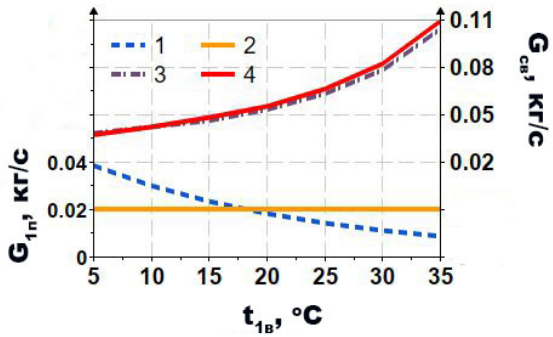


Рис. 7. Залежність G_{1n} та $G_{св}$ від $t_{1в}$:
1 – G_{1n}, CAOW; 2 – G_{1n}, OAOW;
3 – $G_{св}$, CAOW; 4 – $G_{св}$, OAOW

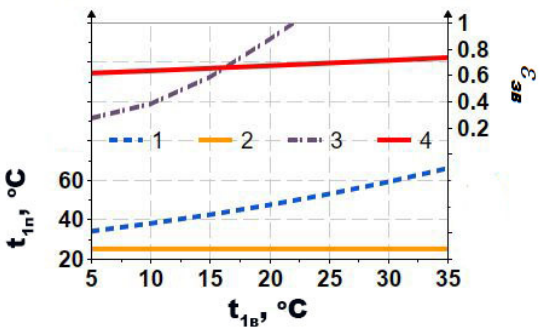


Рис. 8. Залежність $t_{1п}$ та $\varepsilon_{зв}$ від $t_{1в}$: 1 – $t_{1п}$, CAOW; 2 – $t_{1п}$, OAOW; 3 – $\varepsilon_{зв}$, CAOW; 4 – $\varepsilon_{зв}$, OAOW

досягнення температури сирої води ≈27 °С установка із закритою схемою виробляти чисту воду не буде (ефективність зволожувача буде більше ніж 100%). Для продовження функціонування потрібно знижувати продуктивність установки.

Як бачимо на рис. 7 та 8, є точка «оптимуму» за $t_{1в}$ = 15 °С. Якщо це значення нижче, краще застосовувати відкриту схему, якій характерні менші витрати повітря, а отже й електроенергії на вентиляторі; більша ефективність зволожувача, відповідно менші геометричні розміри теплообмінника. Відтак значення GOR і RR будуть дещо вищими (рис. 5). Якщо ж $t_{1в}$ більше ніж 15 °С , то вигідніше використовувати закриту схему.

Висновки:

1. Основними параметрами, які впливають на продуктивність установки, є температура води на вході в установку $t_{1в}$, перепад температур в осушувачі й температура солоної води на вході до зволожувача $t_{зв}$.

2. Відмінність між закритою і відкритою схемою полягає у «жорсткій» фіксації температур і вологості повітря на вході й виході з теплообмінників у разі замкненої циркуляції повітря. Як наслідок – для досягнення максимальної продуктивності в закритій схемі потрібно регулювати витрату повітря у разі зміни температур солоної води на вході та виході з осушувача. Це призводить як до різкої зміни ефективності теплообмінників, так і до підвищення температури повітря в них.

3. Відкриту схему доцільно застосовувати в разі зміни температури вхідної води до 15 °С. За вищих температур ефективніше використовувати замкнену циркуляцію повітря.

4. Подальші дослідження спрямовані на порівняння термодинамічної та ексергоекономічної ефективності інших типів опріснювальних HDH систем; проведення експериментальних досліджень гідродинаміки, тепло- і масообміну в зволожувачі та осушувачі для підвищення продуктивності.

Список літератури:

1. The problems of water stress. URL: https://www.eea.europa.eu/ publications/92-9167-025-1/page003.html
2. Cantor A., Owen D., Harter D., Nylen G. and Kiparsky M. Navigating groundwater-surface water interactions under the Sustainable Groundwater Management Act, Center for Law, Energy & the Environment. Berkley, CA: UC Berkley School of Law. 2018. URL: https://www.law.berkeley.edu/wp content/uploads/2018/03/ Navigating_GW-SW_Interactions_under_SGMA.pdf
3. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions The European Green Deal. Brusel, EU. 2019. P. 29.
4. Nirajan D., Sergio G. S., Jamal H., Almotasembellah A., Hassan S., Jan C. S., Maria D. K. Is Desalination a Solution to Freshwater Scarcity in Developing Countries? *Membranes.* 2022. № 12. P. 381. DOI: 10.3390/ membranes12040381
5. Безродний М.К., Притула Н.О., Голіяд М.Н. Стратегічні напрямки розвитку водопостачання в Україні. *Водопостачання і водовідведення*. 2020. № 2. С. 11–15.
6. Josephine T. Drinking Water Treatment and Challenges in Developing Countries. DOI: 10.5772/intechopen.80780
7. Wilf, M., Awerbuch, L. The Guidebook to Membrane Desalination Technology: Reverse Osmosis, Nanofiltration and Hybrid Systems, Process, Design, Applications, and Economics. Hopkinton, MA, USA. 2007. P. 524.
8. Ifras Z., Fahad A. A., Antar M.A., Salem A. A., Nasiru I. I. Performance and cost assessment of solar driven humidification dehumidification desalination system. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 132. P. 28–39. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.10.005
9. Rajaseenivasan T., Srithar K. An investigation into a laboratory scale bubble column humidification dehumidification desalination system powered by biomass energy. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 139. P. 232–244. DOI : 10.1016/j.enconman.2017.02.043

10. Tlili I. et al. Performance enhancement of a humidification–dehumidification desalination system. *J. Therm. Anal. Calorim*.. 2019. Vol. 140. P. 309–319. DOI: 10.1007/s10973-019-08775-8

11. Patel V. et al. Experimental and theoretical evaluation of bubbler humidifier for humidification–dehumidification water desalination system. *Heat Mass Transfer*. 2019. Vol. 55. P. 3201–3210. DOI: 10.1007/s00231-019-02659-1

12. Lawal D. U. et al. Experımental investigation of heat pump driven humidification–dehumidification desalination system for water desalination and space conditioning. *Desalination*. 2020. Vol. 475. P. 114–199. DOI: 10.1016/j.desal.2019.114199

13. Kudelia P. P., Dubovskyi S. V. Energy and exergy approaches to problem of rational energy use. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*. 2020. Vol. 2. P. 7–16.

14. "C++ library of properties for 122 components." CoolProp.org. URL: http://www.coolprop.org (accessed Jan. 28, 2021).

15. Середа В.В., Соломаха А.С., Притула Н.О., Заболотний О.А. Модель термічної опріснювальної установки з циклом зволоження-осушення повітря. *KPI Science News*. 2021. № 4. С. 105 – 112. DOI: 10.20535/kpisn.2021.4.250663

Sereda V.V., Solomakha A.S., Prytula N.O., Shvets N.O. THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THERMAL DESALINATION SYSTEM WITH OPEN AND CLOSE AIR CYCLE

The current state and prospects of global water consumption have been analyzed. The main advantages and disadvantages of thermal desalination and membrane-based technology are described. The indicated shortcomings can be eliminated by using the air humidification-dehumidification cycle for the decentralized production of fresh water.

Schematic diagrams of desalination installations with a closed water circuit, open or closed air cycle and water heating in an intermediate heat exchanger have been described, and the principles of their operation are considered. Humidification-dehumidification processes for each air cycle are plotted in the t-d diagram. A mathematical model was developed to determine the optimal thermal characteristics of the considered systems.

The effect of salt water temperature at the inlet and outlet of the dehumidifier on the energy efficiency coefficient, water recovery coefficient and mass flow coefficient was established using a complex thermodynamic analysis of closed and open air humidification-dehumidification cycles. The change in water and air consumption, which is necessary to ensure the constant productivity of the desalination system, depending on the method of air circulation, is shown. The obtained "optimum" point of the water temperature at the entrance to the dehumidifier is 15 °C. At lower values, the open air circuit has a higher energy efficiency ratio and water recovery ratio. In the opposite case, it is advisable to use a closed air circuit for fresh water production.

The presented mathematical model and the obtained results can be used for designing water desalination systems with air humidification-dehumidification cycle for small hotels and boarding houses on the seaside of Ukraine and Europe, as well as in private buildings in regions with high intensity of solar radiation.

Key words: *open and close cycle, air humidification-dehumidification, mathematical model, thermal desalination, thermodynamic analysis.*

УДК 621.431.75-62.97
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/26

Чередніков В.М.
ТОВ «КБ «Аерокоптер»

Череднікова О.В.
Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка

ВИПРОБУВАННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ ГЕЛІКОПТЕРА НА ЛАБОРАТОРНОМУ СТЕНДІ

Під час проведення наведеного у даній статті випробування була виконана перевірка надійності двигуна внутрішнього згорання гелікоптера. Для повної перевірки роботоздатності двигуна, він повинен пройти чотири етапи випробувань. Усі етапи проходять на моторному стенді «PRO 800 DYNAMOMETER», який спеціально облаштований для перевірки двигунів внутрішнього згорання літальних апаратів. В складі стенду є консоль управління, яка допомагає оператору керувати двигуном та змінювати навантаження, та зменшує час реєстрації та обробки даних. Перший етап випробування – обкатка двигуна, при якій параметри двигуна повинні відповідати певним значенням, що зафіксовані в розробленій програмі випробування двигунів. Тільки після того якщо двигун продемонструє необхідні характеристики, виникне можливість переходити на наступний етап випробувань. Другий етап характеризується зміною швидкісних характеристик двигуна та з ними параметрів роботи двигуна т.я. максимальний крутний момент на колінчастому валу, частота обертання колінчастого валу, максимальна потужність двигуна, максимальна витрата палива, температура відпрацьованих газів та інші. На другому етапі випробування виконувалось при чотирьох положеннях дросельної заслінки: 25, 50, 75 та 100%. В ході експерименту стенд фіксував необхідні показники в графічному вигляді в залежності від часу та від частоти обертання колінчастого валу двигуна. На третьому етапі визначення та оцінки холостого ходу двигуна визначалися витрати палива в залежності від частоти обертання колінчастого валу при цьому частота обертання повинна була бути не менше 1000 об/хв. Четвертий заключний етап проводився з послідовним відключенням циліндрів двигуна. В результаті цього етапу була розрахована сумарна індикаторна потужність двигуна, середня індикаторна потужність циліндрів, потужність механічних втрат, умовний механічний ККД та коефіцієнт рівномірності роботи циліндрів. Усі етапи були проведені успішно, показники двигуна задовольняли висунутим до нього вимогам. Вимоги до обладнання, оточуючого середовища та палива теж повністю були витримані під час дослідів. В науковій роботі було проведено лабораторне випробування двигуна з повним аналізом підтвердження його роботоздатності.

Ключові слова: *потужність двигуна, коефіцієнт корисної дії, витрата палива, частота обертання, температура відпрацьованих газів.*

Постановка проблеми. Серцем будь-якого транспортного засобу є двигун, особливо він важливий для літальних апаратів, бо від його надійності залежить не тільки здатність безперебійної роботи, а і здатність до безаварійної роботи. Аварії при відмові двигуна, як відомо, для літальних апаратів несуть більш важкі наслідки, чим в наземному транспорті. На сьогодні в зв’язку з дефіцитом та здороженням енергоресурсів в вигляді палива, найбільш розповсюдженими є електричні двигуни, як найбільш дешеві в експлуатації та більш екологічні. Розвиток наукових досліджень в автомобільному транспорті зосереджений на розвитку гібридних та електродвигунів. Але в авіаційній галузі електродвигуни не отримали сертифікати, дозвільні документи на встановлення в авіаційному транспорті, тобто не підтвердили свою безвідмовність та надійність на достатньому рівні. Питання дослідження режимів роботи двигунів внутрішнього згорання для встановлення на літальних апаратах залишається відкритим. Спочатку проводяться наземні лабораторні випробування, а потім льотні випробування на предмет можливості використання даного типу двигунів на літальному засобі. Якщо вносяться якісь конструктивні зміни в систему роботи двигуна з метою його удосконалення, підвищення енергоефективності, економічності його роботи. Всі такі зміни повинні супроводжуватися серіями лабораторних та льотних випробувань.

Малогабаритні гелікоптери досить широко застосовуються в комерційній сфері, сільському господарстві для здійснення польотів та для обробки продукції. Саме тому актуальність застосування двигунів внутрішнього згорання, які встановлюються на цих апаратах, все одно залишається і потребує подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Коефіцієнт корисної дії будь-яких двигунів, ефективність їх роботи – головні питання, які намагаються розглядати вчені, центром наукових інтересів яких є двигуни внутрішнього згорання, в Україні ці задачі вирішують в своїх роботах Нікіпчук С.В., Гащук П.М., Домінік А. М., Сичевський М. І. [1], [2]. Дослідженнями енергетичної ефективності двигунів внутрішнього згорання займаються науковці вже протягом десятиліть. На енергетичну ефективність впливають процеси теплопередачі всередині циліндрів двигуна та від стінок циліндрів до охолоджувальної рідини [3], [4]. Енергія, яка відбирається від робочого тіла циклу двигуна відноситься до втрат тепла, тому має безпосередній вплив на екологічний стан навколишнього середовища [5], [6]. Теплопередачу можна досліджувати використовуючи засоби модельних розрахунків [7]. Енергетична ефективність роботи є важливою характеристикою для транспорту та будь-якої рухомої техніки, задачі її підвищення розглядаються в працях через підвищення якості згорання палива та теплоспоживання в робочому просторі [2, 8]. Підвищенню ефективності системи охолодження двигунів, що дає можливість застосовувати їх в більш жорстких кліматичних умовах, присвячені статті [9, 10]. Створюються аналітичні моделі перетворення форм енергії, які відбуваються всередині двигунів [11], але із-за складності багатофакторної моделі теоретичні дослідження проводяться паралельно з експериментальними з використанням дослідницьких стендів [7]. Технології поєднання віртуальності та натурності моделювання відносяться до hard-soft технологій досліджень.

Постановка завдання. Основні елементи літальних апаратів на відміну від наземного транспорту, а особливо двигун, повинні пройти ретельну перевірку та випробування перед тим, як їх можна буде встановлювати на діючий транспортний засіб. Тому потрібно проводити випробовування кожного такого двигуна на придатність до застосування в режимі холостого ходу, при різних швидкісних режимах та при нерівномірності роботи циліндрів двигуна. Основним завданням дослідження є визначення та фіксування усього переліку характеристик двигуна, які є в програмі випробувань, з подальшим порівнянням з діапазоном величин, які можуть приймати ці характеристики згідно вимог програми. У випадку задовільного результату можна зробити висновок про надійність двигуна та його придатність до використання. На основі отриманих графіків зміни характеристик двигуна протягом часу та в залежності від частоти обертання колінчастого валу двигуна доцільно буде в подальшому провести аналіз з покращення економічних характеристик двигуна з впровадженням та проведенням ще серії додаткових експериментальних досліджень.

Основний матеріал дослідження. Об'єктом випробувань є двигун EJ25, який встановлюється на малогабаритному літальному апараті – гелікоптері.

Випробування проводилося на стенді для двигунів DYNO.800 (рис.1). Руховий стенд «PRO 800 ENGINE DYNAMOMETER» призначений для випробувань двигунів внутрішнього згоряння, в результаті яких визначаються швидкісні характеристики двигуна, характеристика холостого ходу двигуна, рівномірність роботи циліндрів та інші параметри.

Випробування складалися з чотирьох основних етапів:

1) обкатка двигуна проводиться в три ступені;

2) визначення та оцінки швидкісних характеристик двигуна 4 ступені;

3) визначення та оцінка характеристики холостого ходу;

4) визначення та оцінка рівномірності роботи двигуна.

Випробування проводять у спеціально обладнаному приміщенні на стенді DYNO.800 за умов, які вказані у програмі випробувань двигуна [12].

Паливо, що застосовується. Автомобільний неетелірований бензин з октановим числом не нижче 95 за методом дослідження А-95 (ДСТУ 4063-2001).

Моторама 1 (рис. 1) призначена для монтажу на ній двигуна, системи охолодження, вихлопної системи, гідравлічного гальма та інших допоміжних пристроїв. Моторама є основним силовим елементом конструкції, що приймає і передає зусилля між двигуном і гідравлічним гальмом.

Консоль керування 2 (рис. 1) призначена для полегшення роботи оператора та зменшення часу на обробку та реєстрацію даних. Для цього в одному місці об'єднані засоби керування дви-

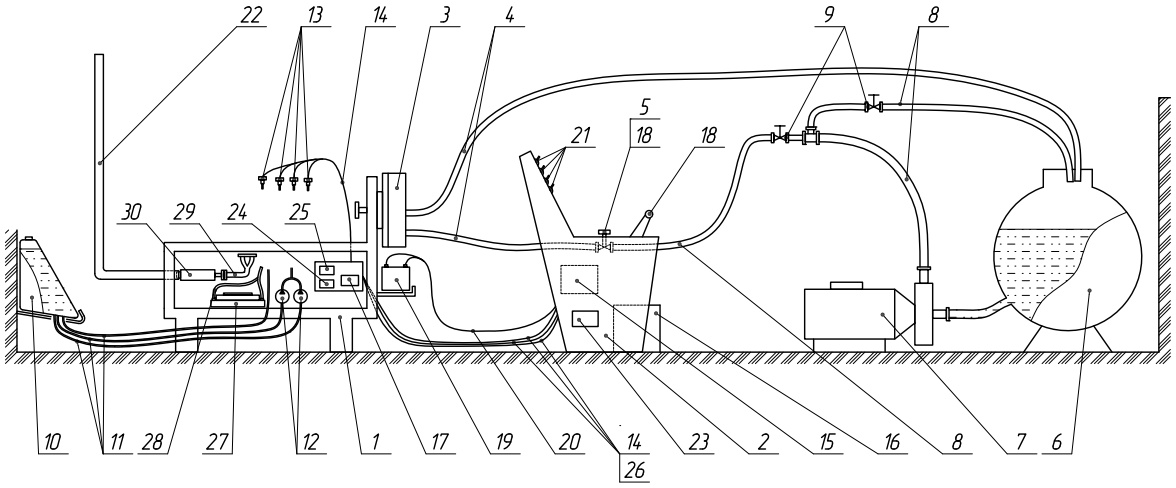


Рис. 1. Випробувальний стенд "PRO 800 DYNAMOMETER":
1 – моторама; 2 – консоль керування; 3 – гідравлічне гальмо; 4, 8 – трубопроводи; 5 – регулятор навантаження; 6 – бак для води; 7 – водяний насос; 9 – регулююча апаратура; 10 – паливний бак; 11 – паливопроводи; 12 – паливні насоси; 13 – датчики; 14, 20, 26 – електричні джгути; 15 – пристрій збору та обробки інформації з підсистемою автоматичного керування електронними пристроями; 16 – персональний комп'ютер; 17 – погодна станція; 18 – виконавчі пристрої; 19 – акумулятор; 21 – вимикачі; 22 – трубопровід відведення відпрацьованих газів; 23 – ел.система керування двигуном; 24 – блок запобіжників; 25 – блок реле; 27 – радіатор із вентиляторами; 28 – патрубки системи охолодження; 29 – випускний колектор; 30 – глушник

гуном та навантаженням з пристроями контролю, обробки та реєстрації даних.

Консоль керування (рисунок 2) являє собою корпус (1), виконаний з листової сталі, в якому встановлені механізми керування двигуном, а також покажчики та прилади, що відображають та реєструють параметри його роботи.

На корпусі консолі змонтовано (рисунок 2): розширена панель приладів (2); ЕСКД (22); діагностичний роз'єм (23); реле живлення ЕСКД (24) та електричні джгути.

У корпусі консолі змонтовані (рисунок 2): пристрій управління дросельною заслінкою (3); регулятор навантаження «LOAD» (4); покажчики: тиск води (5), частоти обертання колінчастого валу (6), тиск масла (7), температури охолоджуючої рідини (8), тиск палива (9); вимикачі та кнопки (10)-(15), монітор (19), а також пристрій збирання та обробки інформації з підсистемою автоматичного управління електронними пристроями – УСОІПАУЕУ (20). Під приладову дошку встановлюють персональний комп'ютер (21), якщо немає іншого місця встановлення.

Розширена панель приладів (поз. 2, рис.2) відображає додаткову інформацію про стан систем двигуна і стенда. Вона змонтована на верхній частині корпусу консолі управління і зафіксована від переміщень циліндричними прорізами на її бічних поверхнях, гвинтами і гайками. Цим самим кріпленням до консолі управління прикріплений монітор.

Пристрій керування дросельною заслінкою є механізмом, який дозволяє здійснювати як ручне, так і автоматичне керування положенням дросельної заслінки.

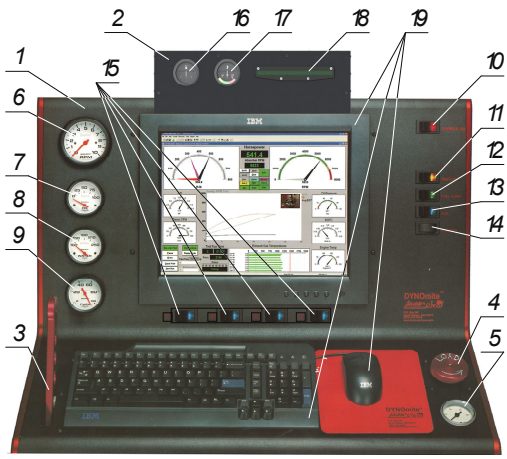
Пристрій призначений для встановлення необхідного положення дросельної заслінки, а також автоматичної підтримки заданого режиму роботи двигуна.

Ручне керування здійснюють за допомогою важеля; автоматичне керування – за допомогою серво-приводу та програми "DYNO-MAX 2010".

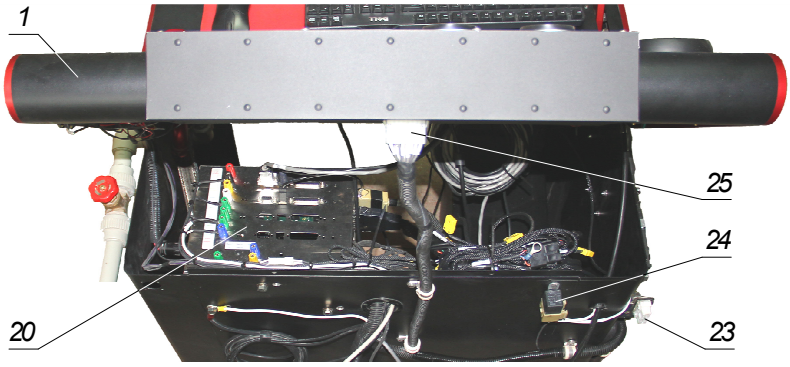
Перший етап випробувань – обкатка двигуна проходив у 3 ступеня. Першій ступінь проводився з положенням дросельної заслінки 3% при нормативних 2,5-3,5%. В ході першого ступеня обкатки: крутний момент колінчастого валу був 21 Н·м (за вимогами програми випробувань діапазон його значень 21–22 Н·м); частота обертання колінчастого вала коливалась від 1800–2200 об/хв (вимоги 1800–2200 об/хв.); діапазон потужності двигуна – 5,1–6,5 к.с. (вимоги 5–7 к.с.); витрата палива – 4,5–4,6 л/год (вимоги ≤6 л/год); температура охолоджувальної рідини – 71–77 ˚С (вимоги ≤105 ˚С); температура відпрацьованих газів дорівнювала 619–692˚С (вимоги ≤730 ˚С); температура повітря на вході в двигун +27–+31˚С (вимоги -18–+35 ˚С); тиск масла 4,9–5,0 кгс/см^2 (вимоги 4–6 кгс/см^2); тиск палива в системі 34–35 PSI (вимоги 33–43 PSI); кут випереджання запалювання 18˚–19˚ (вимоги 17,5˚–19,5 ˚); напруга живлення 13,7–14,4 В (вимоги 13,6–15,0 В);



Загальний вид



Вид на приладову дошку



Вид ззаду (задня кришка знята)

Рис. 2. Консоль керування:
1 – корпус; 2 – розширена панель приладів; 3 – пристрій керування дросельною заслінкою; 4 – регулятор навантаження "LOAD"; 5 – покажчик тиску води; 6 – покажчик частоти обертання колінчастого валу двигуна; 7 – покажчик тиску олії; 8 – покажчик температури охолоджувальної рідини; 9 – покажчик тиску палива; 10 – вимикач живлення стенду "CONSOLE ON"; 11 – вимикач запалювання "IGNITION"; 12 – вимикач паливних насосів "FUEL PUMP" (не використовується); 13 – резервний вимикач "AUX." (не використовується); 14 – кнопка запуску двигуна "STARTER"; 15 – вимикачі форсунок; 16 – покажчик рівня палива; 17 – покажчик температури двигуна; 18 – блок сигнальних ламп; 19 – комп'ютерна периферія (монітор, клавіатура, миша); 20 – пристрій збору та обробки інформації з підсистемою автоматичного керування електронними пристроями; 21 – персональний комп'ютер; 22 – електронна система керування двигуном (ЕСКД); 23 – діагностичний роз'єм; 24 – реле живлення ЕСКД; 25 – роз'єм розширеної панелі приладів

барометричний тиск повітря 101,4 кПа (вимоги 80–110 кПа); відносна вологість повітря склала 20–34% (вимоги ≤95%). Бачимо з результатів проходження першого ступеня, що усі параметри двигуна, які фіксували прилади системи контролю стенду, находилися в межах вимог до них в програмі випробувань.

Другий ступінь проводився з положенням дросельної заслінки 6% при нормативних 5,5–6,5%. В ході другого ступеня обкатки: крутний момент колінчастого валу був 34–36 Н·м (за вимогами програми випробувань діапазон його значень 34–36 Н·м); частота обертання колінчастого вала коливалась від 2400–2650 об/хв (вимоги 2300–2700 об/хв.); діапазон потужності двигуна – 11,8–12,77 к.с. (вимоги 11–13 к.с.); витрата палива – 5,5–5,7 л/год (вимоги ≤7 л/год); температура охолоджувальної рідини – 71–86 ˚С (вимоги ≤105 ˚С); температура відпрацьованих газів дорівнювала 701–722 ˚С (вимоги ≤730 ˚С); температура повітря на вході в двигун +29–+33˚С (вимоги –18–+35 ˚С); тиск масла 5,1–5,2 кгс/см^2 (вимоги 4–6 кгс/см^2); тиск палива в системі 38–42 PSI (вимоги 33–43 PSI); кут випереджання запалювання 20,5˚–20,6˚ (вимоги 19,5˚–21,5˚); напруга живлення 14,3–14,4 В (вимоги 13,6–15,0 В); барометричний тиск повітря 101,4 кПа (вимоги 80–110 кПа); відносна вологість повітря склала 20–22% (вимоги ≤95%).

Третій ступінь проводився з положенням дросельної заслінки 9% при нормативних 8,5-9,5%. В ході третього ступеня обкатки: крутний момент колінчастого валу був 44–45 Н·м (за вимогами програми випробувань діапазон його значень 43–45 Н·м); частота обертання колінчастого вала коливалась від 2920–3155 об/хв (вимоги 2800–3200 об/хв.); діапазон потужності двигуна – 18,2–20 к.с. (вимоги 18–20 к.с.); витрата палива – 6,1–6,3 л/год (вимоги ≤8,5 л/год); температура охолоджувальної рідини – 76–87 ˚С (вимоги ≤105 ˚С); температура відпрацьованих газів дорівнювала 720–728˚С (вимоги ≤730 ˚С); температура повітря на вході в двигун +31–+34˚С (вимоги -18–+35 ˚С); тиск масла 5,4–5,5 кгс/см^2 (вимоги 4–6 кгс/см^2); тиск палива в системі 38–42 PSI (вимоги 33–43 PSI); кут випереджання запалювання 20,5˚–21,5˚ (вимоги 23˚–25˚); напруга живлення 14,3–14,4 В (вимоги 13,6–15,0 В); барометричний тиск повітря 101,4 кПа (вимоги 80–110 кПа); відносна вологість повітря склала 20–25% (вимоги ≤95%). Як результат першого етапу обкатки, усі параметри характеристик двигуна знаходились в межах допустимих, тому цей етап був пройдений успішно, як цього вимагала програма випробувань і можна було переходити до другого етапу – перевірки швидкісних характеристик двигуна.

Результати випробувань другого етапу представлені у вигляді графіків на рис. 3 та рис. 4. Ці графіки демонструють, що крива швидкості обертання (рис. 3) плавно зростає у всьому діапазоні швидкостей, починаючи з 1620 об/хв і закінчуючись 3950 об/хв. При цьому, крива крутного моменту, плавно знижується без явно виражених вершин і впадин. Максимальний крутний момент, в 153 Н*м виникає на початку розгону при швидкості обертання 1670 об/хв, а мінімальний – в 93 Н*м в кінці розгону.

Крива потужності має опуклу форму з максимумом 53,42 к.с. при швидкості обертання 3590 об/хв. На початку розгону потужність дорівнювала 36 к.с.; після проходження максимуму вона знижується до 51 к.с. наприкінці розгону.

Температура двигуна, як і температура газів, що відпрацювали, протягом розгону збільшуються з 62 до 79 і з 623 до 747°С, відповідно. При цьому після проходження точки максимальної потужності швидкість зростання температур зростає, але до кінця розгону асимптотично знижується.

Температура повітря на вході в двигун у процесі розгону також збільшувалася з 26 до 30°С, що було зумовлено роботою двигуна та невеликими розмірами приміщення. Знаходилася вона у необхідних для випробувань межах.

Крива витрати палива має опуклий вигляд з максимумом, що відповідає точці максимальної потужності, а дорівнює 12,2 кг/год (16,8 л/год).

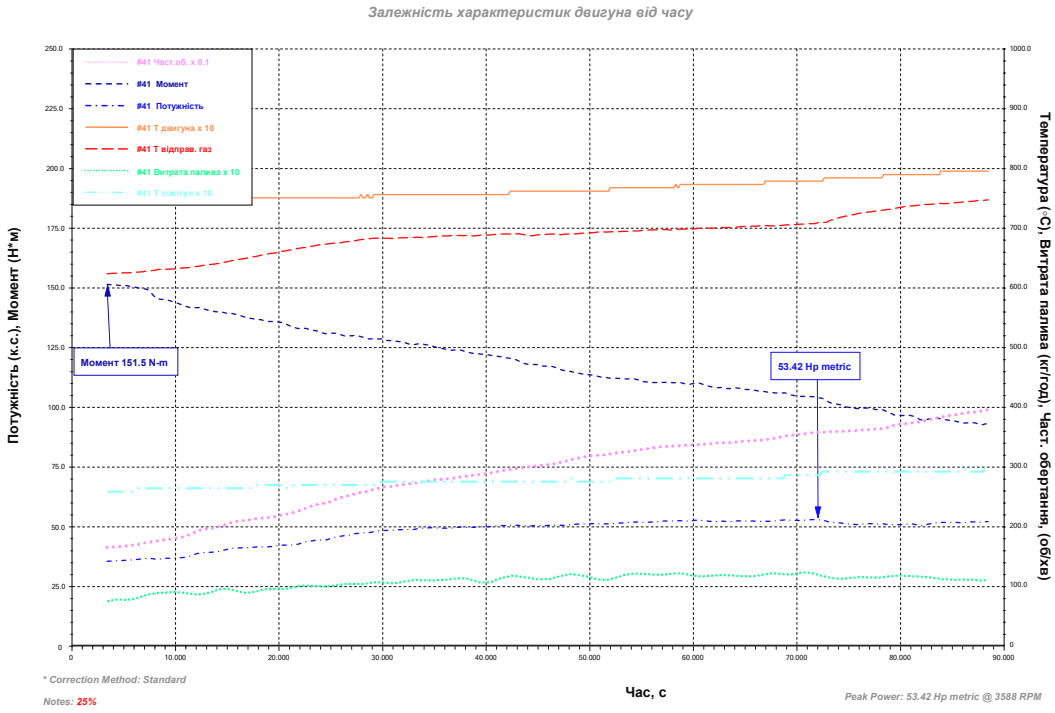


Рис. 3. Залежність характеристик двигуна від часу на 2-му етапі 1-го ступеня при положенні дросельної заслінки 25%

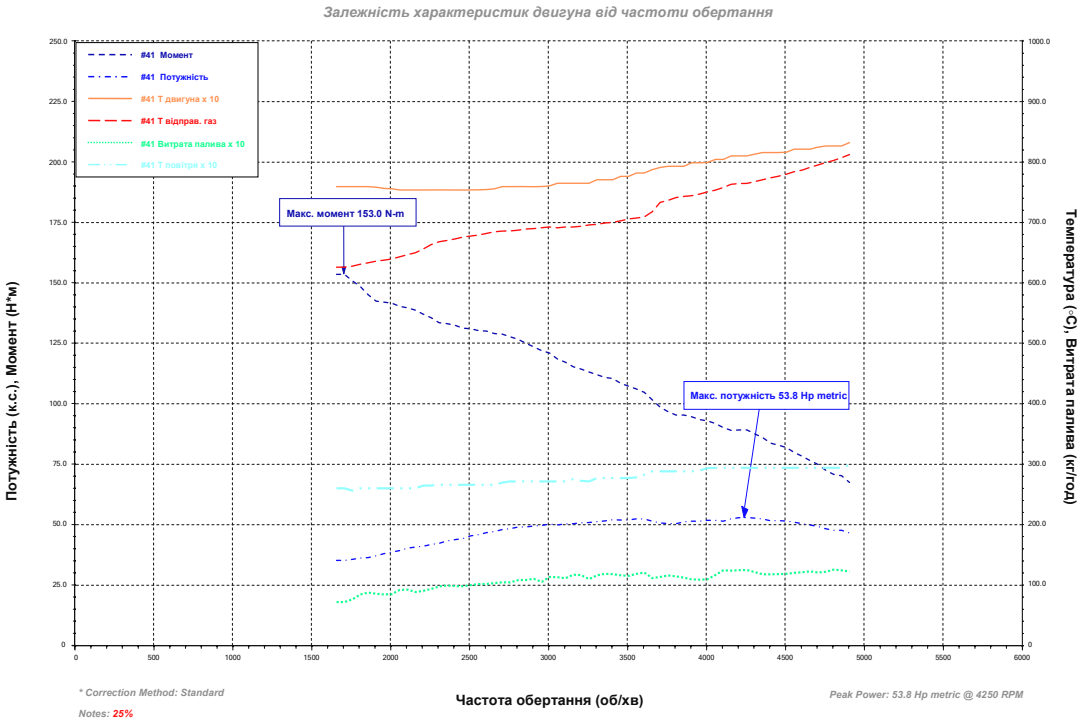


Рис. 4. Залежність характеристик двигуна від частоти обертання на 2-му етапі випробувань 1-ого ступеня при положенні дросельної заслінки 25%

Протягом розгону до максимальної потужності витрата палива зростає, після чого трохи знижується. Нерівномірність кривої витрати пояснюється значною похибкою використаних витратомірів.

Усі, отримані під час другого етапу випробувань, результати перебували у межах вимог. За графіками випробувань рис. 3–8 була складена таблиця 1, яка дозволяла наглядно порівняти фактичні параметри, що зняті під час випробувань, та вимоги, які висувались до цих параметрів в кожній з чотирьох ступенів другого етапу випробувань. Чотири ступеня випробувань відрізнялися встановленними положеннями дросельної заслінки: 1 ступень – 25%, 2 ступень – 49%, 3 ступінь – 75% та 4 ступінь – 100%. Максимальний крутний момент на колінчастому валу відповідно на кожному ступені випробувань складав: на 1-ому ступіні – 153 Н·м (вимоги **≥150** Н·м), на 2-ому ступіні – 182,5 Н·м (вимоги **≥180** Н·м); на 3-ому ступіні – 207,7 Н·м (вимоги **≥205** Н·м); на 4-ому ступіні – 224 Н·м (вимоги **≥223** Н·м). Частота обертання колінчастого валу при максимальному моменті була на 1-ому ступені – 1670 об/хв (межі вимог 1500 ÷2100 об/хв), на 2-ому ступені – 4120 об/хв (межі вимог 2500÷4500 об/хв), на 3-ому ступені – 3200 об/хв (межі вимог 2600÷4600 об/хв), на 4-ому ступені – 3140 об/хв (межі вимог 2600÷4600 об/хв). Максимальна потужність двигуна була теж в допустимих межах на кожному ступені другого етапу випробувань: 1-ий – 53,8 к.с. (вимоги **≥50** к.с.), 2-ий – 124,2 к.с. (вимоги ≥124 к.с.), 3-ий – 142,4 к.с. (вимоги **≥140** к.с.), 4-ий – 157,4 к.с. (вимоги **≥156** к.с.). Частота обертання колінчастого валу при максимальній потужності була на 1-ому ступені – 3390 об/хв (вимоги 3200÷4800 об/хв), на 2-ому ступені – 5560 об/хв (вимоги 5000÷6000 об/хв), на 3-ому ступені – 5650 об/хв (вимоги 5000÷6000 об/хв), на 4-ому ступені – 5800 об/хв (вимоги 5000÷6000 об/хв). Максимальна витрата палива складала на кожному ступені: 1 – 16,8 л/год (**≤20** л/год), 2 – 33,6 л/год (**≤35** л/год), 3 – 39,6 л/год (**≤40** л/год), 4 – 40,9 л/год (**≤42** л/год). Температура охолоджуючої рідини в процесі другого етапу дорівнювала: 1-шій ступінь – 79˚С (вимоги **≤105** ˚С), 2-ий ступінь – 91˚С (вимоги ≤105 ˚С), 3-ій ступінь – 90˚С (вимоги **≤105** ˚С), 4-ий ступінь – 89˚С (вимоги **≤105** ˚С). Температура відпрацьованих газів за показами приладів була 1 – 747˚С (вимоги **≤880** ˚С), 2 – 833˚С (вимоги **≤880** ˚С), 3 – 861˚С (вимоги **≤880** ˚С), 4–847˚С (вимоги **≤880** ˚С).

Температура повітря на вході в двигун, тиск масла, напруга живлення, барометричний тиск та відносна вологість оточуючого повітря див. рис. 3–8 та таблицю 1 теж були в межах норм.

В ході третього етапу випробувань визначення та оцінки холостого ходу двигуна внутрішнього

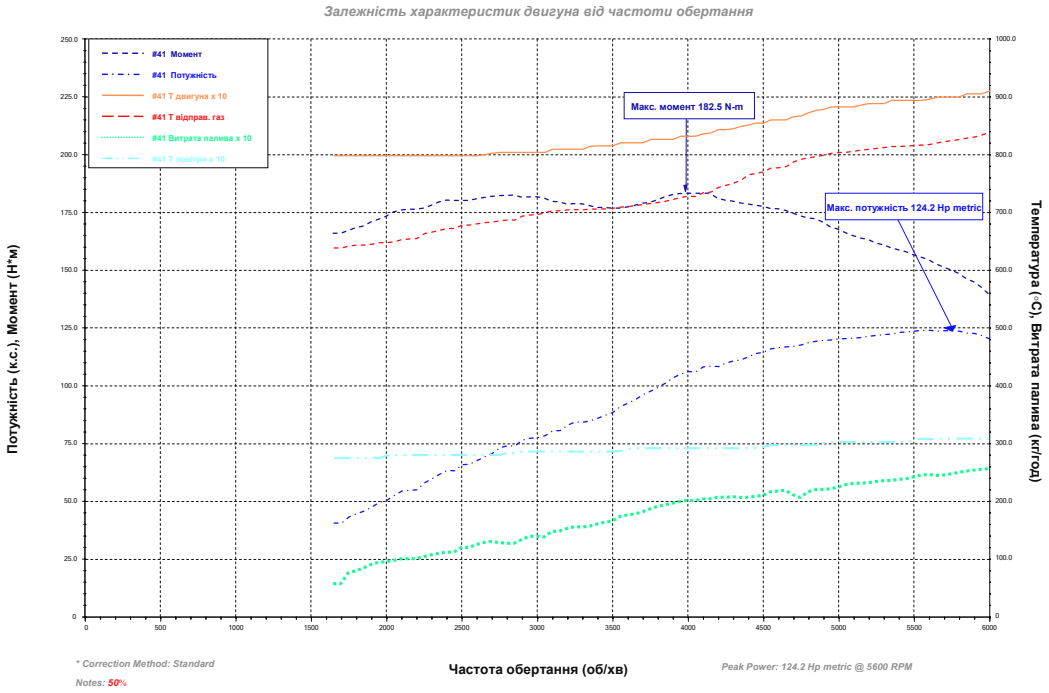


Рис. 6. Залежність характеристик двигуна від частоти обертання на 2-му етапі випробувань 2-ого ступеня при положенні дросельної заслінки 50%

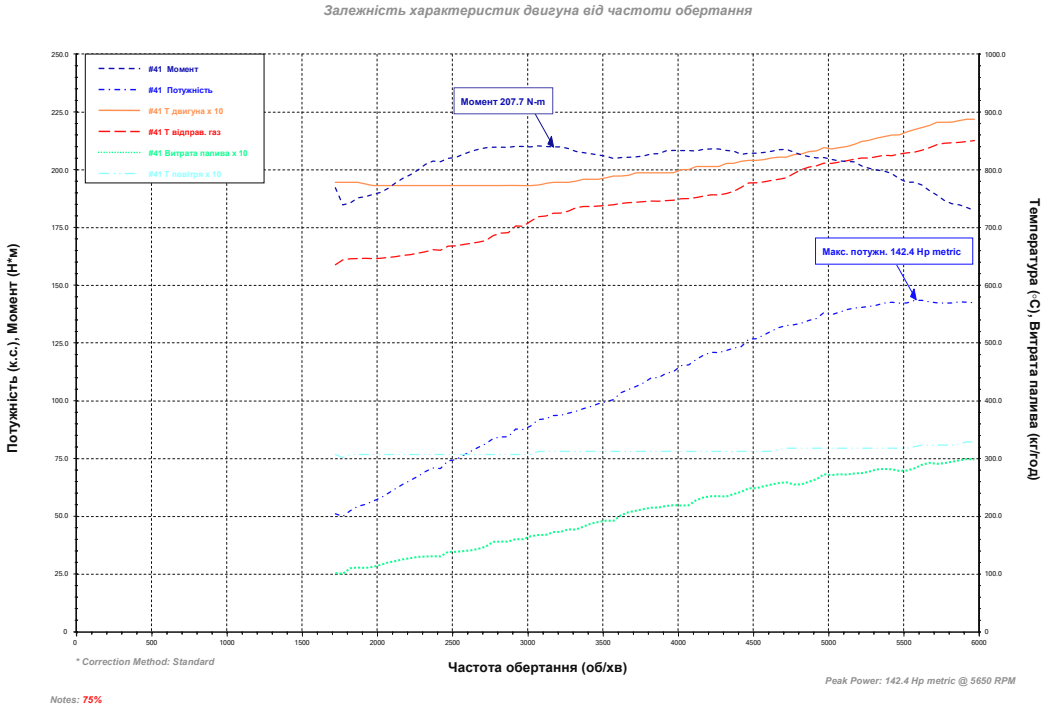


Рис. 7. Залежність характеристик двигуна від частоти обертання на 2-му етапі випробувань 3-ого ступеня при положенні дросельної заслінки 75%

згорання визначалися величини витрат палива при різній частоті обертання колінчастого валу: при 1000÷1650 об/хв витрати палива складали 2,0 л/год (норма не більше 2,5 л/год), при 1900÷2100 об/хв – 3,2 л/год (норма не більше 3,5 л/год), при 2400÷2600 об/хв – 5,2 л/год (норма не більше 5,5 л/год), при 2900÷3100 об/хв – 6,6 л/год (норма не більше 7,6 л/год), при 3400÷3600 об/хв – 9,1 л/год (норма не більше 10,0 л/год). Третій етап випробувань теж був успішно пройдений, т.я. витрата палива перебувала в межах вимог.

Таблиця 1

Параметри двигуна, що підлягають контролю та оцінці на етапі визначення та оцінки швидкісних характеристик двигуна

Ступінь,	Параметри													
	Положення дросельної заслінки, %	Максимальний крутний момент на колінчастому валу, Н·м	Частота обертання колін. вала при макс. моменті, об/хв	Макс. потужність двигуна, к.с	Частота обертання колін. вала при макс. потужності, об/хв	Максимальна витрата палива, л/год	Температура охолоджуючої рідини, °	Температура відпрацьованих газів, °	Температура повітря на вході в двиг., °	Тиск масла, кгс/см²	Тиск палива в системі, PSI	Напруга живлення, В	Барометричний тиск повітря, кПа	Відносна вологість повітря, %
1-ій ступінь														
Вимоги	**24,5÷25,5**	**≥150**	**1500÷ 2100**	**≥50**	**3200÷ 4800**	**≤20**	**≤105**	**≤880**	**-18÷+35**	**4,0÷6,0**	**33÷43**	**13,6÷15,0**	**80÷110**	**≤95**
Фактичні	25	153	1670	53,8	3390	16,8	79	747	25÷30	5,8	42	13,7÷14,3	101,6	41
2-ий ступінь														
Вимоги	**49,5÷50,5**	**≥180**	**2500÷ 4500**	**≥124**	**5000÷ 6000**	**≤35**	**≤105**	**≤880**	**-18÷+35**	**4,0÷6,0**	**33÷43**	**13,6÷15,0**	**80÷110**	**≤95**
Фактичні	49	182,5	4120	124,2	5560	33,6	91	833	27÷31	5,7	42	13,6#14,1	101,7	31
3-ій ступінь														
Вимоги	**74,5÷75,5**	**≥205**	**2600÷ 4600**	**≥140**	**5000÷ 6000**	**≤40**	**≤105**	**≤880**	**-18÷+35**	**4,0÷6,0**	**33÷43**	**13,6÷15,0**	**80÷110**	**≤95**
Фактичні	75	207,7	3200	142,4	5650	39,6	90	861	29÷33	5,97	42	13,9÷14,3	101,5	42
4-ій ступінь														
Вимоги	**99,5÷100**	**≥223**	**2600÷ 4600**	**≥156**	**5000÷ 6000**	**≤42**	**≤105**	**≤880**	**-18÷+35**	**4,0÷6,0**	**33÷43**	**13,6÷ 15,0**	**80÷110**	**≤95**
Фактичні	100	224,0	3140	157,4	5800	40,9	89	847	31÷34	5,94	42	14,0÷14,3	101,5	35

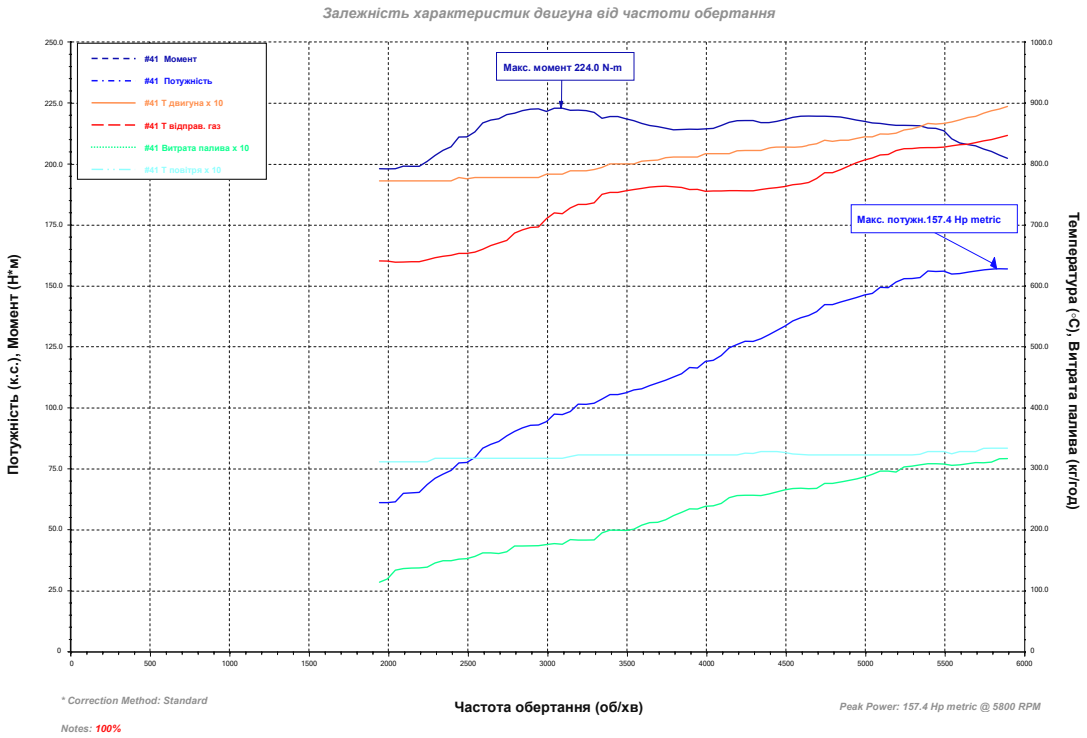


Рис. 8. Залежність характеристик двигуна від частоти обертання на 2-му етапі випробувань 4-ого ступеня при положенні дросельної заслінки 100%

Останній четвертий етап випробувань визначення нерівномірності роботи циліндрів був зафіксований в графічній формі на рис. 9 та рис. 10. Під час четвертого етапу спочатку працювали чотири циліндри при цьому Максимальний крутний момент на колінчастому валу $(M_к)_{\max}$ дорівнював 224 Н·м, частота обертання колінчастого валу двигуна при максимальному крутному моменті і всіх працюючих циліндрах – 3140 об/хв, потужність двигуна при максимальному крутному моменті і всіх працюючих циліндрах $N_{(M_к)\max}$ – 110 к.с. Потім відбувалось послідовне відключення циліндрів та визначались параметри. При відключенні першого циліндра частота обертів складала 2036 об/хв, зміна частоти обертів

$$\delta_{n_i} = \frac{n - n_i}{n} \cdot 100\%$$

дорівнювала 35,16%, крутний момент 149,5 Н·м, потужність двигуна N_{-i} – 43,3 к.с., умовна індикаторна потужність циліндрів $N_i = N_{(M\kappa)\max} - N_{-i}$ – 56,8 к.с., сумарна індикаторна потужність $N_\Sigma = \sum N_i$ =228 к.с., середня індикаторна потужність циліндрів $N_{ср.} = \frac{N_\Sigma}{4}$ =57 к.с., відхилення від середньої потужності

$$\delta_{N_i} = \frac{N_{ср} - N_i}{N_{ср}} \cdot 100\% = 0{,}42\%.$$

В випадку відключення другого циліндра частота обертів складала 2071 об/хв, зміна частоти обертів дорівнювала 34,04%, крутний момент 151,7 Н·м, потужність двигуна N_{-i} – 44,7 к.с., умовна індикаторна потужність циліндрів $N_i = N_{(M\kappa)\max} - N_{-i}$ – 56,2 к.с., відхилення від середньої потужності

$$\delta_{N_i} = \frac{N_{ср} - N_i}{N_{ср}} \cdot 100\% = 1{,}44\%.$$

Коли був відключений третій циліндр частота обертів складала 2024 об/хв, зміна частоти обертів дорівнювала 35,54%, крутний момент 148,5 Н·м, потужність двигуна N_{-i} – 42,8 к.с., умовна індикаторна потужність циліндрів $N_i = N_{(M\kappa)\max} - N_{-i}$ – 57,3 к.с., відхилення від середньої потужності

$$\delta_{N_i} = \frac{N_{ср} - N_i}{N_{ср}} \cdot 100\% = -0{,}53\%.$$

При відключенні четвертого циліндру частота обертів складала 2009 об/хв, зміна частоти обертів дорівнювала 36,02%, крутний момент 148 Н·м, потужність двигуна N_{-i} – 42,3 к.с., умовна індикаторна потужність циліндрів $N_i = N_{(M\kappa)\max} - N_{-i}$ – 57,8 к.с., відхилення від середньої потужності

$$\delta_{N_i} = \frac{N_{ср} - N_i}{N_{ср}} \cdot 100\% = -0{,}013\%.$$

За отриманими результатами на четвертому етапі була розрахована потужність механічних втрат $N_{втрат} = N_\Sigma - N_{(M\kappa)\max}$ = 118 к.с., умовний механічний

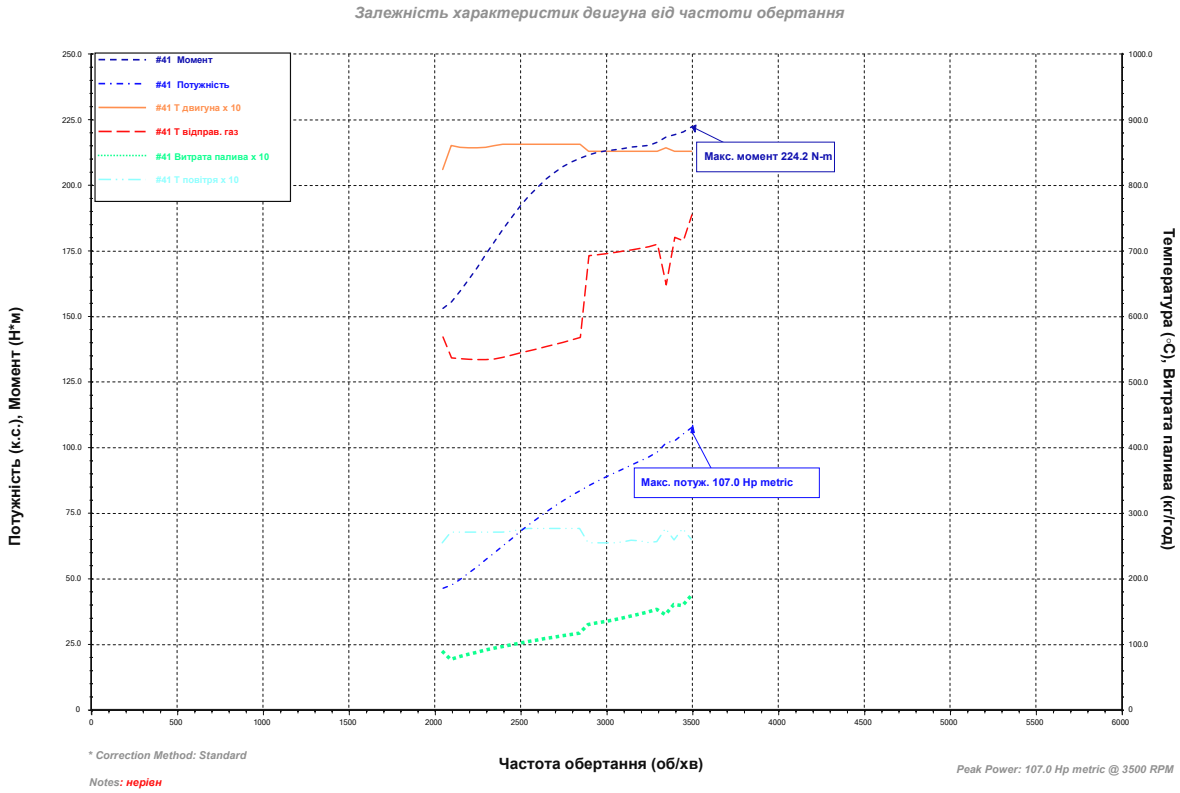


Рис. 9. Залежність характеристик двигуна від частоти обертання на 4-му етапі випробувань при нерівномірній роботі циліндрів

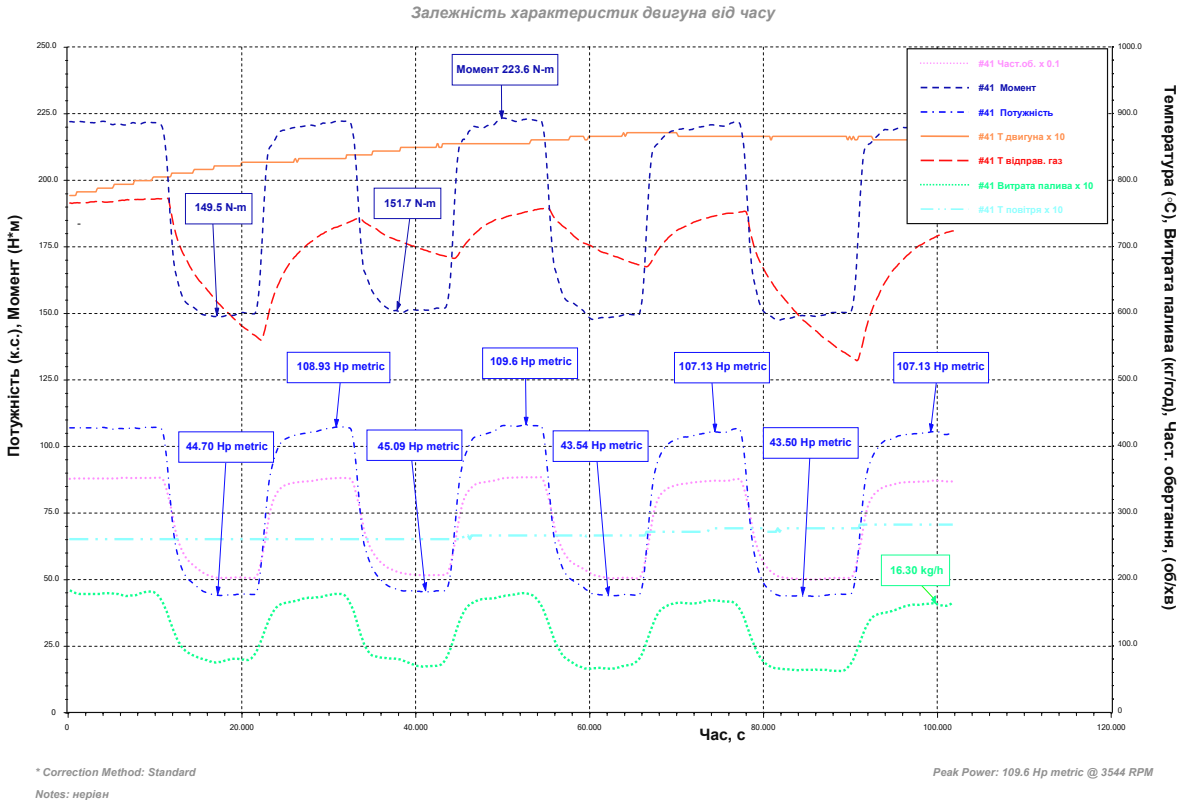


Рис. 10. Залежність характеристик двигуна від часу на 4-му етапі випробувань при нерівномірній роботі циліндрів

ККД $\eta = \frac{N_{(M_к)_{max}}}{\sum N_i}$=0,44, який за вимогами повинен був бути більшим за 0,37, та коефіцієнт рівномірності роботи циліндрів $\Delta = \frac{N_i}{(N_i)_{max}}$==0,973, норма для якого складала 0,95.

Висновки. В процесі проходження двигуном внутрішнього згорання випробувань згідно програми випробувань всі чотири етапи пройшли успішно. Як результат випробувань можна зробити висновок, що даний двигун можна встановлювати в малогабаритних літальних апаратах, а саме гелікоптерах. Даний тип двигуна пройшов етап обкатки та показав стабільні швидкісні характеристики, при нерівномірності роботи циліндрів параметри двигуна все одно знаходилися в допустимих межах, що дає можливість впевнено заявляти про надійність даного типу двигуна та є підставою для використання таких двигунів в малогабаритних гелікоптерах.

Список літератури:

1. Гащук П.М., Сичевський М.І., Домінік А.М. Про зміст поняття «Коефіцієнт корисної дії автомобіля». *Зб. наук. пр. «Вісник ЛДУ БЖД»*. 2016. № 14. С. 152–175.
2. Гащук П.Н. Энергетическая эффективность автомобіля. Львов : Свит, 1992. 208 с.
3. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни: підручник. Київ: Арістей, 2006. 476 с.
4. Гащук П.М., Нікіпчук С.В. Особливості теплотворення в двигуні внутрішнього згоряння. *Автомобільний транспорт.* Харків, 2018. № 42. С. 12–21. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2018.42.0.12
5. Gronowicz J. Ochrona środowiska w transporcie lądowym. *Szczecin: Wydawnictwo Politechniki Szczecinskiej*, 1996. 301 s.
6. Merkisz J. Ekologiczne aspekty stosowania silników spalinowych. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1995. 367 s.
7. Гащук П.М., Нікіпчук С.В., Богачик Ю. Натурно-машинні засоби в моделюванні термодинамічних процесів, що перебігають у двигунах внутрішнього згоряння. *Вісник Державного університету «Львівська політехніка» «Динаміка, міцність та проектування машин і приладів»*. 1998. № 354. С. 3–9
8. Гащук П., Нікіпчук С. Аналитическая аппроксимация топливных характеристик автомобильного двигателя. *Teka komisji naukowo-problemowej motoryzacji: «Konstrukcja, Badanja, Eksploatacja, Technologia pojazdów samochodowych I silników sralinowych». Kraków: Polska Akademia nauk oddział w Krakowie*, 2001. Nr 22. S. 127–134.
9. Чередніков В.М., Чередніков О.В. Моделювання, конструювання та випробування системи охолодження ДВЗ з метою підвищення її ефективності. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків : УкрДУЗТ, 2021. Вип. 198. С. 66–81. DOI: 10.18664/1994-7852.198.2021.256607
10. Чередніков В.М., Чередніков О.В., Гузик Д.В. Випробування вентилятора системи охолодження двигуна внутрішнього згорання гелікоптера в умовах жаркого клімату. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник*. 2021. Вип. 39. С. 54–61. DOI: 10.32347/2409-2606.2021.39.53-60
11. Гащук П., Богачик Ю. Аналітичні засоби моделювання процесів теплотворення-теплоспоживання в двигуні з яскровим запалюванням на ялових режимах його роботи. *Зб. наук. пр.: «Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів та автопоїздів». Львів: Західний науковий центр Транспортної академії України*, 1995. Т. 1. С. 34–51.
12. Чередніков В.М., Чередніков О.В. Підготовка до випробувань з створенням програми визначення характеристик двигунів внутрішнього згорання гелікоптера на лабораторному стенді. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2022. Том 33 (72) №5. С. 00–00. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.5/00

Cherednikov V.M., Cherednikova O.V. TESTING FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES OF THE HELICOPTER ON THE LABORATORY STAND

During the test, which is presented in this article, the reliability of the internal combustion engine of the helicopter was checked. In order to fully verify the performance of the engine, the engine must pass four stages of testing. All stages were done on the "PRO 800 DYNAMOMETER" motor stand, which is specially equipped for testing aircraft internal combustion engines. The stand includes a control console that helps the operator control the engine and change the load, and reduces the time of data registration and processing. The first stage of the test is the engine run-in, during which the engine parameters must correspond to certain values recorded in the engine test program. Only after the engine shows the necessary characteristics, it will

be possible to proceed to the next stage of the test. The second stage is characterized by a change in the speed characteristics of the engine and with them the parameters of the engine, i.e. maximum crankshaft torque, crankshaft rotation frequency, maximum engine power, maximum fuel consumption, exhaust gas temperature, and others. At the second stage, the test was done at four throttle positions: 25, 50, 75 and 100%. During the experiment, the stand recorded the necessary data in graphic form depending on the time and the frequency of rotation of the crankshaft of the engine. At the third stage of determining and evaluating the idling of the engine, fuel consumption was determined depending on the frequency of rotation of the crankshaft, while the frequency of rotation should be more than 1000 rpm. The fourth final stage was done with sequential disconnection of the engine cylinders. As a result of this stage, the total indicator power of the engine, the average indicator power of the cylinders, the power of mechanical losses, the conditional mechanical efficiency and the coefficient of uniformity of the cylinders were calculated. All stages were completed successfully, the characteristics of the engine corresponded to the requirements. The requirements for equipment, environment and fuel also completely coincided with the requirements for them during the experiments. In this scientific work, a laboratory test of the engine was done with a full analysis to confirm its efficiency.

Key words: *engine power, engine efficiency, fuel consumption, rotation frequency, exhaust gas temperature.*

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 620.9:339.9
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/27

Тесленко О.І.
Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

Куц Г.О.
Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

СТРУКТУРНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРЯМИ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПІДПРИЄМСТВАМИ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ

В статті наведені результати розрахунково – аналітичного дослідження основних джерел та обсягів викидів парникових газів (ПГ) технологічними виробництвами металургійної промисловості України. Чорна металургія відноситься до енергоємних галузей промисловості з найбільшими викидами ПГ: до 7% загальносвітових викидів ПГ продукується при виробництві чавуну та сталі (2019 р.). В Україні (2020 р.) чорна металургія спричинила майже 14% щорічних викидів ПГ в економіці країни (або майже 57% щорічних викидів ПГ в промисловості країни) та є визначальною галуззю промисловості щодо зменшення викидів ПГ: на неї припадає 88% від запланованого загального зменшення викидів ПГ в промисловості країни до 2030 р. Утворення двоокису вуглецю (CO_2), основного виду ПГ в чорній металургії, виникає по всьому технологічному ланцюгу металургійних процесів, як результат згорання органічних видів вуглецевмісного палива, а також окислення вуглецю та хімічного розпаду технологічної вуглецевмісної сировини та енергоносіїв, які надаються для здійснення виробничих процесів. Обраховані показники викидів CO_2 для металургійних виробництв (коксохімічне, доменне, киснево-конвертерне, електроплавильне та феросплавне) показали, що найбільші викиди CO_2 спричиняє доменне виробництво. Визначені структурні та технологічні напрями зменшення викидів ПГ підприємствами чорної металургії на найближче десятиліття. За базовою (традиційною) технологією виплавки чавуну без застосування заміщувачів коксу обсяги утворення та виходу CO_2 у доменному газі складають 995,2 кг CO_2/т чавуну. Застосування таких інноваційних технологій заміщення коксу в доменному виробництві, як вдування пиловидного палива або гарячого доменного газу зменшує обсяг викидів CO_2 до рівня 878,2 кг CO_2/т чавуну (зменшення 1,13 рази) та 534,8 кг CO_2/т чавуну (зменшення 1,86 разів), відповідно. Основним напрямком зменшення викидів CO_2 у сталеплавильних виробництвах є структурні зміни схем технологічних процесів. До найбільш ефективних у зниженні викидів CO_2 відноситься наступна технологічна схема: виплавка сталі в електродуговій печі з розкисленням і легуванням у піч-ковші та наступним розливанням сталі на машинах безперервного лиття заготівок з подальшим вогневим зачищенням і з безпосереднім надходженням заготівок на прокатні стани для одержання кінцевої продукції галузі (вилучення охолодження, складування та попереднього нагрівання заготівок у нагрівальних печах прокатного виробництва).

Ключові слова: *чавун, сталь, чорна металургія, парникові гази, викиди, декарбонізація, технології, структурні зміни.*

Постановка проблеми. Зменшення антропогенного впливу на довкілля є однією з головних проблем сталого розвитку людської цивілізації на сьогодні, так і на досяжну перспективу. Одним з напрямів запобігання змінам клімату внаслідок життєдіяльності людства є зменшення викидів парникових газів (ПГ) для обмеження парникового ефекту та поступового глобального зростання температури атмосферного повітря. Порівняльний огляд основних джерел за обсягами викидів ПГ енергоємними галузями промисловості в Україні та в світі показав, що чорна металургія відноситься до найбільших з них: до 7% загальносвітових викидів ПГ продукується при виробництві чавуну та сталі (2019 р.) [1]. В Україні (2020 р.) чорна металургія спричиняє майже

14% щорічних викидів ПГ в економіці країни (або майже 57% щорічних викидів ПГ в промисловості країни) та є визначальною галуззю промисловості щодо зменшення викидів ПГ: на неї припадає 88% від запланованого загального зменшення викидів ПГ в промисловості країни до 2030 р. у відповідності до Другого Національно-визначеного внеску України до Паризької угоди [2]. Наведені обставини та завдання обумовлюють актуальність наукових досліджень щодо визначення напрямів та технологічних заходів зменшення викидів ПГ у чорній металургії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню проблеми зменшення викидів ПГ технологічними виробництвами металургійної промисловості за останнє десятиліття присвячено значна кількість наукових праць провідних фахівців з чорної металургії: Сталинский Д. В., Демидик В. Н., Лісієнко В.Г., Тубольцев Л.Г., Шатоха В.І. та інші [3–9]. Міжнародною групою експертів із змін клімату розроблені керівні принципи із визначення викидів ПГ в металургійній промисловості [10]. Наведені дослідження оцінюють рівень викидів ПГ за існуючими технологіями металургійного виробництва та прогнозують зменшення викидів ПГ внаслідок впровадження новітніх технологій виробництва заліза, чавуну та сталі на перспективу до 2050 р. Однак в наведених роботах не досліджуються структурні та технологічні зміни при переході традиційної технологічної схеми металургійного виробництва до інноваційних низьковуглецевих технологій отримання сталі на найближче десятиліття, протягом якого аглодомена технологія виробництва чавуну буде залишатись переважаючою.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналітичний огляд основних джерел та обсягів викидів ПГ технологічними виробництвами металургійної промисловості України та визначення структурних та технологічних напрямів зменшення викидів ПГ підприємствами чорної металургії на найближче десятиліття. В роботі застосовувався розрахунково-аналітичний метод проведення досліджень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Чорна металургія залишається провідною галуззю в економіці України, яка у 2020 р. за світовим рейтингом держав у виробництві сталі займала 11 місце, а за виробництвом чавуну посідала дев'яте місце [11]. У 2020 р. підприємствами галузі вироблено, тис. т: агломерату – 31913; коксу – 9668; чавуну – 20423; сталі – 20616 і прокату – 18440, відповідно, а також спожито паливних ресурсів 16723 тис. т у.п. та електроенергії 23128,0 млн кВт·год [12–14].

Утворення двоокису вуглецю (CO_2) виникає по всьому технологічному ланцюгу металургійних процесів, як результат згорання органічних видів вуглецевмісного палива, а також окислення вуглецю та хімічного розпаду технологічної вуглецевмісної сировини та енергоносіїв, які надаються для здійснення виробничих процесів. До металургійних виробництв стосовно утворення CO_2 в значних обсягах відноситься доменний процес внаслідок використання значної частки органічного вуглецевмісного палива до загальної повної технологічної енергоємності чавуну та декарбонізації сировини в цьому процесі: коксівного вугілля, агломерату, окатишів залізної руди, вапняку та інших технологічних домішок. У технологічних процесах виробництва сталі (киснево-конвертерні, мартенівські та електросталеплавильні процеси) додатково до основних джерел викидів CO_2 відносяться процеси вигорання вуглецю чавуну (відновлення заліза), який у складі сировини визначає зміни процесів декарбонізації в цих технологічних переділах виробництва сталі.

В технологічних процесах чорної металургії утворюються парникові гази у вигляді двоокису вуглецю (CO_2) і метану (CH_4). Останній є частиною горючих вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) і згорає при їх використанні. В табл. 1 наведені показники споживання вуглецевмісних енергоресурсів та сировинних матеріалів за окремими технологічними виробництвами чорної металургії. З табл. 1 видно, що такі виробництва як аглодоменне, коксохімічне та мартенівське споживають більшою мірою вуглецевмісні види палива, згорання яких обумовлює викиди CO_2, а для киснево-конвертерного та електроплавильного переважно споживається вуглецевмісна сировина: рідинний та переробний чавун, сталевий скрап тощо.

Прийняті значення споживання енергоресурсів та сировини відповідають даним робіт [12, 18] щодо визначення повної технологічної енергоємності продукції чорної металургії в Україні за 2018 р. Для таких металургійних виробництв, як коксохімічне і аглодоменне до основних джерел утворення CO_2 відносяться первинні види палива: кокс, кам'яне коксове вугілля та природний газ, котрі в процесі термохімічної трансформації утворюють побічні продукти (горючі ВЕР), а для коксохімічного виробництва первинний горючий продукт є коксовий газ. Зазначені побічні продукти використовуються в основних чи допоміжних виробництвах галузі. В табл. 2 надано хімічн-

Таблиця 1

Показники споживання енергоресурсів та сировини в окремих виробництвах чорної металургії [12]

	Одиниці виміру	Виробництво					
		коксохімічне	агломераційне	доменне	мартенівське	киснево–конвертерне	електро-плавильне
1. Енергоресурси:							
– кокс	кг у.п.	–	–	598,1	–	–	–
– коксик	кг у.п.	–	21,0	–	–	–	–
– природний газ	куб. м	–	9,5	110,0	–	–	7,8
– паливо (суміш коксового і природного газу)	кг у.п.	140,9	29,0	20,8	126,9	–	–
2. Сировина:	–	–	–	–	–	–	–
– чавун доменний рідкий	кг	–	–	–	625,0	850,0	–
– чавун переробний	кг	–	–	–			230,0
– скрап сталевий	кг	–	–	–	468,0	270,0	850,0
– вугілля коксове	кг	1480,0	–	–	–	–	–
– агломерат	кг	–	–	1000,0	–	–	–
– окатиші	кг	–	–	461,0	–	–	–
– вапняк + вапно	кг	–	192,0+54,0	42,0+0	50,0+0	0+60,0	0+30,0
– електроди	кг	–	–	–	–	–	2,0

Таблиця 2

Склад та технічні параметри побічних горючих газів (доменний і кисневo-конвертерний) та первинного горючого коксохімічного газу [17, 18]

Склад та технічні параметри	Одиниці виміру	Доменний газ при дутті, збагачений природним газом та киснем, осушений	Кисневo-конвертерний газ	Коксохімічний газ, очищений (поворотний)
1. Хімічний склад:	об'ємний %			
CO_2	–"–	13,9	11,5	2,0÷2,3 включно. H_2S
CO	–"–	31,8	74,0	6,0÷6,8
H_2	–"–	17,4	0,3	57,0÷60,0
CH_4	–"–	0,4	–	24,0÷26,0
N^2	–"–	36,5	13,1	3,0÷4,0
C_2H_4		–	–	2,2÷0,5
Пил	г/м^3	0,02÷1,0	64,0	до 15,0
2. Теплота згорання	ккал/м^3	1435,0	2250,0	4000÷4200
3. Вихід газу	м^3/т основного продукту	сухий (1880÷1900) м^3 на 1т чавуну	(70÷100) м^3 на 1 т сталі	(380÷400) м^3 на 1 т коксу

ний склад побічних енергоресурсів, які ще до згорання мають вміст CO_2 за об'ємним виміром: доменний газ – 13,9%, кисневo-конвертерний газ – 11,5% і для яких CO_2 додатково зростає при їх згоранні у технологічних процесах. Внаслідок цього сумарний їх вміст визначається показником максимального сумарного вмісту CO_2 та сірчаного ангідриту (SO_2) у сухих продуктах згорання ($RO_2^{макс}$ в %) і розраховується за методичними алгоритмами, наведеними у [17].

Результати розрахунку складу продуктів повного згорання при стехіометричному обсязі повітря для деяких видів палива надано в табл. 3.

Високе значення в показниках триатомних газоподібних продуктів згорання палива RO_2 для доменного газу (RO_2 = 24 %) пов'язано

Таблиця 3

Склад продуктів згорання деяких видів палива в об'ємному вимірі [17]

Види палива	Хімічний склад, %			
	RO_2	у т.ч. SO_2	H_2O	N_2
1. Кокс донецький	19,0	0,2	8,0	73,0
2. Кам'яне вугілля : тип				
– пісний донецький	18,0	0,2	7,0	75,0
– жирний донецький	17,0	0,2	9,0	74,0
– довгоплавильний донецький	17,0	0,5	11,0	72,0
3. Газ природний	10,0	0	20,0	70,0
4. Газ доменний	24,0	0,2	3,0	73,0
5. Газ коксовий	8,0	–	23,0	69,0
6. Газ скраплений	12,0	0	15,0	73,0
7. Газ киснево–конвертерний	8,6	–	2,0	89,4
8. Газ феросплавний		–	–	–
9. Газ електроплавильних печей	6,3	–	–	–

з окисленням окису вуглецю (CO) при відновленні заліза ($CO + FeO = Fe + CO_2$) та декарбонізації вапняку ($CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$), які входять до складу аглодоменної шихти.

Доменний газ використовується на підприємствах галузі для нагрівання повітря дуття для доменних печей (до 45%), на електросилових станціях (до 40%) і може надходити для обігріву коксових печей або нагрівальних печей прокатного виробництва (до 15 %) [15,17].

Киснево-конвертерне виробництво має періодичний режим роботи і тому технічні характеристики конвертерного газу змінюються у процесі продування розплавленого металу киснем в періоди, коли його використовують (відбирають) при умовах вмісту не менше 60 % CO. На вітчизняних металургійних підприємствах традиційно застосовується тільки фізичне тепло та хімічна енергія (при допалюванні) конверторного газу в котлах – утилізаторах виключно для виробництва теплової енергії (окрім Алчевського металургійного комбінату, на якому цей газ очищується та збирається в спеціальний газгольдер об'ємом 100 000 куб. м та спрямовується до парогазової електростанції або до газового господарства підприємства для заміщення природного газу).

Коксохімічний газ є продуктом піролізного процесу коксування вугілля. Його фізико-хімічні характеристики залежать від складу вугілля і режиму проходження технологічного процесу коксування (наявність частки летких речовин, вологості та зольності вугілля, температури та швидкості процесу коксування). Використовується коксовий газ на власні потреби коксохімічних підприємств і профіцитні залишки (до 10 % загального обсягу) надходять для синтезу аміаку з наступним поверненням його до постачальника.

В процесі виплавки сталі в електродугових печах (ЕДП) утворюється відхідний газ в результаті вигорання вуглецю металевої шихти, вуглецевмісних флюсів та палива у вигляді коксу, який в незначних обсягах подається для потужних електропечей. Теплота згорання відхідних газів Q^P_H дорівнює 2000 ккал/м^3 , вміст CO знаходиться в межах 60–65 % (по об'єму), обсяг виходу газу складає 50–60 м^3/т сталі, але з урахуванням всмоктування зовнішнього повітря, обсяг збільшується в 10–15 разів (500–700 м^3/т) [20, 21].

Феросплави у вітчизняній чорній металургії виплавляються в основному в електродугових печах. При виплавці доменних феросплавів утворення вторинних горючих газів не відрізняється від процесу виробництва чавуну, а в електропечах відбувається окис вуглецю коксику, який застосовується в технологічному процесі як складова металевої шихти. Вміст CO у феросплавних газах коливається в межах 65–90 % (об'ємних) при теплоті згорання 2000–2700 ккал/м^3. Обсяг виходу феросплавного газу у закритих електропечах складає 940–960 м^3/т феросплаву, використовується як паливо у власних котельних установках феросплавних підприємств [21].

Зазначені горючі гази відносяться до основних джерел CO_2 і використовуються на усіх переділах технологічних процесів кінцевих видів продукції для окремих видів металургійного виробництва. Крім того, вторинні горючі гази також використовуються в додаткових виробництвах, таких як виробництво електричної та теплової енергії, стисненого повітря, кисню, інертних газів, підготовці сировини і матеріалів та інше. Тому у визначенні обсягів утворення CO_2 з метою виключення подвійного рахунку значення обсягів викидів CO_2 віднесено до одиниці продукції того виробництва,

в якому вони утворились, а саме до тонни чавуну, коксу, сталі та феросплаву (табл. 4).

При порівняльному аналізі даних табл. 4 можна зробити висновок, що серед розглянутих виробництв до найбільших по утворенню та викидів CO_2 відноситься доменне виробництво, обсяг викидів CO_2 для якого складає 887,67 кг CO_2/т чавуну, наступним є феросплавне виробництво з викидів 151,83 кг CO_2/т феросплавів. Щодо сталеплавильних виробництв слід відмітити значно менші питомі обсяги утворення та викидів CO_2, які складають для киснево-конвертерного виробництва 14,45 кг CO_2/т сталі, електросталеплавильного виробництва 6,23 кг CO_2/т сталі.

Проведене визначення основних джерел викидів CO_2 по всьому ланцюгу проходження технологічного процесу кінцевої продукції галузі та обсягів утворення і питомого виходу CO_2 на одиницю продукції окремих виробництв показало, що металургійна галузь відноситься до однієї з самих крупних джерел викидів CO_2, особливо це стосується аглодоменного виробництва. В цілому чорна металургія потребує новітніх технологій екологічного захисту від викидів ПГ та структурних змін схем технологічних процесів по використанню крупних електродугових печей, позапічних методів рафінування, застосування машин безперебійного лиття заготівок та вогневого зачищення, що дозволяє збільшити виробництво сталі та прокату і сприятиме зниженню викидів ПГ.

Слід відмітити можливість широкого впровадження новітніх апробованих технологій в доменному виробництві чавуну, до яких відносяться:

– вдування пиловугільного палива (ПВП) у доменні печі в обсязі до 185 кг/т чавуну та до 270 кг/т чавуну з інжекцією концентрату енергетичного вугілля;

– вдування відновлюваного (доменного) газу.

За даними роботи [22] застосування як замінювача скіпового коксу доменним газом дозволяє знизити його витрати на 30 % і підняти продуктивність доменної печі на 20–25 % порівняно з використанням в якості заміщувача природного газу. Але зазначена технологія потребує додаткових витрат теплової енергії та хімічних сорбентів (моностаноламіна або металона) для проведення очищення доменного газу від CO_2 до 1,0–1,5 % за обсягом його вмісту.

Зазначені технології частково замінили технологію по вдуванню природного газу і впроваджуються на вітчизняних меткомбінатах (Донецький металургійний завод, Алчевський металургійний комбінат, «Запоріжсталь» та інших).

Із використанням вихідних даних з робіт [23–25] виконані розрахунки щодо визначення обсягів викидів CO_2 для різних технологій заміщення вуглецевмісного коксу іншими менш вуглецевмісними видами палива в доменному виробництві (табл. 5).

Показником порівняння технологій щодо ефективності зменшення викидів ПГ доменними печами прийнято питомий обсяг викидів CO_2 на 1 т чавуну, який розраховується за алгоритмом:

$$G_{CO_2} = V_{д.г.} \cdot (RO_2 - SO_2) \cdot \gamma_{CO_2}, \text{ кг/т} \qquad (1)$$

де $V_{д.г.}$ – обсяг виходу доменного газу, м^3/т чавуну;
RO_2 – сумарний вміст триатомних газів (CO_2 та сірчаного ангідриту (SO_2)) при згоранні сухого доменного газу (в об'ємних одиницях, приймається за табл. 3);
SO_2 – вміст SO_2 при згоранні доменного газу (в об'ємних одиницях, приймається за табл. 3);

Таблиця 4

Обсяги викидів CO_2 технологічними виробництвами чорної металургії, які обумовлені утворенням та використанням горючих газів

Найменування технологічного виробництва	Усереднений обсяг утворення горючого газу, м^3/т продукції	Сумарний вміст CO_2, $(RO_2^{max}\text{-}SO_2)$, об'ємні %	Повний обсяг викидів CO_2	
			у м^3/т продукції	у кг/т продукції
1. Коксохімічне	390,0	8,0	31,2	61,68
2. Доменне	1890,0	23,8	449,0	887,67
3. Виробництво сталі:				
– киснево-конвертерна	85,0	8,6	7,3	14,45
– електроплавильне, на стальному скрапі	50,0	6,3	3,15	6,23
4. Феросплавне	960,0	8,0	76,8	151,83

γ_{CO_2} – питома вага CO_2 в кг/м^3 (прийнято γ_{CO_2}=1,977 кг/м^3 доменного газу).

Обсяг виходу доменного газу в м^3/т чавуну розраховується [21]:

$$V_{д.г.} = \frac{к \cdot (C_к \times G_к + C_в \times G_в) + C_т \times G_т + 100 \cdot C_г \times V_г - 1000 \cdot C_ч}{0,536 \cdot (CO_2 + CO + CH_4)}, \text{ м}^3/\text{т} \quad (2)$$

де *к*– коефіцієнт, який враховує втрати вуглецю у доменному процесі (у розрахунках к прийнято рівним 0,985 [21]);

$C_к$, $C_в$, $C_т$, $C_г$, $C_ч$ – вміст вуглецю відповідно у коксі, вапняку, твердому паливі (на суху масу), газу і чавуну, у вагових %;

CO_2, CO, CH_4 – вміст CO_2, CO, CH_4 у доменному газі, у об'ємних %;

$G_к$, $G_В$ – питомі витрати сухого скіпового коксу і вапняку (прийнято 234 кг/т чавуну з урахуванням вмісту вапняку в агломераті), кг/т;

$G_т$– питомі витрати твердого чи рідинного палива, які вдуваються в доменну піч, кг/т;

$V_г$ – питомі витрати газоподібного палива (природного, доменного чи іншого, які вдуваються у доменну піч), м^3/т.

Вміст вуглецю в газоподібному паливі визначається за алгоритмом [17, 19]:

$$C_г = \frac{0,536}{100} \cdot (CO + CO_2 + \sum m \cdot C_m \times H_m), \text{ кг/м}^3; \quad (3)$$

де CO, CO_2 та C_mH_m – вміст CO, CO_2 та вуглеводнів у газоподібному паливі, у об'ємних %.

Порівняльний аналіз розрахованих даних показників оцінки ефективності технологій, які застосовуються у доменному виробництві для заміщення коксу, свідчить, що до найбільш прийнятних до реалізації відноситься технологія вдування гарячого доменного газу. При даній технології практично вдвічі зменшуються питомі витрати коксу на тонну чавуну і, відповідно, обсяг викидів зменшується до 534,8 кг CO_2/т чавуну порівняно 995,2 кг CO_2/т чавуну при здійсненні виробництва чавуну за застарілим технологічним процесом (табл. 5). За результатами розрахункового аналізу можна зробити висновок, що до основного джерела утворення CO_2 в доменному процесі відноситься скіповий кокс, обсяг якого залежить не тільки від впровадження технологій його заміщення, але й від таких показників, як вміст заліза у металевій шихті (до 60–62 %), вдування кисню (до 35%), підвищення температури повітря доменного дуття (до 1200–1250^{0}С).

Важливим напрямом у зменшенні викидів CO_2 для металургійної галузі слід віднести структурні зміни у виробництві сталі, технологічні процеси яких мають безпосередню залежність від кількості чавуну, спожитого як сировина. За даними робіт [18, 21, 23] для виплавки сталі киснево-конвертерним процесом потрібно в середньому 600 кг розплавленого чавуну на тонну сталі, для електроплавильного – до 130 кг передільного чавуну. Повний обсяг викидів CO_2 у електродуговій печі у 2 рази нижчий, ніж у кисневих конвертерів (табл. 4). Така різниця в викидів CO_2 обумовлена тим, що виплавка сталі киснево-конвертерним способом має значно більше споживання чавуну, як сировини, порівняно з електроплавильним способом, що обумовлює більший обсяг утворення CO_2 при відновленні заліза чавуну.

Основним напрямком зменшення викидів CO_2 у сталеплавильних виробництвах є структурні зміни схем технологічних процесів з підвищен-

Таблиця 5

Порівняні показники ефективності зменшення викидів CO_2 при застосуванні технологій заміщення коксу при аглодоменному виробництві чавуну

Перелік технологій заміщення коксу	Прямі витрати		Вихід доменного газу у м^3/т чавуну	Обсяг викидів CO_2		Частка до п. 1, %
	коксу, кг/т чавуну	заміщувачів коксу		у м3/т чавуну	у кг/т чавуну	
1. Технологія без використання природного газу	507,0	–	2115,4	503,40	995,2	100,0
2. Базова технологія з вдуванням природного газу	409,0	природний газ 97–113 м^3	1937,1	461,0	911,4	91,5
3. Технологія з вдуванням вугільного пилу	294,0	Вугільний пил 185–135 кг	1866,7	444,3	878,3	88,2
4. З інжекцією концентрату та енергетичного вугілля	227,0	Вугільний пил 270–197 кг	1831,8	435,9	861,8	86,6
5. Вдування гарячого доменного газу	245,0	163 м^3	1136,6	270,5	534,8	54,1

ням енергоефективності та зменшенням споживання вуглецевмісних енергоресурсів [12, 18]. До найбільш ефективних у зниженні викидів CO_2 відноситься наступна схема: виплавка сталі в електродуговій печі з розкисленням і легуванням у піч-ковші та наступним розливанням сталі на машинах безперервного лиття заготівок з подальшим вогневим зачищенням та з безпосереднім надходженням заготівок на прокатні стани для одержання кінцевої продукції галузі (вилучення охолодження, складування та попереднього нагрівання заготівок у нагрівальних печах прокатного виробництва).

Висновки. Чорна металургія залишається провідною галуззю в економіці України, яка у 2020 р. за світовим рейтингом держав у виробництві сталі (20616 тис. т) займала 11 місце, а за виробництвом чавуну (20423 тис. т) посіла дев'яте місце.

При виробництві чавуну та сталі продукується до 7% загальносвітових викидів ПГ. В Україні чорна металургія спричиняє майже 14% щорічних викидів ПГ в економіці країни (або майже 57% щорічних викидів ПГ в промисловості країни) та є визначальною галуззю промисловості щодо зменшення викидів ПГ: на неї припадає 88% від запланованого загального зменшення ПГ в промисловості країни до 2030 р.

Обраховані показники викидів CO_2, як єдиного суттєвого виду парникових газів у чорній металургії, для таких виробництв: коксохімічне доменне, киснево-конвертерне, електроплавильне, феросплавне, показали, що найбільше викидів CO_2 спричиняє доменне виробництво.

За базовою (традиційною) технологією виплавки чавуну без застосування заміщувачів коксу обсяги утворення та виходу CO_2 у доменному газі складає 995,2 кг CO_2 на тонну чавуну. Застосування таких інноваційних технологій заміщення коксу в доменному виробництві, як вдування пиловидного палива або гарячого доменного газу зменшує обсяг викидів CO_2 до рівня 878,2 кг CO_2/т чавуну (зменшення 1,13 рази) та 534,8 кг CO_2/т чавуну (зменшення 1,86 разів), відповідно.

Основним напрямком зменшення викидів CO_2 у сталеплавильних виробництвах є структурні зміни схем технологічних процесів. До найбільш ефективних у зниженні викидів CO_2 відноситься наступна схема: виплавка сталі в електродуговій печі з розкисленням і легуванням у піч-ковші та наступним розливанням сталі на машинах безперервного лиття заготівок з подальшим вогневим зачищенням та з безпосереднім надходженням заготівок на прокатні стани для одержання кінцевої продукції галузі (вилучення охолодження, складування та попереднього нагрівання заготівок у нагрівальних печах прокатного виробництва).

Список літератури:

1. Decarbonization Pathways for Steel and Cement Industries. URL: https://cdn.ihsmarkit.com/www/pdf/0622/Infographic---Decarbonization-Pathways-for-Steel-and-Cement-Industries.pdf

2. Презентація сценаріїв, політик та інвестицій до НВВ2. Засідання Робочої групи з питань розробки другого Національно-визначеного внеску України до Паризької угоди:обговорення політик та заходів. м. Київ, Україна, 26 листопада 2020 р. URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/Zmina_klimaty/26.11.2020%20презентація%20сценаріїв,%20політик%20та%20інвестицій%20до%20НВВ2.pptx

3. Сталинский Д. В., Литвиненко В. Г., Каневский А. Л., Андреева Т. А. Особенности и прогнозирование эмиссии парниковых газов на металлургических предприятиях Украины. *Металл и горнорудная промышленность*. 2010. № 2. С. 239–243.

4. Демидик В. Н. Парниковый эффект и производство стали. *Металл и литьё Украины.* 2011. № 5 (216). С. 29–33.

5. Лисиенко В.Г., Чесноков Ю.Н., Лаптева А. В. Энергоемкость и эмиссия CO_2 различных сочетаний переделов при производстве стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 6. С. 105–111.

6. Тубольцев Л.Г., Падун Н.И., Горохова В.А. Влияние энергетических затрат металлургического производства на выбросы парниковых газов. *Экология и промышленность*, 2015. Том 4. С. 11–16.

7. Шатоха В.И., Рогоза В.М. Устойчивое развитие черной металлургии в контексте предотвращения изменения климата./ Управление устойчивым развитием в условиях переходной экономики. Монография. Книга 2 // Изд-во: НГУ-БТУ. 2016. С. 148–159.

8. Material Economics (2019), Industrial Transformation 2050: Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry . University of Cambridge for Sustainability Leadership, Cambridge, United Kingdom.

9. Koolen, D. and Vidovic, D., Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners, Joint Research Centre. EUR 31112 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg,, 2022, 35 p. doi:10.2760/170198

10. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 Том 3: Промышленные процессы и использование продуктов Глава 4: Выбросы металлургической промышленности https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/3_Volume3/V3_4_Ch4_Metal_Industry.pdf

11. World Steel in Figures. World Steel Association. 2021. 32 p. URL: https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2021/world-steel-in-figures-2021-now-available/

12. Куц Г.О., Тесленко О.І. Прогнозна оцінка повної технологічної енергоємності продукції чорної металургії України за виробничими схемами до 2040 року. *Проблеми загальної енергетики*. 2021. вип. 2(65). С. 44–52. DOI: https://doi.org/10/15407/pge2021.01.060

13. Про основні показники роботи паливно-енергетичного комплексу України у 2020 році. ГО «Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України»// К. : Вид-во НТСЕУ «Енергоінформ». 2021. № 592. 13 с.

14. Маляренко О.Є., Станиціна В.В., Куц Г.О. Прогнозування попиту на паливно-енергетичні ресурси для енергоємних видів продукції з урахуванням потенціалу енергозбереження до 2040 року. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. Вип. 2 (57). С. 13–20. URL: https://doi.org/10.15407/pge2019.02.013

15. Назюта Л.Ю., Харахулах В.О. Структура энергопотребления доменного производства. *Метал и литье в Украине*. 2009. № 3. С. 33–69.

16. Большаков В.И., Тубольцев Л.Г. Состояние и перспективы развития черной металлургии Украины на основе энергосберегающих технологий. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 2. С. 1– 5.

17. Равич М.Б., Дворин С.С., Ленков А.Я., Певзнер С.И. Металлургическое топливо. Справочник. М.: Изд-во «Металлургия». 1965. 471 с.

18. Куц Г.О., Тесленко О.І. Методичні положення щодо розподілу повної технологічної енергоємності між окремими видами продукції багатопродуктових виробництв. *Проблеми загальної енергетики*. 2020 . вип. 4 (63). С. 58–62. DOI: https://doi.org/10.15407/pge2020.04.058

19. Куц Г.О., Галіновський Є.І., Мельник В.І. Калорійні еквіваленти для перерахунку різних видів палива з натуральних одиниць на умовні. *Проблеми загальної енергетики.* 2004. № 11. С. 60–64.

20. Справочно-информационный фонд к схемам теплоснабжения промышленных узлов. М.: ВНИПИЭнергопром. 1983. 287 с.

21. ДСТУ 4369:2005 Енергозбереження. Чорна металургія. Ресурси енергетичні вторинні. Методика визначення показників виходу та використання. [Чинний від 2006-01-01]. К. : Держспоживстандарт України. 2006. 24 с. (Національний стандарт України).

22. Грановский Б.М., Кульченко В.В., Мильграм Т.И., Шейнфайн Ф.И. Сокращение энергозатрат на очистку от CO_2 колошникового газа при вдувании восстановительных газов в доменную печь / Использование вторичных энергоресурсов и охлаждение агрегатов в черной металлургии // Тематический отраслевой сборник. № 7. М. : Металлургиздат. 1978. С. 27–32.

23. Ярошевский С.Л., Афанасьев З.К., Кузин А.В. К вопросу эффективности использования пылеугольного топлива в доменных печах ОАО «Азовсталь» // Сб. трудов научно-проект. конф., Донецк. ДонНГУ. 2007. С. 280–285.

24. Шаповалова Н.Г., Давиденко П.В., Еремка О.В. Проекты промышленного использования и проекты внедрения установок вдувания пылеугольного топлива в горн доменных печей // Сб. докладов научно-проект. конф., Харьков, Энергосталь. 2007. С. 313–317.

25. Катаев А.А. Опыт и перспективы энергосбережения ресурсоемких предприятий горно-металлургического комплекса Украины. *Экономика Украины.* 2013. № 9 (614). С. 18–30.

Teslenko O.I., Kuts H.O. STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL DIRECTIONS OF REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS BY FERROUS METALLURGY ENTERPRISES

The article presents the results of a calculation-analytical study of the main sources and volumes of greenhouse gas (GHG) emissions by technological productions of the ferrous metallurgy of Ukraine. Ferrous metallurgy is one of the energy-intensive industries with the largest GHG emissions: up to 7% of global GHG emissions are produced in the production of iron and steel (2019). In Ukraine (2020), ferrous metallurgy accounted for almost 14% of annual GHG emissions in the country's economy (or almost 57% of annual GHG emissions in the country's industry) and is the determining industry for reducing GHG emissions: it accounts for 88% of the planned total reduction of GHG emissions in the country's industry by 2030. The formation of carbon dioxide (CO2), the main type of GHG in ferrous metallurgy, occurs throughout the technological chain of metallurgical processes as a result of the combustion of organic types of carbon-containing fuel, as well as the oxidation of carbon and the chemical decomposition of technological carbon-containing raw materials and

energy carriers that are provided for the implementation of production processes. The calculated indicators of CO_2 emissions for metallurgical industries (coke chemical, blast furnace, oxygen converter, electro smelting and ferroalloy) showed that blast furnace production causes the largest CO_2 emissions. The structural and technological directions for reducing GHG emissions by ferrous metallurgy enterprises for the coming decade have been determined. According to the basic (traditional) technology of iron smelting without the use of coke substitutes, the volumes of CO_2 formation and output in the blast furnace gas amount to 995.2 kg of CO_2/t of iron. The use of such innovative technologies for replacing coke in blast furnace production as blowing pulverized fuel or hot blast furnace gas reduces CO_2 emissions to the level of 878.2 kg CO_2/t of cast iron (1.13 – fold decrease) and 534.8 kg CO_2/t of cast iron (1.86 -fold decrease), respectively.

The main direction of reducing CO_2 emissions in steelmaking industries is structural changes in technological process schemes. The following technological scheme is among the most effective in reducing CO_2 emissions: steel smelting in an electric arc furnace with deoxidation and alloying in ladle furnaces and subsequent pouring of steel on machines for continuous casting of blanks with subsequent fire cleaning and with direct delivery of blanks to rolling mills to obtain final products industry (removal of cooling, storage and preheating of blanks in heating furnaces for rolling production).

Key words: *cast iron, steel, ferrous metallurgy, greenhouse gases, emissions, decarbonization, technologies, structural changes.*

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 54-148+620.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/28

Батюк Л.В.
Харківський національний медичний університет

Кізілова Н.М.
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

РОЗРОБКА, ПРИГОТУВАННЯ І КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ МІКРО/НАНОСУСПЕНЗІЙ: ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ І ПЕРСПЕКТИВИ

В статті наведені результати систематичного огляду літератури з методів отримання, використання і контролю якості наносуспензій для потреб промисловості, медицини і повсякденного цивільного життя, а саме для багатоцільової обробки поверхонь, незамерзаючих фарб для стін підвищеної стійкості, самоочищуючихся поверхонь, змащування поверхонь тертя, поглинання сонячної радіації, цільової доставки ліків до клітин і тканин, та багато ін. Наведені різні типи наночастинок і базових рідин для виготовлення наносуспензій, методів отримання наночастинок і методів стабілізації наносуспензій для запобігання злипанню і осіданню частинок, що визначається як старіння суспензій. Перелічені унікальні властивості наночастинок, які відрізняються від властивостей тих самих матеріалів в макрооб'ємах, а саме – високі адгезивність і механічна міцність, високі тепло- та електропровідність, а також механічні властивості, магнітні властивості наночастинок з немагнітних матеріалів. На основі аналізу літератури останніх десятиріч систематизовані дані про механізми втрати частинками наносуспензій їх унікальних фізико-хімічних властивостей за рахунок старіння суспензій. Проаналізовані механізми старіння: утворення агрегатів, їх седиментація і солідіфікація/кристалізація. Наведений огляд підходів до оновлення фізико-хімічних і медико-біологічних властивостей нанорідин. В якості найбільш ефективних і дешевих можна вказати обробку суспензії електромагнітними полями ультразвукових діапазонів з частотами >20 кГц (ультразвукова гомогенізація) і хімічна обробка поверхонь. Обидві технології можуть використатися як для макросуспензій з діаметрами частинок >0.5 мм, так і для суспензій мікрочастинок і наночастинок.

Ключові слова: *наночистинки, наносуспензії, агрегація, суспензійна нестабільність, поверхньоактивні речовини.*

Постановка проблеми. Протягом останніх десятиріч набули значних успіхів різні галузі нанонаук, таких як механіка наноматеріалів, нанофлюідика, нанотрибологія, а також значні успіхи були досягнуті в галузі нанотехнологій і нанобіотехнологій. Багато нових матеріалів і підходів вже використовуються в повсякденному житті, – це й поверхні, які самоочищуються (віконне скло, посуд, сантехніка та ін.); фарби тривалого життя зі стійкими кольорами; мікродвигуни і мікрочіпи для їх керування та багато інших високотехнологічних мікроелектромеханічних систем [1, 2]. Важливою складовою новітніх технологій є нанорідини, тобто суспензії твердих наночастинок (НЧ) з розміром d<0.5 мкм, які знаходяться в базовій рідині в нерозчиненому вигляді. Завдяки малому розміру НЧ знаходяться в активному броунівському русі і не осідають в полі сили тяжіння, на відміну від більш крупних НЧ з діаметрами 0.5 мкм< d <1 мкм, які утворюють колоїдні системи. В якості рідин найчастіше використовуються вода, гліцерин, спирт, олії або інші рідкі середовища. Для кращого контакту поверхонь частинок з розчинником використовують поверхнево-активної речовини, а для запобігання злипанню (агрегації) частинок – їх поверхні обробляють відповідними стабілізуючими речовинами [1, 2].

Оскільки НЧ набагато менші довжини хвилі оптичного діапазону, вони непомітні для звичайних оптичних мікроскопів, а тільки для електронних і лазерних мікроскопів. Нанорідини на основі прозорих рідин і з малими концентраціями наночастинок можуть бути прозорими або мати

слабкий кольор. НЧ легко проходять через звичайні фільтри, так що їх відокремлення від базової рідини вимагає спеціальних методів нанофільтрації. Однією з найважніших проблем є нестійкість наносуспензій, які з часом втрачають свої унікальні фізико-хімічні властивости. Для оновлення властивостей нанорідин потрібні спеціально розроблені фізико-механічні і хіміко-біологічні методи, які повинні використатися в комбінаціях для отримання синергійного ефекту.

Постановка завдання. Метою роботи є детальний огляд існуючих типів, методів виготовлення і використання наносуспензій, а також методів підвищення їх стабільності під час руху по трубках і каналах мікроелектромеханічних пристроїв. Базуючись на подібних базах даних властивостей і відомостей, можна запропонувати найбільш ефективні методи відновлення фізико-хімічних властивостей наносуспензій на тривалий час.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останнього десятиріччя нанотехнології увійшли в повсякденне життя, у тому числі різні типи нанорідин. В якості НЧ використовуються метали (золота Au, срібла Ag, платіни Pt), оксиди Fe_2O_3, TiO_2 (рис. 2а), Al_2O_3 (рис. 1б), Si_2O_3 та інші солі металів, нанопалички (рис. 1в) і нанокристали (рис. 1г), нанотрубки (рис. 1д) і графен (рис. 1е), нановолокнини (рис. 1є) і нанострічки, фулерени (рис. 1ж) і кубіти, дендримери (рис. 1з) і геккеліти. За останні кілька десятиріч досягнуто значних успіхів у технологіях приготування наносуспензій. Подрібнення, гомогенізація під високим тиском, наноосадження, ударний струмінь, електророзпилення, рідинні та надкритичні флюїдні процеси – це технології, які нині доступні або активно розробляються для приготування наносуспензій [1, 2].

В НЧ більше 50% атомів або молекул знаходяться на поверхні, і тому саме поверхневі фізико-хімічні ефекти в них домінують над об'ємними ефектами. Саме тому НЧ мають унікальні фізичні і хімічні властивості, яких не мають макроскопічні зразки тих самих матеріалів. Наприклад, золото не має магнітних властивостей, але Au НЧ мають магнітні моменти і можуть обертатися в зовнішньому змінному магнітному полі, що використовується в медицині для лікування пухлин за допомогою безпечних магнітних полів (МП) замість шкодливих для клітин електромагнітних полів радіочастотних діапазонів [3, 4]. Суспензії магнітних частинок FeO і Fe_2O_3 використовуються в медицині для скерованого транспорту ліків до клітин і тканин (наприклад, до пухлин) завдяки зовнішньому постійному МП [4]. Вуглецеві нанотрубки мають унікальну механічну міцність, а також високу теплопровідність. Наносуспензії вуглецевих трубок використовуються для підвищення ефективності охолодження мікродвигунів і комп'ютерних чіпів, для чого в звичайних рідкий охолоджувач (воду) додають невелику кількість НЧ [1, 2]. Наносуспензії також використовують як рідкі лубріканти (мастила) для двигунів або будь-яких поверхні, які знаходяться в контакті.

Наносуспензії мають велике значення в медицині для доставки таких препаратів, які мало розчинні у воді (розчинність <5 мг/л), але у вигляді

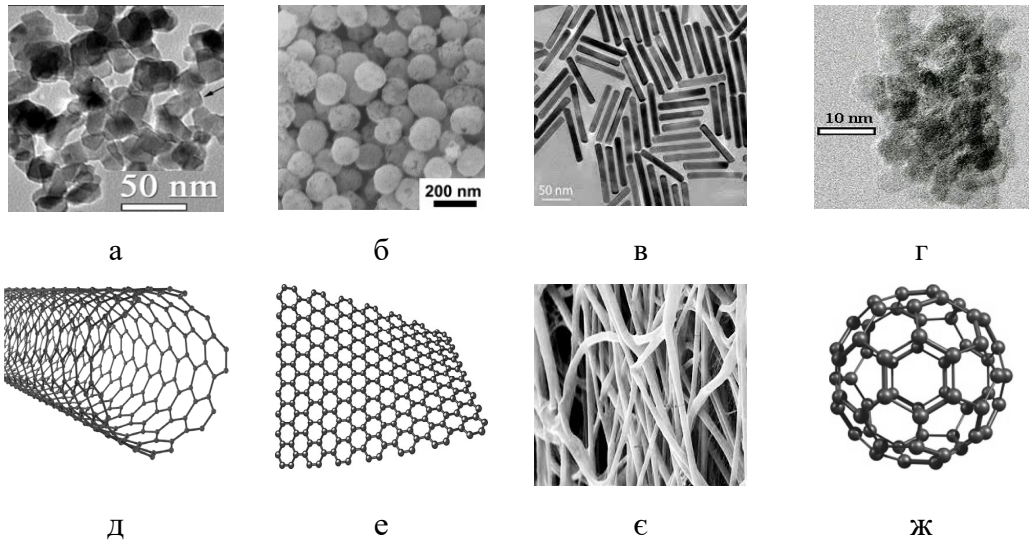


Рис. 1. Різні типи НЧ для наносуспензій: а – TiO2; б – Al2O3; в – нанопалички; г – нанокристали; д – нанотрубки; е – графен; є – нановолокнини; ж – фулерен; з – дендример

наносуспензії такі ліки мають значно покращені біофармацевтичні властивості, такі як розчинність і абсорбція тканинами [5]. На сьогодні більше половини всіх нових ліків, що надходять до тестування, показують слабку розчинність у воді, що призводить до їх неоптимальних фізико-хімічних та біофармацевтичних властивостей. Виготовлення гідрофобних ліків у вигляді наносуспензій дозволяє значно поліпшити їх лікувальний вплив [6]. Розробка активних фармацевтичних інгредієнтів у вигляді наносуспензій стала популярною у фармацевтичній промисловості [5].

Однією з найбільших проблем є нестабільність суспензій, а саме схильність їх частинок зближатися, утворювати фізичні або/та хімічні контакти, що є початковою стадією зародокутворення та подальшого зростання розміру агрегатів частинок. Ці процеси властиві і для стабілізованих суспензій мікрочастинок, наприклад, магнітних частинок FeO і Fe_2O_3, чиї магнітні властивості потрібні для керованого транспорту до органу-мішені [4]. У випадку НЧ ці процеси стають ще більш активними завдяки величезній сумарній площині поверхні частинок та важливості поверхневих ефектів. Зрозуміло, що суспензії агрегатів НЧ вже не мають такої великої площини активної поверхні. Крім того, вони важчі за НЧ і швидко осідають на дно судини або апарату. В'язкість суспензії агрегатів в базовій рідини стає вищою за в'язкість суспензії НЧ, що потребує додаткових витрат енергії на її транспортування. Тому процеси агрегатоутворення в суспензіях мікро/наночастинок називають старінням суспензій (ripening за визначенням німецького фізико-хіміка В.Ф. Оствальда) [7]. Старіння за Оствальдом – це процес конденсації перенасиченої фази речовини, який спостерігається в рідинних золях або твердих колоїдних розчинах на останніх часах розвитку, коли етап нуклеації вже закінчений, а зростання великих зерен нової фази (наприклад, агрегатів НЧ або нанокрапель із пара) відбувається за рахунок більш дрібних. Таким чином, вивчення головних механізмів і методів запобігання процесам старіння суспензій є вкрай важливим для подальшого успішного розвитку нанотехнологій на основі наносуспензій.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз літератури показав, що серед механізмів старіння суспензій найбільш значущими є:

1) ***Механічна нестабільність суспензій*** за рахунок відсутності сил, які повертають частинки суспензій до попереднього стану у випадку їх зближення. Під час оствальдського старіння більші частинки ростуть за рахунок повторного розчинення дрібніших, оскільки нанокристали меншого розміру більш розчинні, ніж великі [8]. Для зменшення агрегації та старіння розроблені суспензії мають бути погано розчинними, щоб забезпечити обмежені зміни концентрації частинок наносуспензії. Крім того, розмір частинок приготовлених наносуспензій повинен бути відносно однорідним, щоб уникнути великих відмінностей у розчинності кристалів різного розміру. Для отримання стійкої наносуспензії необхідне використання належного хімічного стабілізатора. Найчастіше використовують стерічні та іонні стабілізатори. Ризик утворення агрегатів НЧ є високим як під час виготовлення НЧ або гомогенізації під високим тиском, а також під час зберігання суспензії без її викоистання. Вибір відповідних стабілізаторів і їх концентрацій є критичним для отримання стабільної суспензії. Амфіфільні полімери можуть бути адсорбовані на поверхнях НЧ. Молекули адсорбованого ланцюга на поверхні знаходяться в безперервному тепловому русі, що призводить до динамічно шорсткої поверхні та запобігає коалесценції через ентропійні сили відштовхування. Крім того, гідроксипропілметилцелюлоза має синергічний вплив на інгібування агрегації [19]. Суспензійні агенти можуть збільшити в'язкість наносуспензій і тим самим зменшити швидкість осідання агрегатів. Крім того, використання суспензії може також уможливити формування стереоспецифічної блокади між частинками наносуспензії, запобігаючи контакту частинок.

2) ***Седиментація частинок*** є екстремальним проявом нестабільності наносуспензії [10]. Коли сила тяжіння агрегату НЧ перевищує силу Архімеда, осадження неминуче і цей процес є незворотнім. Таким чином, передбачення та запобігання седиментації є важливими складовими вироблення наносуспензії. Специфічний тип седиментації – флокуляція, – є порушенням рівноваги наносуспензії, яка є результатом сил притягання між НЧ. Флокуляція наносуспензій може відбуватися шляхом утворення полімерних містків, нейтралізації електричного заряду у розчині, утворення поверхневого комплексу полімер–частинка, або за допомогою комбінації цих механізмів [11]. Залежно від природи полімеру та характеру його взаємодії з поверхнею НЧ можливі два основні механізми флокуляції: (1) мостикові утворення в результаті адсорбції макромолекули на поверхні нанокристалів і (2) нейтралізація поверхневого заряду НЧ [12]. У дуже розведених системах фло-

куляція генерує флокули зі фрактальною структурою, яку можна змоделювати за допомогою чисельного моделювання або виміряти за допомогою статичного одноразового розсіювання світла. Для більш концентрованих суспензій з об'ємною часткою частинок від 0,1 до 50% або більше флокули ростуть, що призводить до утворення гелеподібної структури наносуспензії.

Флокуляція також може бути використана як проміжна стадія для приготування змочуваних нанокристалічних порошків зі швидким розчиненням [13]. Результати експериментальних досліджень продемонстрували, що флокуляція з подальшим фільтруванням і сушінням є ефективним і високовідтворюваним процесом для швидкого відновлення нанокристалів лікарських засобів для отримання змочуваних порошків з високим вмістом лікарських речовин і швидким розчиненням [14].

3) ***Процеси солідіфікації/кристалізації.*** Такі процеси затвердіння, як сублімаційне сушіння та сушіння розпиленням, є поширеним підходом для подальшого покращення фізичної та хімічної стабільності наносуспензій [41]. Однак під час процесу затвердіння для утворення аморфних некристалічних форм потрібна мінімальна енергія [42]. Іншими словами, утворення аморфної форми вимагає набагато менше енергії, ніж утворення кристала. Загалом, присутність нерозчинних речовин у повністю або частково аморфному стані в нанокристалах теоретично є ідеальним методом для подальшого покращення швидкості розчинення [4]. Однак молекули нанокристалів в аморфному стані термодинамічно нестабільні відносно кристалічного стану. Отже, хоча аморфна форма готової наносуспензії є більш розчинною та має вищу швидкість розчинення, ніж кристалічний стан, аморфні тверді речовини є термодинамічно нестабільними та мають тенденцію перетворюватися на кристали з подальшим зростанням. На сьогодні необхідні методи контролю за процесами солідіфікації . Тому якщо навіть вироблена нанорідина тимчасово стабільна, існує ризик кристалічної трансформації НЧ під час зберігання або використання наносуспензії.

4) ***Хімічна стабільність*** також є важливою складовою для наносуспензій. Як правило, наносуспензії готують у дисперсійному середовищі води або суміші води, хоча в деяких процесах використовуються і неводні середовища [54]. Таким чином, хімічні реакції, такі як гідроліз і окислення, є серйозними проблемами при розробці складу наносуспензій і обмежують їх хімічну стабільність [55]. Однак наносуспензії також представляють собою потенційний підхід для покращення хімічної стабільності, наприклад, хімічно лабільних лікарських речовин, оскільки кінцевий твердий і концентрований стан виробленої речовини може захистити лікарський засіб від окислення, фотолізу, гідролізу та інших впливів.

Майбутні перспективи. Таким чином, стабільність наносуспензій є дуже важливим і критичним аспектом збереження їх унікальних фізико-хімічних властивостей. Незважаючи на те, що технології виготовлення і зберігання наносуспензій активно вивчалася в останні роки, їх застосування, наприклад, у медицині і фармацевтиці було обмеженим, насамперед через проблеми стабільності. Багато факторів, які впливають на стабільність наносуспензії, ще належить визначити. Наносуспензії та мікросуспензії (суспензії мікроскопічних частинок з розмірами меншими 0,5 мм) мають певну схожість. Таким чином, було б корисно застосувати знання про підвищення стабільності мікросуспензій, наприклад, суспензій біологічних клітин, для покращення стабільності наносуспензій, наприклад, зменшити різницю в щільності частинок і рідини та збільшити в'язкість. Встановлення рекомендацій щодо використання стабілізаторів теж важливе для подальшого розвитку технології наносуспензій. Результуюча фізична стабільність наносуспензій також важлива, оскільки необоротна агрегація погіршить потенційні переваги наносуспензій, такі як підвищена швидкість розчинення та розчинність при насиченні. Тому стабілізатори відіграють вирішальну роль у формуванні, стабільності та загальних характеристиках наносуспензій. Існує два підходи до розробки стабілізаторів. По-перше, це визначити більше правил використання доступних на даний момент стабілізаторів. Попередні дослідження наносуспензійних стабілізаторів були розрізненими і систематично не вивчали їх характеристики. Другий підхід полягає в розробці більш придатних і адаптованих нових стабілізаторів, таких як біосумісні полімери амінокислот, для приготування наносуспензій. Більшість релевантних досліджень наносуспензій зосереджено насамперед на ефективності методів приготування, швидкості розчинення, фармакокінетиці та фармакодинаміці. Таким чином, вплив фізико-хімічних і акустико-механічних підходів до підвищення стабільності наносуспензій має бути детальніше вивчений за допомогою експериментів і, можливо, використанні штучного інтелекту за умовою накопичення достатньої бази даних для його навчання.

Висновки. Таким чином, незважаючи на значні успіхи сучасних нанотехнологій у виготовленні, стабілізації і використанні наносуспензій в техніці, виробництві, повсякденному цивільному житті і медицині, наносуспензії під час зберігання і використання демонструють процеси старіння. В результаті нанорідини втрачають свої унікальні механічні, термічні електричні, магнітні, оптичні та інші фізико-хімічні властивості. Головними механізмами цих процесів є термодинамічна нестабільність колоїдних систем, внаслідок якої наночастинки агрегують, осідають і утворюють порівняно великі тверді утворення (солідіфікація) у вигляді кристалів. Важливою є також хімічна взаємодія попередньо стабілізованих частинок. Для запобігання цим процесам краще використовувати не один, а кілька методів, які демонструють синергію: хімічну обробку стабілізаторами, механічний вплив (вібрації), акустична обробка (електромагнітне випромінювання в діапазоні ультразвукових частот) та інші.

Список літератури:

1. Das S.K., Choi S.U., Yu W., Pradeep T. *Nanofluids: Science and Technology*. Wiley. 2007. 416 p.
2. *Hybrid Nanofluids. Preparation, Characterization and Applications*. Ed. by Z. Said. Elsevier. 2022. doi:10.1016/C2020-0-02159-6
3. Kizilova N. Multidisciplinary Approaches in Cancer Diagnosis and Treatment: Towards Patient-Specific Predictive Oncology. Acta Scientific Cancer Biology. 2019. Vol. 3. P. 1–2.
4. Kizilova N. *Electromagnetic Properties of Blood and Its Interaction with Electromagnetic Fields. In: Advances in Medicine and Biology*. Vol. 137. Ed. by L.V. Berhardt. NOVA Sci. Publ. 2019. pp. 1–74.
5. Wang Y., Zheng Y., Zhang L., Wang Q., Zhang D. Stability of nanosuspensions in drug delivery. *Journal of Control Release*. 2013. Vol. 172. pp.1126–1141. doi: 10.1016/j.jconrel.2013.08.006
6. Rabinow B.E. Nanosuspensions in drug delivery. *Nature Review of Drug Discovery*. 2014. Vol. 3. pp. 785–796. https://doi.org/10.1038/nrd1494
7. Ostwald W. Über die vermeintliche Isomerie des roten und gelben Quecksilberoxyds und die Oberflächenspannung fester Körper. *Z. Phys. Chem*. 1900. Vol. 34. P.495. https://doi.org/10.1515/zpch-1900-3431
8. Ghosh I., Bose S., Vippagunta R., Harmon F. Nanosuspension for improving the bioavailability of a poorly soluble drug and screening of stabilizing agents to inhibit crystal growth. *International Journal of Pharmacy*. 2011. Vol. 409. pp. 260–268. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2011.02.051
9. Ghosh I., Schenck D., Bose S., Ruegger C. Optimization of formulation and process parameters for the production of nanosuspension by wet media milling technique: effect of vitamin E TPGS and nanocrystal particle size on oral absorption. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2012. Vol. 47. pp. 718–728. https://doi.org/10.1016/j.ejps.2012.08.011
10. Gao Y.A., Qian S.A., Zhang J.J. Physicochemical and pharmacokinetic characterization of a spray-dried cefpodoxime proxetil nanosuspension. *Chemical Pharmacia Bulletin*. 2010. Vol. 58. pp. 912–917. DOI: 10.1248/cpb.58.912
11. Nasser M.S., Twaiq F.A., Onaizi S.A. Effect of polyelectrolytes on the degree of flocculation of papermaking suspensions. *Separation and Purification Technology*. 2013. Vol. 103. pp. 43–52. DOI: 10.1016/j.seppur.2012.10.024
12. Barany S., Szepesszentgyorgyi A. Flocculation of cellular suspensions by polyelectrolytes. *Advances in Colloid Interface Sciences*. 2004. Vol. 111. pp. 117–129. https://doi.org/10.1016/j.cis.2004.07.003
13. Van Eerdenbrugh B., Stuyven B., Froyen L., Van Humbeeck J., Martens J.A. Augustijns P., Van den Mooter G. Downscaling drug nanosuspension production: processing aspects and physicochemical characterization. *AAPS Pharmscitech.* 2010. Vol. 10. pp. 44–53. DOI: 10.1208/s12249-008-9170-5
14. Verma S., Kumar S., Gokhale R., Burgess D.J. Physical stability of nanosuspensions: Investigation of the role of stabilizers on Ostwald ripening. *International Journal of Pharmaceutics*. 2011. Vol. 406. pp. 145–152. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2010.12.027
15. Singare D.S., Marella S., Gowthamrajan K., Kulkarni G.T., Vooturi R., Rao P.S. Optimization of formulation and process variable of nanosuspension: an industrial perspective. *International Journal of Pharmacology*. 2010. Vol. 402. pp. 213–220. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2010.09.041
16. Van Eerdenbrugh B., Froyen L., Van Humbeeck J., Martens J.A., Augustijns P., Van Den Mooter G. Alternative matrix formers for nanosuspension solidification: dissolution performance and X-ray microanalysis as an evaluation tool for powder dispersion. *European Journal of Pharmacology Sciiences*. 2008. Vol. 35. pp. 344–353. DOI: 10.1016/j.ejps.2008.08.003
17. Kayaert P., Van den Mooter G. Is the amorphous fraction of a dried nanosuspension caused by milling or by drying? A case study with naproxen and cinnarizine. *European Journal of Pharmacology and Biopharmacology*. 2012. Vol. 81. pp. 650–656. DOI: 10.1016/j.ejpb.2012.04.020

18. Wu L.B., Zhang J., Watanabe W. Physical and chemical stability of drug nanoparticles. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2011. Vol. 63. pp. 456–469. https://doi.org/10.1016/j.addr.2011.02.001

19. Dodiya S.S., Chavhan S.S., Sawant K.K., Korde A.G. Solid lipid nanoparticles and nanosuspension formulation of saquinavir: preparation, characterization, pharmacokinetics and biodistribution studies. *Journal of Microencapsulation*. 2011. Vol. 28. pp. 515–527. DOI: 10.3109/02652048.2011.590612

Batyuk L.V., Kizilova N.M. DEVELOPMENT, PREPARATION AND QUALITY CONTROL OF MICRO/NANOSUSPENSIONS: TECHNOLOGY OVERVIEW AND PERSPECTIVES

The results of a systematic review of the literature on methods of obtaining, using, and quality control of nanosuspensions for the needs of industry, medicine, and everyday civilian life, namely for multi-purpose surface treatment, non-freezing paints for walls of increased resistance, self-cleaning surfaces, lubrication of friction surfaces, absorption of solar radiation, targeted delivery of drugs to cells and tissues, and many others are presented. The types of nanoparticles and basic liquids for the production of nanosuspensions, methods of obtaining nanoparticles and methods of stabilization of nanosuspensions to prevent sticking and sedimentation of particles, which is defined as aging of suspensions are given. The unique properties of nanoparticles, which differ from the properties of the same materials in the bulk material, are reviewed, namely, high adhesiveness and mechanical strength, high thermal and electrical conductivity, as well as magnetic properties of nanoparticles of non-magnetic materials. Based on the analysis of the literature of the last decades, data on the mechanisms of the loss of unique physicochemical properties of the nanoparticles in nanosuspensions due to the ripening/aging are systematized. The following mechanisms of aging are analyzed: the formation of aggregates, their sedimentation and solidification/crystallization. An overview of approaches to updating the physico-chemical and medical-biological properties of nanofluids is given. Treatment of suspensions with electromagnetic fields of ultrasonic ranges with frequencies >20 kHz (ultrasonic homogenization) and chemical treatment of surfaces can be indicated as the most effective and cheap. Both technologies can be used for macrosuspensions with particle diameters >0.5 mm, and for suspensions of microparticles and nanoparticles.

Key words: *nanoparticles, nanosuspensions, aggregation, suspension instability, surfactants.*

УДК 678-13:678.744
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/29

Гриценко О.М.
Національний університет «Львівська політехніка»

Баран Н.М.
Національний університет «Львівська політехніка»

Волошкевич П.П.
Національний університет «Львівська політехніка»

Строган О.І.
Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРИРОДИ МЕТАЛІЧНОГО НАПОВНЮВАЧА НА ЗАКОНОМІРНОСТІ КОПОЛІМЕРИЗАЦІЇ 2-ГІДРОКСІЕТИЛМЕТАКРИЛАТУ З ПОЛІВІНІЛПІРОЛІДОНОМ

В роботі представлені результати дослідження впливу присутності металічного наповнювача (МН) на закономірності кополімеризації 2-гідроксіетилметакрилату (ГЕМА) з полівінілпіролідоном (ПВП) та особливості формування структури композитів, одержаних на основі кополімерів ГЕМА з ПВП. Як наповнювачі використано дрібнодисперсні порошки металів Zn, Co, Ni, Fe, Cu, Ag та стопу FeCo з розміром частинок в межах 10-50 мкм. Композиційні гідрогелі одержували введенням МН у реакційну композицію під час її полімеризації в присутності феруму сульфату (II). Використання $FeSO_4$ забезпечило одержання композитів з високою швидкістю та максимальним виходом полімеру на повітрі, за кімнатної температури, без додаткової стадії вакуумування. Встановлено, що полімеризація ГЕМА/ПВП композицій в присутності МН, хоча і з меншою швидкістю, відбувається без додаткових ініціаторів, що свідчить про активну участь поверхні МН в ініціюванні процесу полімеризації. Встановлена підвищення активуючої дії металу із зростанням його від'ємного електрохімічного потенціалу. За допомогою ІЧ спектроскопії з Фур'є-перетворенням та динамічного механічного термічного аналізу підтверджено утворення прищепленого просторовозшитого кополімеру на основі ГЕМА та ПВП (пГЕМА-пр-ПВП), показано вплив МН на формування структури кополімерів та досліджено структурні параметри – ефективність прищеплення ПВП та молекулярну масу міжвузлового фрагмента полімерної сітки. Виявлено, що введені в полімер мікрочастинки металів відіграють роль додаткових вузлів зшивання і сприяють утворенню більш просторовозшитої структури. Експериментально доведено, що в присутності металічної поверхні утворюється полімерна сітка, яка характеризується різною структурою у міжфазному шарі на поверхні металічної частинки і в об'ємі полімеру.

Ключові слова: *полівінілпіролідон, 2-гідроксіетилметакрилат, кополімери, композиційні гідрогелі, металонаповнені гідрогелі.*

Постановка проблеми. На даний час в хімії полімерів відносно новим напрямком є полімеризація в присутності неорганічних сполук, які з одного боку є каталізаторами реакцій полімероутворення, а з іншого – наповнювачами утворених композиційних матеріалів. Особливо це стосується полімерних гідрогелів. При введенні до складу гідрогельного матеріалу наповнювачів різної природи можна одержати нові матеріали – композиційні гідрогелі, які, залежно від природи наповнювача, будуть володіти новим комплексом властивостей [1, с. 2; 2, с. 3468]. Синтез із одночасним наповненням дає можливість рівномірно розподілити наповнювач в об'ємі полімеру і, таким чином, одержати композиційні матеріали з ізотропними характеристиками, які, головним чином, залежать від кінетичних закономірностей полімеризації. Знаючи особливості впливу наповнення на процеси полімероутворення, можна в широких межах змінювати структуру, а отже і властивості полімерів та одержувати матеріали з прогнозованими характеристиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Авторами попередньо встановлена можливість одержання композиційних полімерних матеріалів на основі кополімерів полівінілпіролідону (ПВП)

з 2-гідроксіетилметакрилатом (ГЕМА) в присутності солей металів змінного ступеня окиснення полімеризацією з одночасним наповненням дрібнодисперсними наповнювачами різної природи – деякими порошками металів (магнітних та струмопровідних), графітом [3, с. 5183; 4, с. 99], деревною мукою, аеросилом [5, с. 211]. Використання ініцювальної системи комплексу ПВП-Me^{n+} дозволяє проводити синтез кополімерів за кімнатної температури на повітрі з високою швидкістю (час тверднення композицій – від 0,5 до 30 хв) [6, с. 236]. Одержані нові гідрогельні композиційні матеріали, що поєднують в собі механічні, струмопровідні та сорбційні характеристики, які можуть змінюватись в широких межах залежно від композиційного складу вихідної композиції, вмісту та природи металу, температури та вологи під час експлуатації [3, с. 5183; 5, с. 211].

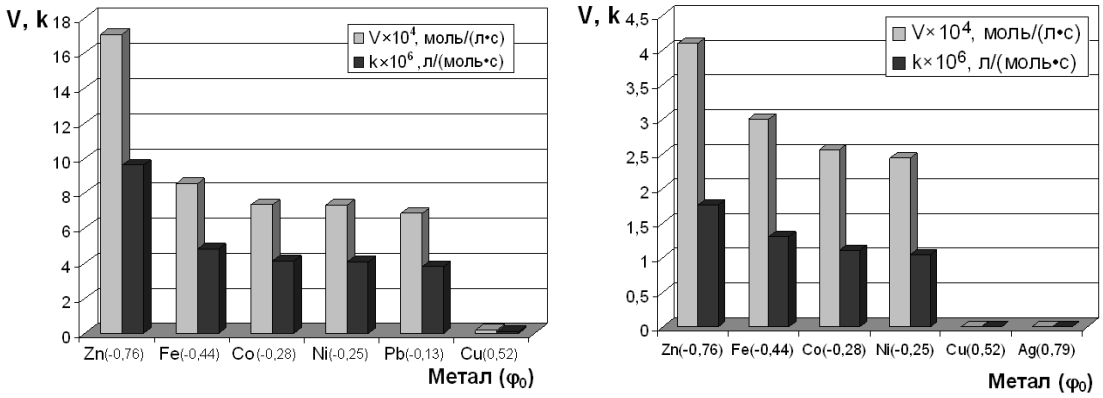
Формулювання цілей статті. Метою роботи було дослідити вплив природи дрібнодисперсних порошків металів на закономірності полімеризації ГЕМА/ПВП композицій в присутності і без домішок сульфату заліза (II). Поставлене завдання вирішували дослідженням впливу частинок металів на кінетику полімеризації композицій ГЕМА/ПВП та структуру одержаних композиційних матеріалів.

Матеріали і методи досліджень. Використовуючи результати попередніх досліджень [7, с. 4580], для синтезу наповнених гідрогелів вибрано полімеризацію в блоці композиції складу ГЕМА : ПВП = 80:20 (мас. ч.) у присутності 0,05% $FeSO_4$. Склад композиції вибраний експериментально на основі залежності швидкості полімеризації від вмісту ПВП і $FeSO_4$, а також з аналізу в'язкості, виходячи з умов седиментації частинок наповнювача та необхідності забезпечення високої продуктивності процесу. Для синтезу використовували: 2-гідроксіетилметакрилат (ρ_{20}=1079кг/м^3, n_D^{20}=1,4520), очищений та перегнаний у вакуумі (залишковий тиск 130 Н/м^2, $T_{кип}$=351 К); ПВП з ММ 12 та 28 тис. високої очистки перед використанням сушили у вакуумі за 338К протягом 2–3 год.; дрібнодисперсні порошки металів Zn, Co, Ni, Fe, Cu, Ag та стопу FeCo з розміром частинок в межах 10–50 мкм. Полімеризацію здійснювали за 293К, на повітрі, в умовах денного світла. Кінетику полімеризації композиції досліджували за зміною об'єму реакційної суміші під час полімеризації мономеру дилатометричним методом [8, с. 1667]. Швидкість реакції полімеризації розраховували за конверсії мономеру 5% за методикою, описаною у [9, с. 391]. Спектроскопічні дослідження проводили на спектрометрі Perkin Elmer PARAGON 1000 PC, використовуючи пресовані таблетки з порошку кополімеру та порошку KBr. Кількість незв'язаного у полімерну сітку ПВП визначали методом фотоколориметрії водного екстракту [10, с. 107]. Ефективність прищеплення (f, %) розраховували як співвідношення кількості прищепленого ПВП до загальної кількості ПВП у вихідній композиції. Структурні параметри полімерної сітки оцінювали на основі середньої молекулярної маси фрагменту полімерного ланцюга між вузлами зшивки (Mc, кг/моль) на основі результатів досліджень кінетики набрякання, використовуючи метод Флорі [11, с. 1956; 12, с. 521].

Виклад основного матеріалу. Досліджували вплив природи металу на швидкість полімеризації, оскільки знання кінетики здебільшого забезпечує можливість цілеспрямовано регулювати технологічні режими процесу синтезу полімеру і впливати на його структуру та фізико-механічні властивості. Використовували як наповнювач дрібнодисперсні порошки металів різної природи та з різними властивостями (електрохімічними та магнітними) під час полімеризації в присутності невеликих кількостей $FeSO_4$ (рис. 1, а), а також самі порошки металів без додаткового введення в систему солі Fe (II) (рис. 1, б). Встановлено, що в присутності порошків Fe, Co, Ni, Zn, FeCo полімеризація відбувається з вищою швидкістю, ніж полімеризація лише під впливом $FeSO_4$.

Притому, найактивнішою виявилась поверхня Zn. Сповільнюючий ефект викликають порошки Cu і Ag. З аналізу результатів кінетичних залежностей помічено, що метали, які характеризуються від'ємним електрохімічним потенціалом є каталізаторами полімеризації, швидкість якої тим вища, чим вищий електрохімічний потенціал металу, причому наявність йону Fe^{2+} в реакційному об'ємі не змінює цю залежність, що свідчить про активну участь в ініціюванні полімеризації поверхні металічного наповнювача (МН).

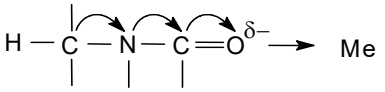
Величини кінетичних параметрів полімеризації металонаповнених ГЕМА/ПВП композицій виявили високу реакційну здатність системи ПВП/мономер/метал. Про існування комплексу ПВП/метал свідчать результати ІЧ спектрального аналізу. Одержані ІЧ спектри металонаповнених полімерів за характером є ідентичними, хоча прослідковується зсув та розщеплення деяких піків, що спричинено впливом металевої поверхні. Для порівняння були вибрані смуги поглинання, характерні для ПВП та ГЕМА і які присутні як



а) **б)**

Рис. 1. Залежність початкової швидкості полімеризації (V,) та ефективної константи полімеризації (k,) від природи металу (стандартного електрохімічного потенціалу, φ_0) ($ММ_{ПВП}=12\cdot10^3$, [Me] =10 мас.%, Т=298 К): а – в присутності 0,05 мас.% $FeSO_4$; б – без $FeSO_4$

в спектрах композитів, так і у сумішах кополімер/метал. Смуга, яка характеризує -ОН групи ГЕМА, стає більш асиметричною і ширшою ніж в кополімері пГЕМА-пр-ПВП, що свідчить про утворення водневого зв'язку за участі ОН-групи. Відмінність одержаних спектрів також полягає у зміщенні частот коливання характеристичних смуг групи С=О гідроксіетилметакрилату з 1727см$^{-1}$ до 1714÷1721 см$^{-1}$ (залежно від природи металу) та їх розщеплення. Для групи -С-N= піролідонового циклу характерним є значне відхилення в сторону зменшення частот коливання її характеристичних смуг (з 1286 см$^{-1}$ до 1260 см$^{-1}$), що підтверджує її безпосередню участь у фізичній взаємодії з металом. Така зміна свідчить про послаблення зв'язку С-Н внаслідок підсилення мезомерного ефекту металом:



Послаблення зв'язку водню з третинним атомом вуглецю основного ланцюга ПВП сприяє перебігу прищепленої полімеризації внаслідок передачі ланцюга на ПВП. Про це також свідчить зменшення величини піку в області 1320 см$^{-1}$, характерного для зв'язку С-Н в присутності металів, порівняно з чистим ПВП, взятого в кількості, співмірній з його вмістом у кополімері (рис. 2). Різке зменшення інтенсивності піку відбувається в ряду Ni>Zn>Co. Аналіз отриманих ІЧ-спектрів ПВП та кополімеру ГЕМА з ПВП, екстрагованого водою до повного видалення непрореагованого ПВП показує, що характеристичні смуги ПВП в областях 650 см$^{-1}$, 844 см$^{-1}$, 1170 см$^{-1}$, 1320 см$^{-1}$, 1460 см$^{-1}$, 1650 см$^{-1}$ [13, с. 193] присутні в спектрі кополімеру.

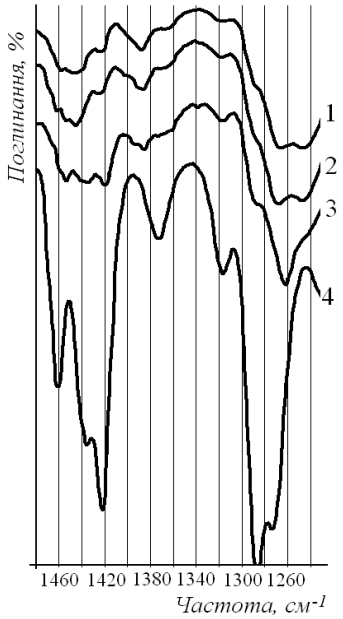


Рис. 2. ІЧ спектроскопічні дослідження металонаповнених кополімерів (вміст металу – [Me]=10 мас.%): 1 – Co; 2 – Zn; 3 – Ni; 4 – ПВП

Додатковим підтвердженням утворення прищепленого полімеру є результати досліджень кількості прищепленого ПВП в кінцевому кополімері. Ефективність прищеплення ПВП (рис. 3) збільшується із зростанням активності металу в ініціюванні полімеризації.

Разом з тим, можна відзначити обернено пропорційну залежність ступеня зшивання від активності металу – за найвищої активності металу утворюється полімер із мінімальним ступенем зшивання ($М_С$ – найбільша). Очевидно, одержані результати можуть бути пояснені різницею у швидкості та у характері формування структури кополімеру в поверхневому шарі і в об'ємі компо-

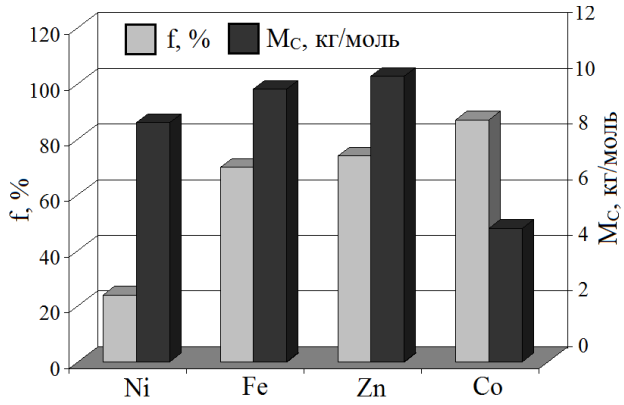
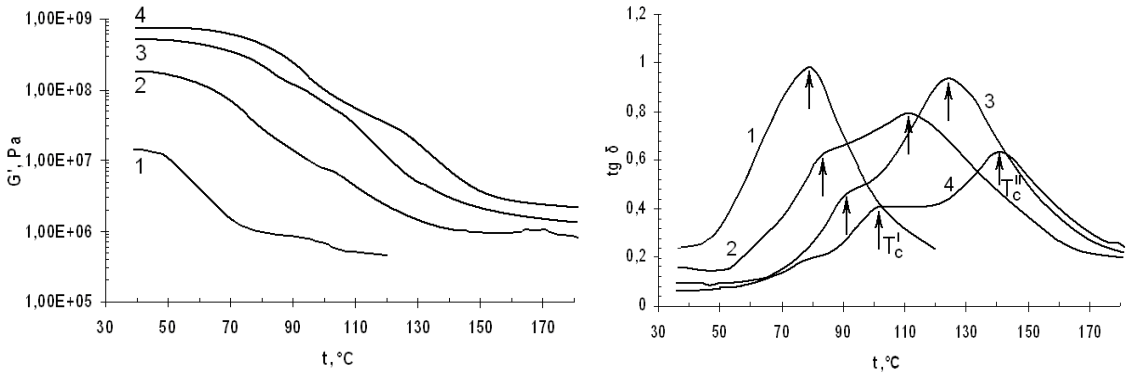


Рис. 3. Вплив природи металу на ефективність прищеплення ПВП (f) та молекулярну масу фрагмента ланцюга між вузлами зшивання (M_C) ([Me]=10 мас.%, T=298K)

зиції. Підтвердженням цього явища можуть бути дані динамічного термічно-механічного аналізу (ДМТА). ДМТА особливо актуальний для наповнених матеріалів, оскільки проявляє вплив наповнювача на зміну рухливості макромолекул в граничних поверхневих шарах. Відомо, що на межі поділу фаз із твердим тілом змінюється характер перебігу релаксаційних процесів [14, с. 384], оскільки при використанні твердого тіла як наповнювача в граничних шарах наповнених полімерних систем змінюється молекулярна рухливість обох компонентів системи на межі поділу. Одержані залежності (рис. 4.) дають змогу порівняти зміну модуля накопичення (рис. 4, а.) і тангенса кута механічних втрат (рис. 4, б.) полімерів між собою та зробити висновок про вплив природи МН на формування полімерної матриці.

Температура склування (T_C), яка вказує на значну зміну структури фази, може зазнавати змін під час виникнення внутрішніх напружень внаслідок не тільки зміни надмолекулярної структури, а й від зміни міжмолекулярних відстаней і, відповідно, зміни міжмолекулярної взаємодії. Значенню T_C полімеру відповідає пік на кривих залежностей tgδ=f(T). Структурні зміни, які є причиною підвищення гнучкості макромолекул (зростання модуля накопичення G'), як правило, сприяють зниженню температури склування. Хімічна будова ланцюгів спричинює суттєвий вплив на їх гнучкість та енергію міжмолекулярної взаємодії, тобто на кількість і тип зв'язків флуктуаційної сітки і, відповідно, на T_C. Таким чином, підвищення T_C вказує на зростання густоти зшивання в полімерній сітці. Наявність двох максимумів на температурній залежності тангенса кута механічних втрат від температури є доказом існування в структурі одержаних кополімерів областей з різним ступенем зшивання – у міжфазному шарі на поверхні МН і в об'ємі композиту (рис. 4, кр. 2, 3, 4). Висока активність Zn та комплексотвірна здатність ПВП є причиною утворення між ними фізичної взаємодії, що сприяє перебігу реакції прищеплення та утворення на поверхні частинок МН більш зшитого полімеру. Через локальне концентрування ПВП на металічній поверхні, а також віддаленість мономеру від активних центрів в об'ємі композиту утворюється кополімер з меншою густотою полімерної сітки. У випадку Co та Ni, активність яких є нижчою від Zn, концентрація ПВП як на поверхні металу, так і в об'ємі композиту є більш рівномірною, що сприяє формуванню менш дефектної структури.

Граничний шар на поверхні МН може формуватись за допомоги міжмолекулярних фізичних та хімічних зв'язків. Величину поверхневої взаємодії оцінювали за товщиною поверхневого шару



а) **б)**

Рис. 4. Залежність модуля накопичення G'(а) і тангенса кута механічних втрат tg δ (б) пГЕМА-пр-ПВП кополімерів від природи металу (Тс' – температура склування в об'ємі, Тс" – температура склування на межі фаз; [Me]=10 мас.%):
1 – без металу; 2- Zn; 3 – Co; 4 – Ni.

композиції (визначали за різницею мас чистої металічної пластини та пластини після занурення у композицію, враховуючи фізичні розміри пластини), за зміною кута змочування та поверхневого електричного опору на металевій поверхні (табл. 1). Поверхня Fe є найбільш адсорбційно активною, оскільки на ній відбувається утворення шару найбільшої товщини як з розчинів компонентів композиції, так і самої композиції. Адсорбційний шар полімеру на металічній поверхні формується завдяки фізичним взаємодіям, що підтверджено зміною поверхневого опору металів після адсорбції.

Внаслідок адсорбції ПВП і ГЕМА та їх фізичної взаємодії з поверхнею металу гідрофільність поверхні змінюється по-різному залежно від характеру взаємодії, про що свідчить саме зміна крайового кута змочування (табл. 1).

Відсутність хімічного зв'язку між утвореним полімером і поверхнею МН підтверджується дослідженнями морфології композиційних гідрогелів на основі металонаповнених кополімерів пГЕМА-пр-ПВП (рис. 5.). Одержані результати дають можливість спостерігати відділення полімеру від поверхні металічної частинки після набрякання у воді.

Таким чином, специфіка механізму кополімеризації ГЕМА з ПВП на поверхні МН полягає в тому, що з усіх елементарних реакцій полімеризаційного процесу – ініціювання, ріст та обрив ланцюга – метал може відігравати роль лише в ініціюванні. Виходячи з цього, можливо запропонувати наступну схему утворення пГЕМА-пр-ПВП кополімерів за участю поверхні металів (рис. 6.). Спочатку відбувається дифузія компонентів реакційної маси ГЕМА та ПВП до поверхні металу та фізична адсорбція внаслідок утворення комплексів між металом, ГЕМА та ПВП.

Одночасне комплексоутворення ГЕМА з ПВП та металом сприяє послабленню та розриву подвійного зв'язку мономеру, що є чинником ініціювання полімеризації на металічній поверхні. Наступним етапом є поширення полімеризації в об'ємі реакційного середовища від поверхні МН.

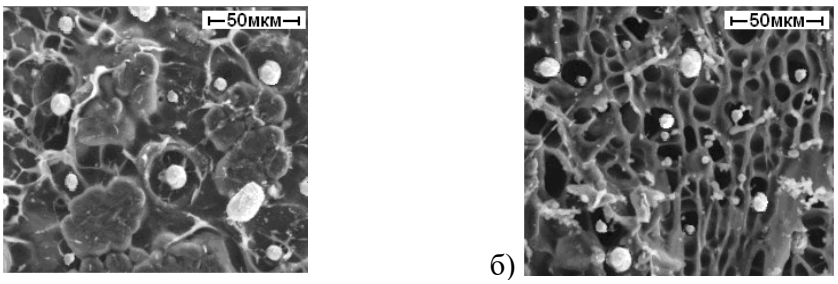
Таблиця 1

Характеристика поверхневих шарів залежно від природи металу

Метал	ГЕМА			ПВП			ГЕМА/ПВП			ГЕМА/ПВП/H_2O		
	h, мкм	θ,°	ρ×10^{-5}, Ом	h, мкм	θ,°	ρ×10^{-5}, Ом	h, мкм	θ,°	ρ×10^{-5}, Ом	h, мкм	θ,°	ρ×10^{-5}, Ом
Zn	0,5	38	3,6	1,9	62	5,5	8,6	5	9,4	6,0	70	7,5
Fe	1,4	68	0,4	4,0	18	98	10,0	10	160	8,0	16	10,2
Cu	0,1	56	3,0	0,7	66	3,5	2,5	7	2,0	2,1	75	4,2

h – товщина поверхневого шару; θ – крайовий кут змочування;

ρ – поверхневий електричний опір.



а) б)

Рис. 5. Фотографії поверхні гідрогельних матеріалів на основі Me/пГЕМА-пр-ПВП кополімерів ([Zn]=5 мас.%)
ГЕМА:ПВП:H_2O (мас.ч.): а – 80:20:0; б – 80:20:50

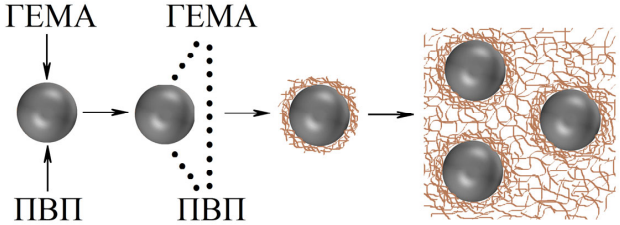


Рис. 6. Можлива схема утворення пГЕМА-пр-ПВП кополімерів за участі МН

Висновки. Полімеризацією в присутності металічних дисперсних наповнювачів і йонів металів змінного ступеня окиснення та без них синтезовані металонаповнені кополімери на основі швидкотвердних ГЕМА/ПВП композицій і встановлено, що метали з від'ємним електрохімічним потенціалом та їх сплави є каталізаторами кополімеризації ГЕМА з ПВП, причому активуюча дія металу тим вища, чим вищий його електрохімічний потенціал. Встановлені закономірності полімеризації ГЕМА/ПВП композицій на металічній поверхні за кімнатної температури, в присутності кисню. Підтверджено каталіз процесу через комплексоутворення з перенесенням заряду між компонентами вихідної композиції і металу-наповнювача та встановлено вплив поверхні наповнювача на термомеханічні (модуль накопичення і тангенс кута механічних втрат) властивості кополімерів.

Список літератури:

1. Fu S.-Y., Sun Z., Huang P., Li Y.-Q., Hu N. Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. *Nano Materials Science*. 2019. Vol. 1(1). P. 2–30.

2. Hanemann T., Szabó D. Polymer-nanoparticle composites: From synthesis to modern applications. *Materials.* 2010. Vol. 3. P. 3468–3517.

3. Grytsenko O., Dulebova L., Spišák E., Berezhnyy B. New materials based on polyvinylpyrrolidone-containing copolymers with ferromagnetic fillers. *Materials*. 2022. 15(15). P. 5183–5204.

4. Suberlyak O., Grytsenko O., Hishchak Kh. Synthesis of new conducting materials on the basis of polymer hydrogels. *Chemistry & Chemical Technology*. 2008. Vol. 2(2). P. 99–104.

5. Grytsenko O., Baran N., Dulebova L., Berezhnyy B. The effect of the filler nature on the properties of hydrogels based on polyvinylpyrrolidone copolymers. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Т. 33(72). №. 4. С. 211–216.

6. Суберляк О. В., Скорохода В. Й., Гриценко О. М. Наукові аспекти розроблення технології синтезу гідрофільних кополімерів полівінілпіролідону. *Вопросы химии и химической технологии*. 2000. № 1. С. 236–238.

7. Grytsenko O., Dulebova L., Suberlyak O., Skorokhoda V., Spišák E., Gajdos, I. Features of structure and properties of pHEMA-gr-PVP block copolymers, obtained in the presence of Fe^{2+}. *Materials.* 2020. Vol. 13(20). 4580–4594.

8. Ciardelli G., Cristallini C., Barbani N., Benedetti G., Crociani A., Travison L., Giusti P. Bioartificial polymeric materials: -amylase, poly(2-hydroxyethyl methacrylate), poly(N-vinylpyrrolidone) system. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 2002. Vol. 203. 1666–1673.

9. Торопцева А. М., Белогородская К. В., Бондаренко В. М.: Лабораторный практикум по химии и технологии высокомолекулярных соединений. Ленинград, Химия, 1972. 416 с.

10. Muller K. Identification and determination of polyvinylpyrrolidone (PVP) as well as determination of active substances in PVP-containing drug preparations. *Pharmaceutica acta Helvetiae*. 1968. № 43. P. 107–122.

11. Grytsenko O., Gajdos I., Spišák E., Krasinskyi V., Suberlyak O. Novel Ni/pHEMA-gr-PVP composites obtained by polymerization with simultaneous metal deposition: Structure and properties. *Materials.* 2019. Vol. 12. 1956–1973.

12. Flory P., Rehner J. Statistical mechanics of cross-linked polymer networks. *Journal of Chemical Physics*. 1943. Vol. 11. P. 521–526.

13. Bühler V. Polyvinylpyrrolidone Excipients for Pharmaceuticals: Povidone, Crospovidone and Copovidone; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2005; 254 p.

14. Липатов Ю.С. Физикохимия многокомпонентных полимерных систем. Полимерные смеси и сплавы. Наукова думка, Киев, 1986. 384 с.

Grytsenko O.M., Baran N.M., Voloshkevych P.P., Strogan O.I. INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE METALLIC FILLER NATURE ON THE REGULARITIES OF COPOLYMERIZATION OF 2-HYDROXYETHYLMETHACRYLATE WITH POLYVINYLPYRROLIDONE

The paper presents the study results of the effect of a metal filler (MF) presence on the regularities of copolymerization of 2-hydroxyethylmethacrylate (HEMA) with polyvinylpyrrolidone (PVP) and structure features formation of the composites obtained on the basis of HEMA with PVP copolymers. Following fine metal powders were used as fillers: Zn, Co, Ni, Fe, Cu, Ag and FeCo alloy with a particle size range of 10-50 μm. Composite hydrogels were obtained by introducing MF into the reaction composition during its polymerization in the presence of iron(II) sulfate. The use of $FeSO_4$ ensured the production of composites with high rate and maximum yield of polymer in air, at room temperature, without an additional vacuuming stage.

It was established that the polymerization of HEMA/PVP compositions in the presence of MF, although occurs at a slower rate, but without additional initiators, which indicates the active participation of the MF surface in the initiation of the polymerization process. The increasing activating action of the metal with the growth of its negative electrochemical potential was established as well. With the help of Fourier-transform infrared spectroscopy and dynamic mechanical thermal analysis, the formation of a grafted spatially-crosslinked copolymer based on HEMA and PVP (pHEMA-gr-PVP) was confirmed, the effect of MF on the formation of the structure of copolymers was shown, and the following structural parameters were investigated – the efficiency of PVP grafting and the molecular weight between crosslinks in polymer network.

It was found that metal microparticles introduced into the polymer play the role of additional crosslinking nodes and contribute to the formation of a more spatially crosslinked structure. It was experimentally proven that in the presence of a metal surface, a polymer network is formed, which is characterized by a different composition in the interfacial layer on the surface of the metal particle and in the polymer volume.

Key words: *polyvinylpyrrolidone, 2-hydroxyethylmethacrylate, copolymers, composite hydrogels, metal-filled hydrogels.*

УДК 535.372:657.547
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/30

Дістанов В.Б.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Мироненко Л.С.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Породнов А.О.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Фалалєєва Т.В.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

РОЗРОБКА АНТИБАКТЕРІАЛЬНИХ І ПРОТИВІРУСНИХ ПРЕПАРАТІВ НА ОСНОВІ ПОХІДНИХ ФОРМАЗАНІВ

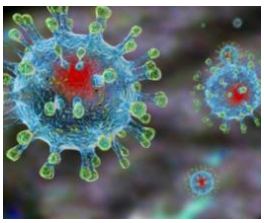
Дана робота присвячена розробці нових похідних формазанів, які знайшли широке застосування в різних галузях науки і техніки. Біологічне і промислове застосування формазанів починається від використання їх в якості аналітичних реагентів та барвників, і закінчується, насамперед цікавим для нас, застосуванням у фармакології. Адже різні формазани проявляють різні біологічні активності – антиоксидантні, противірусні, протимікробні, обезболюючі, протизапальні, протисудомні, анти-ВІЛ, протитуберкульозні, антигельмінтні та інші властивості. Це робить клас формазанів перспективним для синтезу та дослідження. Для хіміків формазани були цікаві у свій час як прекурсори для отримання поліазотистих гетероциклів. Пізніше були відкриті окисно-відновні системи «формазан-тетразолієва сіль», які зараз застосовуються в біохімії. Була розроблена велика кількість методів синтезу формазанів, багато з яких є не тільки лабораторними методиками, а і промисловими методами, більшість з яких – отримання арил- і гетерилформазанів. Окрім цього, формазани широко використовуються у якості барвників, адже їх колір може бути від червоного до глибоко пурпурно-чорного кольору. Також використовуються як ліганди в реакціях комплексоутворення і в якості аналітичних реагентів, де їх глибоке забарвлення робить їх гарними індикаторами окисно-відновних реакцій. Похідні формазану використовуються в якості носіїв іонних цезій-селективних електродів і у спектрофотометричному визначенню літію. Вірусні інфекції – одна з головних загроз для людства. Поширення небезпечних вірусних інфекцій (як наприклад, COVID-19) породжує необхідність пошуку та розробки нових противірусних препаратів, які не повинні бути токсичними для людини. Створення даних препаратів потребує проведення багатьох досліджень. Більш того, варіація вірусів є основною складністю на шляху до розробки вакцин та противірусних препаратів. Використання формазанів в якості прекурсорів дозволяє отримувати нові похідні з іншими властивостями. Одними з таких похідних являються тетразолієві солі. Біологічне і промислове використання солей тетразолію в залежності від будови є різноманітним. Даний клас речовин застосовується як індикатори життєдіяльності організмів, у дослідженні окисно-відновних процесів, для скринінгу дії медичних препаратів на шкідливі мікроорганізми та інше. Ключову роль у цьому відіграє система «формазан – тетразолієва сіль». Перспективним є дослідження даного класу речовин у якості противірусних та протимікробних препаратів. При отриманні тетразолієвих солей, важливою перевагою є легкість та дешевизна отримання вихідної речовини для синтезу – формазанів. В процесі роботи нами синтезовані нові похідні формазанів, які за своїми властивостями не поступаються закордонним аналогам, а в деяких випадках і перебільшують ці показники. Враховуючи, що синтезовані формазани перспективні для багатьох застосувань, ми розробили технологічну схему їх отримання для впровадження в виробництво. Технологічна схема не передбачає будь-яких ускладнень і дозволяє використовувати стандартну апаратуру, яка виробляється в Україні. Важливою перевагою в синтезі формазанів є достатньо легкі та дешеві способи їх отримання, доступність вихідних речовин і швидкість процесів синтезу.

Ключові слова: *Гідразони, формазани, тетразолієві солі, антимікробні і противірусні препарати, програма PASS, спектри поглинання, азосполучення, діазотування, технологічна схема.*

Постановка проблеми. З давніх часів вірусні інфекції переслідували людство, які приводили до значних втрат населення багатьох регіонів. Засоби якими в ті часи боролись з хворобами зараз не мають сенсу. Будь які віруси звикають до препаратів і намагаються до них пристосуватись. При цьому вони отримують нові властивості і стають більш агресивними. Для боротьбі з ними завжди потрібні більш ефективні речовини. Розробка нових препаратів досить складна задача, оскільки вірус призвичається до клітин хазяїна для реплікації. Окрім цього основною проблемою, яка стає на заваді, це варіація вірусу.

На даний час актуальним є пошук нових біологічно активних речовин, які можуть бути більш ефективними противірусними і антибактеріальними препаратами.

Особливо ця проблема стає більш актуальною в сучасний час. Поява і розповсюдження коронавірусу SARS-CoV-2 та його модифікацій вже нанесла світу непоправні наслідки, які будуть ще збільшуватися.





Для боротьбі з відомими вірусами і тими, які ще не досліджувались треба бути готовими. І це основне питання, яке потрібно вирішувати дослідникам.

Будь який клас органічних речовин має біологічну активність в різних напрямках. Одним з таких напрямків є синтез формазанів і похідних на їх основі.

Багато досліджень присвячено дії формазанів на грампозитивні (B. subtilis, M. luteus, B. sphaericus, S. aureus) та грамнегативні (C. violaceum, K. aerogenes, P. aeruginosa, E. coli, K. pneumoniae, S. Paratyphia) організми у порівнянні зі стандартними антибактеріальними агентами, як пеніцилін та стрептоміцин при однакових умовах порівняння [1–4].

При розробці нових препаратів треба також враховувати мутагенність та привикання вірусів до антибіотиків.

Окремо стоїть проблема лікування людини після хірургічного втручання, після опікових травм тощо. Відомі бактерії, які перешкоджають загоюванню поранених місць та заважають скорішого одужання людини.

Як показали наші попередні дослідження [3], а також дослідження закордонних вчених [1, 2], деякі формазани є перспективними для боротьби з наступними культурами: P. aerugenosa, E. coli, S. aureus, B. subtilis, C. albicans.

Першим мікробіологом, який побачив бактерії за допомогою мікроскопу, був Антоні ван Левенгук.



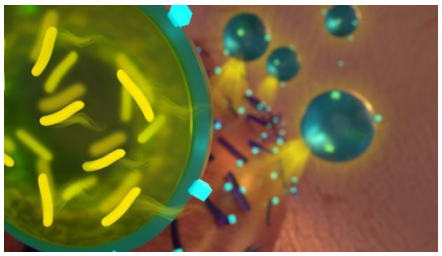
Зараз фотографування бактерій виконується за допомогою скануючої електронної мікроскопії.

Як виглядають ці бактерії?

Нижче наведені фотографії бактерій, проти котрих ми намагаємось розробити противірусні препарати.



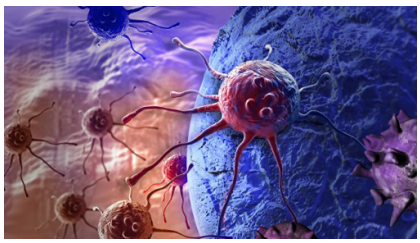
Кишкова паличка E. coli



Стафілокок S. aureus



Синьогнійна паличка P. Aeruginosa



Непатогенна бактерія B. subtilis



Диплоїдний грибок C. albicans, яку вирощували на агарі

Приймаючи до уваги літературні дані [1, 5, 6] та наші попередні дослідження [7-9], які свідчать, що і формазани, і солі тетразолію мають широкий спектр біологічної активності можна стверджувати, що тетразолієві солі є цікавим об'єктом для дослідження.

Біологічне і промислове використання солей тетразолію в залежності від будови є різноманітним. Даний клас речовин застосовується як індикатори життєдіяльності організмів, у дослідженні окисно-відновних процесів, для скринінгу дії медичних препаратів на шкідливі мікроорганізми та іншого. Ключову роль у цьому відіграє система «формазан – тетразолієва сіль». Перспективним є дослідження даного класу речовин у якості противірусних та протимікробних препаратів.

При отриманні тетразолієвих солей, важливою перевагою є легкість та дешевизна отримання вихідної речовини для синтезу – формазанів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як витікає з літературних даних існує декілька методів їх отримання. Більш розповсюджений спосіб їх синтезу оснований на реакції діазонієвих сполук з гідразонами альдегідів. На реалізацію цього методу впливають різні чинники – наявність замісників, які завдяки своєї структури приводять до утворення внутрішньомолекулярних зв'язків, або за рахунок просторової дії являються інгібіторами реакції. Такі чинники можуть суттєво знизити вихід кінцевого продукту. В цьому випадку потрібні більш жорсткі умови проведення процесу.

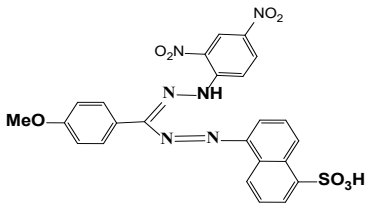
Електронна природа замісників будь-якої частини молекули суттєво впливає на властивості синтезованих речовин. Враховуючи ці фактори, був синтезований ряд гідразонів, з використанням яких отримані відповідні формазани.

Так як з літературних джерел відомо [10–12], що формазани мають широкий спектр біологічної активності була визначена можлива біологічна активність синтезованих речовин за допомогою програми PASS [13].

В таблиці 1 наведені дані розрахунку ймовірної біологічної активності одного з синтезованих формазанів.

Таблиця 1

Розрахована біологічна активність1-(5-сульфонафтил)-3- (4-метоксифеніл)-5-(2,4-динітрофеніл)формазану



P_a	P_i	Активність
0,796	0,005	Інгібітор гліцерил-етермонооксигенази
0,776	0,004	Інгібітор дегідрогенази амінобутиральдегіда
0,773	0,005	Інгібітор дегідрогенази гамма-гуанідінобутиральдегіда
0,717	0,004	Інгібітор алкоголь *о*-ацетилтрансферази
0,674	0,008	Подразнення очей, неактивний
0,583	0,001	Інгібітор редуктази азобензену
0,534	0,004	Інгібітор 1,2-альфа-L-фукозідази
0,524	0,007	Інгібітор гліцин-тРНК лігази
0,508	0,003	Протигеморагічний
0,542	0,051	Інгібітор бензоат-КоА лігази
0,533	0,042	Лікування передпухлинних станів
0,495	0,013	Протитуберкульозний
0,464	0,019	Подразнення шкіри, неактивний
0,445	0,005	Противірусний (грип А)
0,456	0,016	Протипротозойний (Амеба)
0,439	0,004	Інгібітор малеата ізомерази
0,472	0,044	Інгібітор супероксиддисмутази
0,433	0,031	Антимікобактеріальний
0,335	0,070	Протипротозойний (трипаносоми)
0,350	0,159	Противірусний (пікорнавірус)

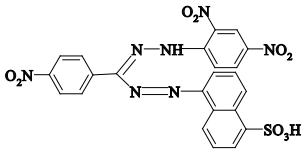
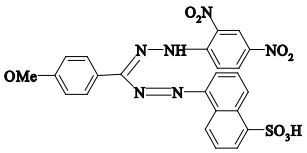
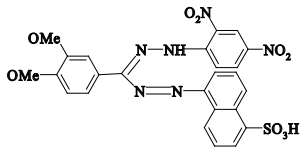
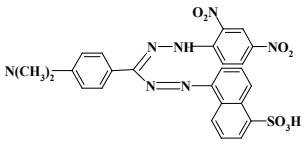
Як можна побачити, запропоновані сполуки можуть мати біологічну активність в різних напрямках, в тому числі противірусну і антибактеріальну активність.

В таблиці 2 наведені дані з досліджень антимікробної дії синтезованих сполук.

Для вирішення питання, в якій мірі наші дослідження відповідають за ефективністю своєї

Таблиця 2

Бактеріостатичний ефект синтезованих формазанів

Формазан	Зона затримки мікробної діяльності, мм				
	Культура				
	P. aeruginosa	E. coli	S. aureus	B. subtilis	C. albicans
	19	21	22	17	22
	21	22	23	18	21
	24	23	25	21	23
	23	23	24	21	22

біологічної активності у порівнянні з антибактеріальними речовинами в Світі, проведений аналіз закордонних розробок в цьому напрямку, який наведений в таблиці 3.

В результаті порівняння вітчизняних та закордонних досліджень, можна зробити наступний висновок: синтезовані формазани проявляють гарну антимікробну дію у порівнянні як зі стандартною дозою препарату ципрофлоксацину, так і з результатами інших досліджень, а деякі взагалі перевищують його показники.

Формулювання цілей статті. Незважаючи на те, що відомі і розроблені нами формазани показують гарні результати, постає питання необхідності підвищення біологічної активності похідних в цьому класі органічних сполук. Для вирішення цієї проблеми треба проводити пошук шляхів синтезу інших угрупувань, які, можливо, приведуть до створення нових речовин з підвищеними характеристиками. Одним з таких напрямків є отримання тетразолієвих солей формазану. Система «формазан – сіль тетразолію» проявляє специфічні властивості. Легкість відновлення безбарвних або слабо забарвлених солей тетразолію в інтенсивно забарвлені формазани дозволяє широко використовувати цю реакцію в медицині, біології, біохімії, цитохімії та гістохімії.

Таке поєднання формазанів з їх тетразолієвими солями розкриває нові можливості використання таких похідних.

Якщо брати до уваги, що технологія отримання як формазанів, так і інших похідних на їх основі не є складною, вони являються перспективними для промислового впровадження.

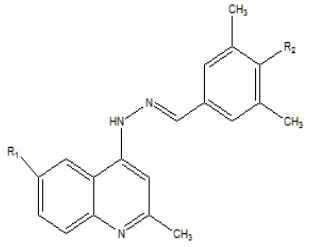
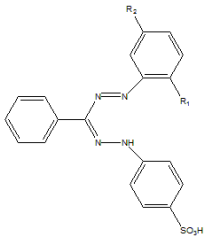
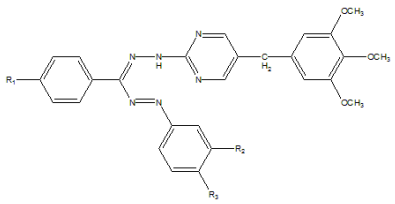
Метою даної роботи є розробка технології отримання формазанів і тетразолієвих солей на їх основі, дослідження фізико-хімічних властивостей і біологічної активності синтезованих похідних.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основним способом отримання солей тетразолію є окислення формазанів. При цьому важливим є підбір правильного окисника та середовища, в якому буде проходити реакція. Для цього можна використовувати дуже широкий спектр окислювачів, включаючи оксиди азоту, азотну кислоту, солі ртуті, оксид хрому, діоксид свинцю, галогени, алкілнітрити, тетраацетат свинцю, перекис водню та атмосферний кисень. Спектр сполук, що можуть бути використані для окислення формазанів, досить широкий. Тим не менше, жоден з цих окислювачів не може розглядатися як універсальний реагент для отримання солей тетразолію.

Реакція окислення формазанів є основним способом отримання 2,5-ди-, 2,3-ди- та 2,3,5-тризаміщенних солей тетразолію.

Таблиця 3

Бактеріостатичний ефект формазанів. синтезованих закордонними дослідниками

		Зона затримки мікробної діяльності, мм				
		Культура				
R_1	R_2	E. coli	P. aeruginosa	S. aureus	C. albicans	B. subtilis
Cl	OC_2H_5	22	19	21	24	25
Br	OC_2H_5	19	24	24	19	24
Cl	OC_3H_7	24	18	25	25	21
Br	OC_3H_7	20	22	21	21	23
Cl	OC_4H_9	20	24	22	25	25
Br	OC_4H_9	18	19	20	20	21
		Зона затримки мікробної діяльності, мм				
		Культура				
R_1	R_2	E. coli	P. aeruginosa	S. aureus	C. albicans	B. subtilis
COOH	H	12		20		24
OH	NO_2	15		22		25
		Зона затримки мікробної діяльності, мм				
		Культура				
R_1	R_2 R_3	E.coli	P.aeruginosa	S.aureus	C.albicans	B.subtilis
H	H NO_2	20	12	15		22
NO_2	H Br	19	21	22		25
NO_2	H NO_2	21	20	21		25
NO_2	F Cl	20	18	21		15

Важливим етапом є вибір окисника для отримання солі тетразолію. Хоча у якості окисників і використовується майже увесь набір відомих окисників.

Важливо підкреслити, що немає універсального окисника для всіх типів формазанів. Вибір окисника може бути пов'язаний з природою замісника в формазані або з проблемою подальшого виділення солі тетразолію з реакційного середовища.

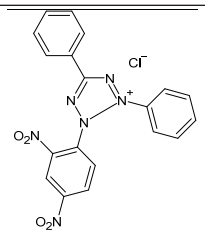
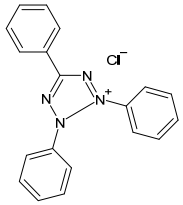
Для отримання солей тетразолію на основі синтезованих нами раніше формазанів в якості окислювачів використовувались пероксид водню, перманганат калію, тетраацетат свинцю тощо.

Будова отриманих сполук підтверджується даними елементного аналізу на нітроген за методом Дюма-Прегдтля (таблиця 4) та електронними спектрами поглинання, які виміряні на спектрофотометрі «Specord M-40» (рис. 1, 2).

Як видно з представлених рисунків, довгохвильова полоса поглинання знаходиться в області 315–320 нм. В той же час максимум поглинання вихідних формазанів знаходиться в області 410–415 нм. Це свідчить ще одним

Таблиця 4

Характеристики синтезованих солей тетразолію

Сполука	Вихід, %	$T_{пл}$, °C	Елементний аналіз				
			Знайдено, %		Брутто-формула	Вирахувано, %	
			N	Cl		N	Cl
	70	25–260	14.99 15.03	8.25 8.28	$C_{19}H_{13}ClN_6O_4$	15.07	8.35
	75	250	16.56 16.60	10.54 10.58	$C_{19}H_{15}ClN_4$	16.73	10.59

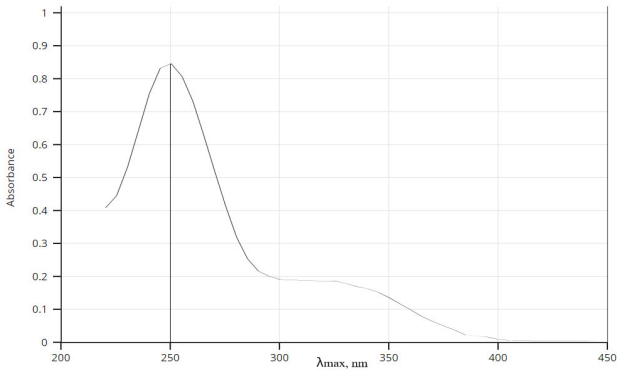


Рис. 1. Спектр поглинання 2,3,5-трифенілтетразолію хлориду в етанолі

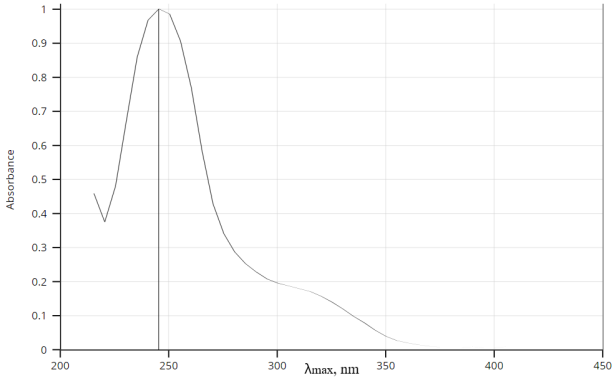


Рис. 2. Спектр поглинання 2,5-дифеніл-3-(2,4-динітрофеніл)- тетразолію хлориду в етанолі

підтвердженням структури отриманих солей тетразолію.

Враховуючи, що застосування солей тетразолію в якості індикаторів передбачає використовувати у вигляді водних або спиртових розчинах, ми визначили просторову будову синтезованих сполук.

В зв'язку з цим були проведені квантово-хімічні розрахунки з визначення просторової будови отриманих солей тетразолію, які наведені на рисунках 3 і 4. Просторова будова синтезованих сполук зроблена за допомогою програми Chem 3D 16.0, яка дає можливість конструювати молекулу за її структурною формулою в будь якому ракурсі.

Як показали квантово-хімічні розрахунки, нітрогрупа в орто- положенні до формазанового циклу виводить фенольне кільце з площини молекули на 15–20 градусів.

Розчинність цієї сполуки суттєво збільшилась.

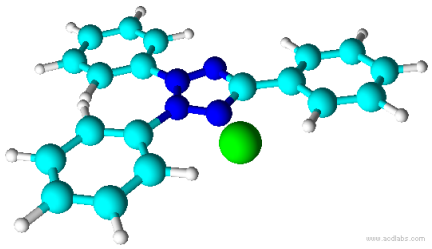


Рис. 3. Просторова будова молекули 2,3,5-трифенілтетразолію хлориду

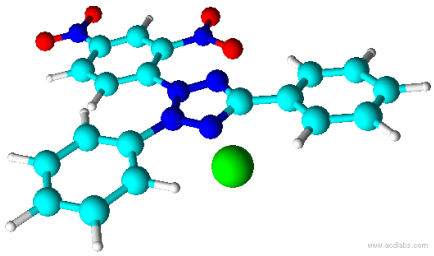
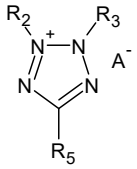
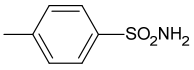
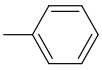
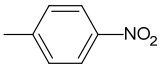
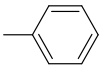
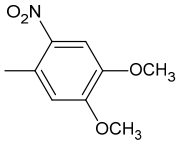
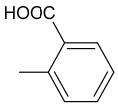
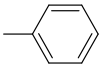
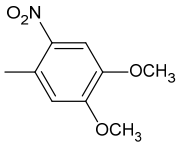
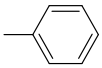
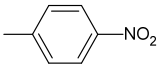
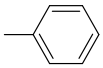


Рис. 4. Просторова будова молекули 2,5-дифеніл-3-(2,4-динітрофеніл)тетразолію хлориду

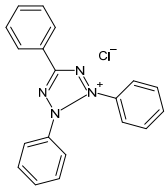
Таблиця 5

Біологічна активність солей тетразолію за даними закордонних досліджень

№					Біологічна активність
	R_2	R_3	R_5	A	
1			$-C_{11}H_{23}$	Cl	Антибактеріальна активність проти *Streptococcus plantarum*
2				Br	Антивірусна активність проти хвороби Ньюкасла (пташина псевдочума)
3				Br	
4				Cl	Антималярійна активність проти *P. falciparum*

Таблиця 6

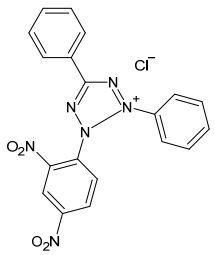
Розрахована біологічна активність 2,3,5-трифенілтетразолію хлориду



P_a	P_i	Активність
1	2	3
0,989	0,003	Антигіпертензивна
0,875	0,002	Інгібітор 2-нітропропан диоксигенази
0,684	0,002	Інгібітор проколаген-лізин 5-диоксигенази
0,659	0,077	Інгібітор аспулвінон диметилалілтрансферази
0,634	0,030	Інгібітор фактора комплементу D
0,624	0,057	Інгібітор глікозилфосфатідилінозитол фосфоліпази D
0,610	0,045	5-O-(4-кумарол)-D-гуінат 3'-монооксигенази інгібітор
0,575	0,035	Інгібітор фіоредоксину
0,574	0,135	Лікування фобічних розладів
0,561	0,067	Інгібітор глутамілендопептидази II
0,561	0,048	Інгібітор фталат-4,5-диоксигенази
0,552	0,093	Антагоніст нікотинового α_6, β_3, β_4, α_5 -рецептора
0,548	0,111	Інгібітор тестостерон 17β-дегідрогенази (НАДФ+)

Таблиця 7

Розрахована біологічна активність 2,5-дифеніл-3-(2,4-динітрофеніл) тетразолію хлориду



P_a	P_i	Активність
1	2	3
0,951	0,004	Антигіпертензивна
0,724	0,004	Інгібітор 2-нітропропан диоксигенази
0,667	0,054	Інгібітор акроциліндропепсину
0,667	0,054	Інгібітор химозіну
0,667	0,054	Інгібітор сахаропепсину
0,634	0,094	Інгібітор убіквінол-цитохром-с редуктази
0,588	0,052	Інгібітор фузарінін-С орнітінестерази
0,563	0,028	Інгібітор L-глутаматоксидази
0,548	0,044	Інгібітор фосфоліпід-транслокаційної АТФази
0,524	0,101	Інгібітор поліпоропепсину
0,523	0,040	Інгібітор (R)-6-гідроксинікотин оксидази
0,512	0,019	UGT2B12 субстрат
0,495	0,055	Лікування передпухлинних станів

Продовження табл. 6

1	2	3
0,547	0,094	Інгібітор акроциліндропепсину
0,547	0,094	Інгібітор хімозину
0,547	0,094	Інгібітор сахаропепсину
0,540	0,072	Стимулятор функції нирок
0,528	0,067	Інгібитор омптину
0,523	0,052	Інгібітор фосфоліпід-транслокаційної АТФази
0,520	0,063	Інгібітор НАДФН пероксидази
0,515	0,045	Інгібітор птерин деамінази
0,513	0,039	Інгібітор амінобутиральдегід дегідрогенази
0,512	0,052	Інгібітор фактора В згортання крові Лімулус
0,510	0,049	Інгібітор хлоридпероксидази
0,508	0,086	Інгібітор таурин дегідрогенази
0,508	0,011	Інгібітор таурин-2-оксоглутарат трансамінази
0,504	0,089	Інгібітор фузарінін-С орнізинестерази
0,504	0,089	Інгібітор псевдолізину
0,501	0,127	CYP2J субстрат
0,501	0,076	Антагонист нікотинового α_2, β_2-рецептора
0,498	0,084	Інгібитор цукрової фосфатази
0,492	0,054	Інгібитор дегідро-L-гулонатдекарбоксилази
0,488	0,051	Інгібітор (R)-6-гідроксінікотин оксидази
0,484	0,060	Інгібітор веномбіну АВ

Продовження табл. 7

1	2	3
0,490	0,036	Інгібітор алькоголь-О-ацетилтрансферази
0,486	0,016	ГСТ Ф субстрат
0,480	0,030	Інгібітор бісфосфогліцератфосфатази
0,461	0,035	Інгібітор пластоквінол-пластоціанінредуктази
0,453	0,022	Інгібітор гипонітрітредуктази
0,452	0,014	ГСТ Ф1-1 субстрат
0,444	0,073	ГСТ А субстрат
0,430	0,004	Інгібітор проколаген-лізин 5-диоксигенази
0,416	0,005	Інгібітор мукорпепсину
0,414	0,054	Інгібітор S-формілглутат-іон гідролази
0,413	0,039	Інгібітор CDK9/циклін Т1
0,404	0,057	Інгібітор спермідіндегідрогенази

Як відомо з закордонних даних [5, 6], тетразолієві солі мають неабияку антибактеріальну, противірусну і іншу біологічну активність (таблиця 5).

Враховуючі цю інформацію ми визначили можливу біологічну активність синтезованих сполук.

В таблицях 6, 7 наведені дані розрахунку ймовірної біологічної активності синтезованих солей тетразолію.

Аналізуючи вище наведені таблиці розрахунку біологічної активності, запропоновані нами сполуки можуть мати різноманітну актив-

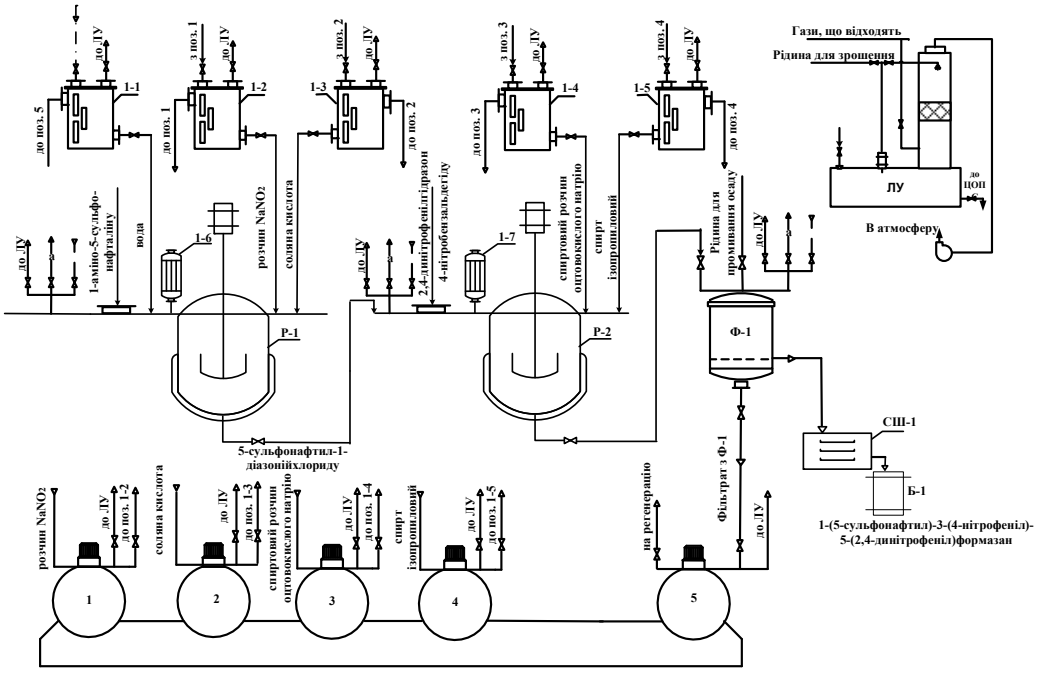


Рис. 5. Технологічна схема отримання 1-(5-сульфонафтил)-3-(4-нітрофеніл)-5-(2,4-динітрофеніл)формазану: 1, 2, 3, 4 – сховища відповідно розчину нітриту натрію; соляної кислоти; розчину оцтовокислого натрію; спирту ізопропілового; 5 – збірник фільтрату; поз. 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 – мірні ємності; поз. 1-6, 1-7 – теплообмінники; Р-1 – реактор для отримання 5-сульфонафтил-1-діазонійхлориду; Р-2 – реактор для отримання 1-(5-сульфонафтил)-3-(4-нітрофеніл)-5-(2,4-динітрофеніл)формазану; Ф-1 – вакуумний фільтр; СШ-1 поличкова сушарка; Б-1 тара для сухого продукту; ЛУ – локальна установка для уловлювання газів, що відходять

ність, в тому числі, противірусну, протитуберкульозну тощо.

Синтезовані похідні солей тетразолію розглядаються нами як потенційні біологічно активні речовини. Окрім того, літературні дані підтверджують антибактеріальну та противірусну активність отриманих солей тетразолію.

Враховуючи те, що синтезовані формазани мають неабияку біологічну активність, перспективні при застосуванні в медицині, мають значну вірогідність знайти застосування в якості барвників різної спрямованості, в синтезі стабільних радикалів для вирішення багатьох теоретичних та практичних задач, нами запропонована принципова схема промислового отримання формазанів.

Висновки. Проведені нами дослідження фізико-хімічних і біологічних показників показують перспективність розробки формазанів і солей тетразолію на їх основі. Також з вищенаведеного видно, що можлива технологічна схема отримання формазанів передбачає використання типового стандартного обладнання і не є складною в апаратурному оформленні. Для створення технологічної схеми отримання тетразолієвих солей потрібно додати тільки два апарати.

Список літератури:

1. Shawali A. S., Samy N. A. Functionalized formazans: A review on recent progress in their pharmacological activities. *J. of Adv. Res.* 2015. № 6(3). P. 241–254.

2. Babu A. N., Nadendla R. R. Synthesis and Antimicrobial Activity of 1-Substituted Phenyl-3-substitutedPhenyl-4-[(3,4,5-trimethoxy)-5-benzyl]-4-amino-pyrimidine formazans. *Asian J. Chem*. 2011. № 23(1). P. 278–280.

3. Немченко Н. В., Пунько В. С., Калашнікова Т. О., Мироненко Л. С., Дістанов В. Б. Синтез та дослідження похідних формазанів – потенційних біологічно активних речовин. *Ліки – людині. Сучасні проблеми фармакотерапії і призначення лікарських засобів:* матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: НФаУ, 2018. Т. 2. С. 209–210.

4. Немченко Н. В., Дистанов В. Б., Мироненко Л. С. Синтез и исследование формазанов с антибактериальной активностью. *Проблемы и достижения химии кислород- и азотсодержащих биологически активных соединений:* тезисы докладов III Всероссийской молодежной конференции. Уфа: БГУ, 2018. С. 118.

5. Vinay S. M., Sunita D., Chowdhary B. L. Synthesis of Some Newer Formazans and Tetrazolium Salts as Antiviral Agents. *Pharmazie*, 1978. № 33. Issue 12. P. 790–792.

6. Cui X., Vlahakis J. Z., Crandall I. E., Szarek W. A. Anti-Plasmodium activity of tetrazolium salts. *Bioorgan. & Medic. Chemistry*. 2008. № 16. Issue 4. P. 1927–1947.

7. Дістанов В. Б., Немченко Н. В., Фалалєєва Т. В., Мироненко Л. С. Синтез нових похідних формазанів – потенційних біологічно активних речовин. *Актуальні проблеми науково-промислового комплексу регіонів – 2018:* тези доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції. Рубіжне: Інститут хімічних технологій Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2018. С. 26–30.

8. Дістанов В. Б., Голубенко Є. А., Породнов А. О., Мироненко Л. С., Фалалєєва Т. В. Вивчення властивостей гідразонів, в якості вихідних продуктів отримання противірусних препаратів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2019)*: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2019. Ч. 2. С. 247.

9. Голубенко Є. А., Пунько В. С., Івченко П. П., Мироненко Л. С., Калашнікова Т. О., Дістанов В. Б. Арилгідразони – прекурсори для синтезу формазанів. *Ліки – людині. Сучасні проблеми фармакотерапії і призначення лікарських засобів:* матеріали ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції. Х. : НФУ, 2019. Т. 2. С. 67–68.

10. Бузыкин Б. И., Липунова Г. Н., Сысоева Л. П., Русинова Л. И. Химия формазанов. М. : «Наука», 1992. 375 с.

11. Mahmoud H. K., Asghar B. H., Harras M. F., Farghaly T. A. Nano-sized Formazan analogues: Synthesis, structure elucidation, antimicrobial activity and Docking study for COVID-19. *Bioorganic Chemistry*. 2020. № 105:104354.

12. Nagham M. A., Dhuha R. K. New Formazan Compounds (Synthesis, Identification, Physical Properties). *J. of Chem. and Pharm. Sciences*. 2017. № 10. Issue 3. P. 1461–1472.

13. PASS Online. Way2Drug – Predictive Services, 2022. URL: http://www.pharmaexpert.ru/passonline/index.php (дата звернення: 19.09.2022).

Distanov V.B., Myronenko L.S., Porodnov A.O., Falalieieva T.V. DEVELOPMENT OF ANTIBACTERIAL AND ANTIVIRAL DRUGS BASED ON FORMASAN DERIVATIVES

This work is devoted to the development of new formazan derivatives, which have found wide application in various fields of science and technology. The biological and industrial usage of formazans begins with their application as analytical reagents and dyes, and ends, primarily interesting for us, with their use in pharmacology. After all, different formazans exhibit different biological activities – antioxidant, antiviral, antimicrobial, analgesic, anti-inflammatory, anticonvulsant, anti-HIV, anti-tuberculosis, anthelmintic and other properties. This makes the formazan class promising for synthesis and research. For chemists, formazans were interesting at one time as precursors for obtaining polynitrogenous heterocycles. Later, redox systems «formazan-tetrazolium salt» were discovered, which are now used in biochemistry. A large number of formazan's synthesis methods have been developed, many of which are not only laboratory techniques, but also industrial methods, most of which -- are obtaining aryl- and heterylformazans. In addition, formazans are widely used as dyes, because their color can vary in the range from red to deep purple-black. They are also used as ligands in complexation reactions and as analytical reagents, where their deep color makes them good indicators of redox reactions. Formazan derivatives are used as carriers of ion cesium-selective electrodes and in spectrophotometric identification of lithium. Viral infections are one of the main danger for humanity. The spread of dangerous viral infections (like, for example, COVID-19) gives rise to the need to find and develop new antiviral drugs that should not be toxic to humans. Creation of these drugs requires many studies. Moreover, the variation of viruses is a major difficulty in the development of vaccines and antiviral drugs. Usage of formazans as precursors allows to obtain new derivatives with another properties. Tetrazolium salts are one of such derivatives. Biological and industrial employment of tetrazolium salts, depending on their structure, is diverse. This class of substances is used as indicators of organism's vital activity, in study of redox processes, for screening of medical preparations effect on harmful microorganisms, etc. «Formazan – tetrazolium salt» system plays a key role in this. Study of this class of substances as antiviral and antimicrobial drugs is promising. When obtaining tetrazolium salts, an important advantage is the ease and cheapness of obtaining the original substance for synthesis -- formazans. In the course of our work, we have synthesized new formazan derivatives, which in terms of their properties are not inferior to foreign analogues, and in some cases even surpass these indicators. Taking into account that synthesized formazans are promising for many applications, we have developed a technological scheme of their obtaining to introduce them into production. The technological scheme does not involve any complications and allows the usage of standard equipment manufactured in Ukraine. An important advantage in the synthesis of formazans is relatively easy and cheap methods of their obtaining, the availability of original substances and speed of synthesis processes.

Key words: *Hydrazones, formazans, tetrazolium salts, antimicrobial and antiviral drugs, the PASS program, absorption spectra, azocoupling, diazotisation, technological scheme.*

УДК 621.762
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/31

Жданюк Н.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

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

ГЕЛЕВЕ ЛИТТЯ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті досліджені фізико-хімічні властивості керамічного матеріалу отриманого методом гелевого лиття. Даний метод формування вивчався з погляду можливості його практичної реалізації, а також з урахуванням обмежень, що можуть виникати при експлуатації виробів. Дослідження підтвердили можливість формування керамічних виробів методом гелевого лиття на основі каоліну Глуховецького родовища з використанням гелеутворювача агару. Цінність методу гелевого лиття полягає у можливості отримання виробів будь-якої геометричної форми. У досліджені були отримані зразки із суспензії співвідношенням твердої фази до рідкої від 0,3 до 1,8. Зразки із співвідношенням твердої до рідкої фази менше 0,35 мали рідку консистенцію і отримані зразки мали незадовільні механічні та фізико-хімічні властивості. При співвідношенні твердої і рідкої фази вище 1,5 керамічна маса втрачала текучість, що не дало можливості сформувати зразки. Застосування дефлуколянту дозволило отримати зразки з вищим вмістом каоліну. У роботі досліджено повітряну, вогневу та загальні усадки керамічних виробів. Для зразків з вищою концентрацією каоліну у глинистій суспензії характерна нижче значення усадки. Загальна усадка виробів виготовлених із додаванням триполіфосфату натрію ($Na_5P_3O_{10}$) знизилася на 2-3% у порівнянні з відповідними зразками без використання електроліту. З метою оцінки механічних властивостей керамічних зразків було досліджено їх міцність на вигин. Отримані зразки характеризуються високими механічними властивостями. Міцність на вигин зразків лежала у діапазоні 4,7÷9,5 МПа. Встановлено, що міцність керамічних зразків зростала із збільшенням концентрації каоліну у глинистій дисперсії та підвищенням вмісту дефлокулянта. Дослідження показало, що всі зразки мали задовільні значення водопоглинення (5-10%). З підвищенням вмісту твердої фази у глинистій дисперсії та підвищенням вмісту дефлокулянта у дисперсії водопоглинення зразків зменшувалися. Дослідження лугостійкості керамічних матеріалів показало, що вона не перевищує 51%. Кераміку даного складу недоцільно використовувати в лужних середовищах.

Ключові слова: *гелеве лиття, дисперсна система, гелеутворювач, усадка, міцність, водопоглинення, водостійкість, хімічна стійкість.*

Постановка проблеми. Гелеве лиття є одним із перспективних методів формування керамічних матеріалів. Цей метод представляє собою лиття в непористу форму суміші глинистої суспензії і гелеутворювача. Полімеризація такої системи приводить до утворення тривимірного гелю, який утримує керамічні частинки. Таким чином, досягається однорідність керамічних матеріалів, що дозволяє використовувати гелеве лиття для формування нанокомпозитних матеріалів, прозорої кераміки та інших мікроструктурних матеріалів [1].

Перші системи гелевого лиття базувалися на використанні акриламіду (АМ). Недоліком даної розроби було те, що АМ мав високий ступінь нейротоксичності [2]. Враховуючи, що метод гелевого лиття є унікальним та дає можливість виготовляти керамічні вироби будь-якої форми та однорідної структури, виникла необхідність пошуку альтернативних малотоксичних або нетоксичних гелеутворювачів.

Також важливим завданням дослідження є можливість виготовлення методом гелевого лиття керамічних виробів на основі місцевої сировини – каоліну Глуховецького родовища та дослідження їх властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод гелевого лиття було розроблено в Національній лабораторії Oak Ridge National Laboratory (ORNL), США, у 1990-х роках [3]. Перші дослідження базувалися на використанні системи акриламід (АМ) – N,N-метиленбісакриламід (МВАМ), де АМ використовується як основний мономер, а МВАМ як зшиваючий. Але широке застосування

було не можливе через високу токсичність полімерної складової.

Інтерес до даного методу гелевого лиття з роками посилювався завдяки його суттєвим перевагам. Даний метод дозволяє отримувати як високощільні матеріали, так і пористі. Також, метод гелевого лиття можливо виготовити вироби з високими механічними властивостями. Так, високі показники міцності на вигин зразків у необробленому стані, дозволяє застосовувати до них додаткову механічну обробку [4]. Простота впровадження методу дозволяє використовувати його для масового виробництва керамічних виробів. Цінність методу також полягає в тому, що низький вміст органіки та легке її видалення під час випалу дозволяє не застосовувати спеціальний етап вигорання. Ефективність цієї техніки формування також актуальна для отримання дуже щільного, тонкого та однорідного продукту [5]. Крім того, зовсім недавно цей метод був успішно поєднаний зі стереолітографією для виготовлення складної форми компонентів, що відкриває цікаві нові розробки у формуванні [6].

Дослідження можливості використання менш токсичних полімерних складових привело до використання систем на основі АМ та 2-гідроксіетилметакрилату (ГЕМА) [7] та ГЕМА з полівініловим піролідоном [8]. Недоліком таких систем є те, що ГЕМА здатен утворювати гелі на водній основі лише на дуже високих рівнях концентрації (8–40 об.%), збільшуючи вартість і час переробки, що суттєво обмежує її промислове використання [9].

Зовсім недавно був запатентований водорозчинний співполімер, що складається з ізобутилену та малеїнового ангідриду, ISOBAM®. Він утворює тіла з однорідною мікроструктурою при високому вмісті твердої фази (до 80 об.%) і низькому вмісті органічних включень в (вміст <1 мас.% по відношенню до керамічного порошку) та забезпечує низьку усадку керамічних виробів та відсутність тріщин [10]. Гелеве лиття з використанням ISOBAM® продемонструвало свою ефективність у процесах виготовлення прозорої кераміки. Крім того, позитивною стороною даного матеріалу є те, що він водорозчинний та малотоксичний. Цей продукт одночасно виконує роль гелеутворювача і диспергатора та утворює твердий каркас у керамічній суспензії при дуже низькій концентраціях і при кімнатній температурі. У роботі [11] досліджено вплив pH та електролітів на гелеутворення з використанням ISOBAM®, досліджено дзета-потенціал та криві в'язкості. Отримані матеріали містили високий відсоток твердої фази, вміст гелеутворювача у дисперсії складав 0,1–0,7 мас.%. Однак поведінка дисперсії та гелеутворення із використанням ISOBAM® ще не достатньо вивчена.

Для зниження експлуатаційних ризиків і забруднення навколишнього середовища були випробувані біополімери та природні полімери [12]. До останньої групи належать глобулярні білки, агар і агароза, желатин, карагенан, хітозан і альгінат натрію. Використання біополімерів та природних полімерів підтвердило можливість їх використання в якості гелеутворювача та гарантуючи екологічність процесу. У даній роботі отримано керамічні матеріали методом гелевого лиття на основі місцевої сировини і нетоксичного гелеутворювача агара та вивчено їх властивості.

Постановка завдання. Мета роботи – методом гелевого лиття отримати керамічні матеріали на основі каоліну з використанням гелеутворювача агару та дослідити їх властивості.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Отримати керамічні вироби методом гелевого лиття на основі каоліну.

2. Вивчити вплив вмісту каоліну, гелеутворювача та дефлокулянта на формувальні властивості глинистої суспензії.

3. Визначити вплив вмісту каоліну, гелеутворювача та дефлокулянта на та механічні та фізико-хімічні властивості керамічних зразків.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Вихідним матеріалом для приготування керамічних суспензій використовували каолін Глуховецького родовища (фракція 0,1-0,2 мм).* Каолін – це гірська порода, глиниста частина якої представлена переважно каолінітом, вміст якого для родовищ України складає 55...60% маси породи. Хімічна формула мінералу – $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$. В якості гелеутворювача використано агар (05040 FLUKA), в якості дефлокулянта – триполіфосфат натрію (Klebrig**).**

Для приготування розчину агару відповідну наважку додавали невеликими порціями до визначеного об'єму дистильованої води при енергійному перемішуванні. Одержану суміш нагрівали на водяній бані при постійному перемішуванні до повного розчинення частинок агару.

Для приготування глинистої суспензії брали наважку каоліну, поміщали в склянку та добавляли відповідну кількість розчину агару та триполіфосфату натрію. Співвідношення твердої фази до рідкої (т/р) у зразках складало від 0,3 до 1,8.

Одержані суспензії ретельно перемішували на магнітній мішалці до повної гомогенізації. Для проведення гелеутворення суспензію витримували на водяній бані протягом 1 год. за температури 60ºС та відливали у силіконові форми розміром 75х30х8 мм. Зразки були висушені на повітрі та відпалені за температури 1200ºС протягом 1 години.

Розрахунок повітряної ($У_п$), вогневої ($У_в$) та загальної ($У_з$) усадок зразків визначали за формулами:

$$У_п = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \cdot 100\%,$$

$$У_в = \frac{V_2 - V_3}{V_1} \cdot 100\%,$$

$$У_з = \frac{V_1 - V_3}{V_1} \cdot 100\%$$

де V_1 – об'єм свіжосформованого зразка; V_2 – об'єм зразка після сушіння, V_3 – об'єм зразка після відпалу.

Границю міцності на вигин визначали за допомогою апарату Biegefestigkeitsprüfer 401 (ФНР). Відстань між опорами складала 25 мм. Зразки матеріалів мали прямокутний перерізу. Розрахунок міцності визначали за формулою:

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot \sigma^2},$$

де P – руйнівне навантаження, Н; L – відстань між опорами, м; b – ширина зразка, м; σ – товщина зразка, м.

У роботі також було досліджено водопоглинення зразків. Отримані керамічні вироби занурювали у посудину з водою і витримували протягом 2 годин. Водопоглинення зразка (W_i) розраховували за формулою:

$$W_i = \frac{m_B - m_c}{m_c} \cdot 100\%,$$

де m_c – маса висушеного зразка, $m_в$ – маса зразка після витримки у відповідно, г.

Випробування зразків на водостійкість проводили у конічній колбі з водяним холодильником і затвором. Для визначення водостійкості використовували фракцію α<0,315 мм. Частки пилу видаляли шестиразовою декантацією етиловим спиртом. Маса наважки складала 2 г, а об'єм дистильованої води – 50 см^3. Нагрівання проводили протягом 1 години за температури 98°С. Водостійкість кераміки (X_A) виражали витратою 0,01 н. розчину соляної кислоти, см^3/г і обчислювали за формулою:

$$X_A = \frac{V - V_T}{m}$$

де V – об'єм 0,01 н. розчину соляної кислоти, витраченої на титрування 25 см^3 контрольного розчину, см^3; V_T – об'єми 0,01 н. розчину соляної кислоти, витраченої на титрування 25 см^3 аналізованого розчину, см^3; m – маса наважки подрібненого керамічного зразка, г.

Лугостійкість зразків оцінювали по втраті маси. Експерименти проводилися на зразках з вмістом твердої фази у дисперсії 50%. Витримка зразків відбувалася у розчині W(NaOH)=35% при температурі 95-98 °С протягом 1 години. Маса зразків складала 1,5 г, а маса розчину NaOH – 100 г. Розрахунок лугостійкості проводиться за формулою:

$$X_B = \frac{m - m_1}{m_1} \cdot 100\%$$

де m, m_1 – маса наважки проби відповідно до й після випробування, м.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження були приготовані глинисті суспензії із співвідношенням твердої фази до рідкої від 0,3 до 1,8. Виявилося, що зразки із співвідношенням т/р менше 0,35 мали рідку консистенцію і отримати зразки із задовільними властивостями не вдалося. При співвідношенні т/р фази вище 1,5 керамічна маса втрачала текучість та не вдавалося сформувати зразок. Застосування $Na_5P_3O_{10}$ в якості розріджувача дозволили с зразки з вищою концентрацією каоліну.

Особливістю глиняних мас є те, що при взаємодії з водою вони мають здатність набухати. При висушуванні керамічних мас з поверхні, а потім і з глибших шарів глиняних виробів починає видалятися волога. Зміна розмірів керамічних виробів при їх висушуванні відбувається в результаті зближення глинистих часток під дією капілярного та осмотичного тисків, а також сил міжмолекулярного тяжіння, які виникають при випаровуванні розташованих між ними водних прошарків. Подальше видалення вологи, при досягненні вологості 8–13%, відбувається за рахунок випаровування вологи з пор капілярів. Найбільш інтенсивно зменшуються розміри зразків на першому етапі сушки. По мірі підвищення температури випалу пористість зменшується, маса стає щільніше і, досягнувши максимальної щільності, перетворюється в каменеподібну речовину. При випалі керамічних виробів відбуваються складні хімічні та фізичні процеси.

Зразки з вищою концентрацією каоліну у глинистій суспензії показали меншу загальну усадку (рис. 1, а). Також, на усадку зразків впливає додавання де флокулянтів (рис. 1, б), що дозволяє збільшити текучість глинистої маси та зменшити

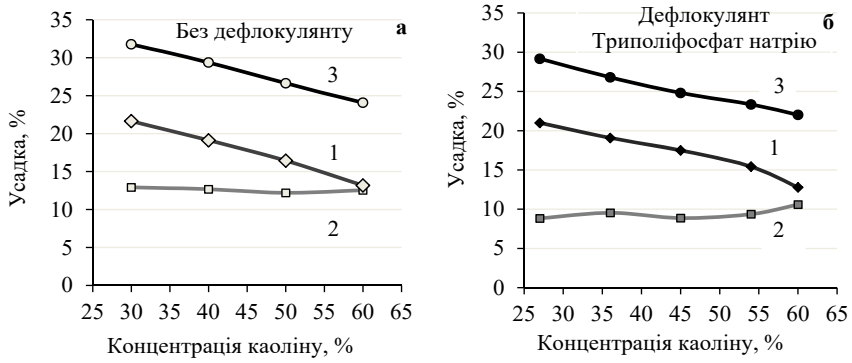


Рис. 1 Усадка керамічних зразків:
без флокулянту (а); з триполіфосфоатом натрію (б)
1– повітряна усадка; 2 – вогнева усадка; 3–загальна усадка

кількість пор у матеріалі. Загальна усадка виробів виготовлених з використанням $Na_5P_8O_{10}$ знизилася на 2–3% у порівнянні з відповідними зразками без використання дефлокулянту.

З метою визначення міцності зразків у процесі експлуатації було вивчено міцність на вигин. В результаті досліджень встановлено, що зразки мають міцність на вигин 4,7–9,5 МПа. Встановлено, що міцність зразків зростала із збільшенням співвідношення т/р фази у глинистій суспензії, що можна пояснити підвищенням щільності матеріалу (рис. 2, а). З підвищенням вмісту дефлокулянта міцність зразків зростала (рис. 2, б).

Дослідження показало, що всі зразки мали задовільні значення водопоглинення. З підвищенням вмісту твердої фази у глинистій дисперсії водопоглинення зменшувалося, що можна пояснити збільшенням щільності матеріалу та зменшенням кількості пор (рис. 3, а). З підвищенням

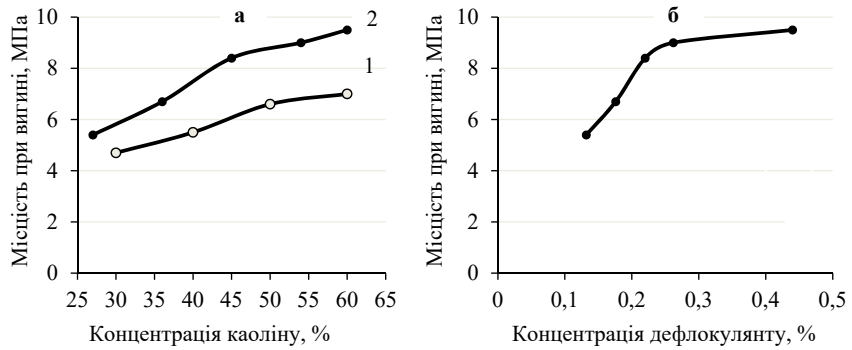


Рис. 2. Міцність зразків на вигин в залежності: а) від концентрації глинистої суспензії, б) від концентрації дефлокулянту
1– глиниста суспензія; 2 – глиниста суспензія з дефлокулянтом

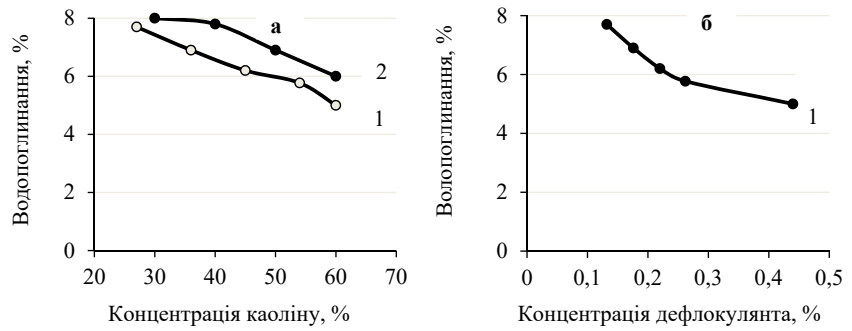


Рис. 3. Водопоглинання керамічних зразків в залежності: а) від концентрації глинистої суспензії, б) від концентрації дефлокулянту
1– глиниста суспензія; 2 – глиниста суспензія з дефлокулянтом

вмісту дефлокулянта у дисперсії водопоглинення зразків зменшувалося (рис. 3, б).

Дослідження водостійкості зразків підтвердило, що для всіх зразків характерні високі значення (97,3–99,2%) водостійкості. Вивчення лугостійкості отриманих матеріалів показало, що для обраних зразків із співвідношенням т/р фази рівні 1, лугостійкість не перевищувала 51%.

Такі результати можна пояснити рядом факторів: фазового складу, пористості, густини матеріалу, вмісту в масі глинозему. З отриманих результатів можна зробити висновок, що кераміку даного складу недоцільно використовувати в лужних середовищах.

Аналіз результатів досліджень впливу концентрації агару на міцність зразків та водопоглинення представлені на рис. 4.

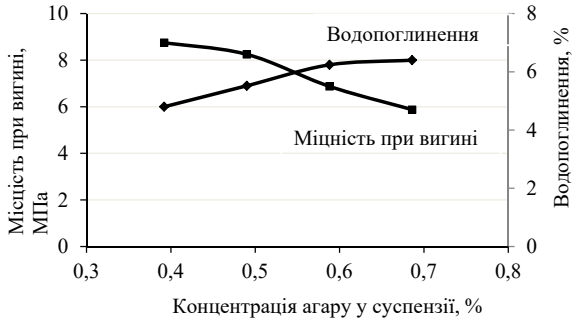


Рис. 4. Залежність властивостей керамічних зразків від концентрації агару

Висновки. В результаті досліджень отримано керамічні вироби методом гелевого лиття з використанням каоліну Глуховецького родовища та агару. Керамічні вироби з високими формувальними та експлуатаційними властивостями отримано із глинистих суспензій із співвідношенням твердої і рідкої фаз 0,35÷1,5. Процеси гелеутворення відбулися при вмісті у суспензії 0,4% агару. З підвищенням концентрації каоліну у суспензії збільшилася міцність зразків на вигин, підвищилася водостійкість та знизилося водопоглинення. Використання дефлокулянту триполіфосфату натрію $Na_5P_3O_{10}$ покращило формувальні властивості глинистої суспензії та понизило усадку зразків.

Список літератури:

1. Yang J., Yu J., Huang Y. Recent developments in gelcasting of ceramics. J. Eur. Ceram. Soc. 2011. Vol. 31. P. 2569–2591. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.12.035 41

2. Ganesh I. Hydrolysis-Induced Aqueous Gelcasting: The Latest Concept for Net-Shape Consolidation of Ceramics–A Review. Mater. Manuf. Processes. 2012. Vol. 27. P. 233–241. https://doi.org/10.1080/10426914.2011.585494

3. Omatete O.O., Janney M.A., Nunn S.D. Gelcasting: from laboratory development to industrial production. J. Eur. Ceram. Soc. 1997. Vol. 17. P. 407–413. https://doi.org/10.1016/S0955- 2219(96)00147-1

4. Kaşgöz A., Özbaş Z., Kaşgöz H., Aydin I. Effects of monomer composition on the mechanical and machinability properties of gel-cast alumina green compacts. J. Eur. Ceram. Soc. 2005. Vol. 25. P. 3547–3552. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.09.013

5. Zhang H., Wang H, Gu H, Zong X., Tu B., Xu P., Wang B., Wang W., Liu S., Fu Z. Preparation of transparent $MgO{\cdot}1.8Al_2O_3$ spinel ceramics by aqueous gelcasting, presintering and hot isostatic pressing. J. Eur. Ceram. Soc. 2008. Vol. 38. P. 4057–4063. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.04.057

6. Cai K., Huang Y., Yang J.L. Alumina gelcasting by using HEMA system. J. Eur. Ceram. Soc. 2005. Vol. 25. P. 1089–1093. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.04.024 46

7. Cai K., Huang Y., Yang J.L. A Synergistic Low-Toxicity Gelcasting System by Using HEMA and PVP. J. Am. Ceram. Soc. 2005. Vol. 88. P. 3332–3337. https://doi.org/10.1111/j.1551- 2916.2005.00602.x

8. Zhang Y., Cheng Y.-B. Use of HEMA in Gelcasting of Ceramics: A Case Study on Fused Silica. J. Am. Ceram. Soc.2006. Vol. 89. P. 2933–2935. https://doi.org/10.1111/j.1551- 2916.2006.01152.x

9. Moorehead C.A., Blair V.L., Adams J.W. Characterization of novel gel-casting system to make complex-shaped aluminum oxide (Al_2O_3) Parts. U.S. Army Research Laboratory ARL-TR7620 (march 2016).

10. Shimai S., Yang Y., Wang S., Kamiya H. Spontaneous gelcasting of translucent alumina ceramics, Opt. Mater. Express. 2013. Vol. 3. P. 1000–1006. https://doi.org/10.1364/OME.3.001000

11. Lu Y., Gan K., Huo W., Lv L., Liu J., Zhang X., Yan S., Yang J.L., Dispersion and gelation behavior of alumina suspensions with Isobam, Ceram. Int. 2018. Vol. P. 11357–11363. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.185

12. Plucknett K.P., Munro C.D. Bio-polymer based gel casting of ferroelectric ceramics, Adv. Eng. Mater. 2014. Vol. 16. P. 684–698. https://doi.org/10.1002/adem.201400084

Zhdaniuk N.V., Shcherban V.O. GELCASTING OF CERAMICS

The article examines the physical and chemical properties of the ceramic material obtained by the gel casting method. This method of formation was studied from the point of view of the possibility of its practical implementation, as well as taking into account the limitations that may arise during the operation of the

products. Research has confirmed the possibility of forming ceramic products by the method of gel casting on the basis of kaolin from the Hlukhovetsky deposit using agar gelling agent. The value of the gel casting method lies in the possibility of obtaining products of any geometric shape. In the study, samples were obtained from a suspension with a ratio of solid phase to liquid from 0.3 to 1.8. Samples with a ratio of solid to liquid phase less than 0.35 had a liquid consistency and the obtained samples had unsatisfactory mechanical and physicochemical properties. When the ratio of the solid and liquid phases was above 1.5, the ceramic mass lost its fluidity, which made it impossible to form samples. The use of deflucoliant made it possible to obtain samples with a higher kaolin content. Air, fire and general shrinkage of ceramic products were investigated in the work. For samples with a higher concentration of kaolin in the clay suspension, a lower value of shrinkage is characteristic. The total shrinkage of products made with the addition of sodium tripolyphosphate ($Na_5P_3O_{10}$) decreased by 2-3% compared to the corresponding samples without the use of an electrolyte. In order to evaluate the mechanical properties of ceramic samples, their bending strength was investigated. The obtained samples are characterized by high mechanical properties. The bending strength of the samples was in the range of 4.7÷9.5 MPa. It was established that the strength of ceramic samples increased with an increase in the concentration of kaolin in the clay dispersion and an increase in the deflocculant content. The study showed that all samples had satisfactory values of water absorption (5-10%). With an increase in the solid phase content in the clay dispersion and an increase in the deflocculant content in the dispersion, the water absorption of the samples decreased. A study of alkali resistance of ceramic materials showed that it does not exceed 51%. Ceramics of this composition should not be used in alkaline environments.

Key words: *gelcasting, dispersed system, gelling agent, shrinkage, strength, water absorption, water resistance, chemical resistance.*

УДК 677.027.4:[628.3:66.081.3]
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/32

Коваль М.Г.
Черкаський державний технологічний університет

ПЛАНУВАННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЦИКЛІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯМ РЕСУРСІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ФАРБУВАННЯ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ (НА ПРИКЛАДІ БАРВНИКА ДИСПЕРСНОГО ТЕМНО-СИНЬОГО З)

У статті приводиться висунута гіпотеза про можливість практичного використання стічної води (очищеної та концентрованої) фарбувально-оздоблювального виробництва в процесі фарбування текстильних матеріалів. Так як традиційна технологія фарбування має значні витрати ресурсів (барвників, води, електроенергії), усунути цю проблему можна за рахунок створення ресурсозберігаючої технології фарбування текстильних матеріалів, що значно зменшить собівартість процесу фарбування. З метою оптимального використання дороговартісних ресурсів, у статті надається принципова схема технології фарбування тканини, що включає в себе два цикли: цикл з повторним використанням очищеної стічної води до стану технологічної (адсорбційне очищення доступним за вартістю природним сорбентом цеолітом) та цикл з використанням концентрованої стічної води, одержаної безпосередньо після процесу фарбування із фарбувальної ванни (на прикладі текстильного барвника Дисперсного темно-синього З). Представлена серія експериментальних досліджень, виконаних в реальних виробничих умовах на базі діючого фарбувально-оздоблювального виробництва в м. Черкаси (Україна), науково доводить достовірність висунутої гіпотези про можливість повторного використання таких ресурсів, як барвники та вода, із максимальною відповідністю до критерію інтенсивності забарвлення в межах 95%.

У статті наводиться математична формалізація визначених головних та локальних задач наукового дослідження, для реалізації яких сформульовані наступні критерії: основні (кінцеві), які полягають у досягненні результатів фарбування текстильних матеріалів в певних параметрах інтенсивності забарвлення та допоміжних критеріїв: оптичної густини розчинів барвників та їх концентрацій у фарбувальних ваннах.

Весь обсяг експериментальних даних містить масив проведених в межах цього дослідження результатів показників фарбування різних видів тканин Прямими та Активними барвниками. Проведений обсяг робіт за своїми результатами вважається успішним.

Ключові слова: *технологія фарбування, текстильні матеріали, барвник, стічна вода, адсорбція, цеоліт, очищення стічних вод, повторне використання стічних вод, цикл, ресурсозбереження.*

Постановка проблеми. Розвиток текстильної промисловості пов'язаний як зі споживанням матеріальних та енергетичних ресурсів, так і з утворенням продуктів та відходів, що призводить до виснаження сировинних ресурсів та до забруднення навколишнього середовища. Згідно до декларації про маловідходні та безвідходні технології та використання відходів ЄЕК ООН (Женева, 1979 р.), одними із основних напрямків впровадження ресурсозберігаючих технологій є створення замкнених (циклічних) систем водокористування та рекуперація (зворотне повернення) виробничих відходів.

Фарбувально-оздоблювальне виробництво, яке діє на ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат» («ЧШК», м. Черкаси) є одним із найбільш ключових та ємких етапів в процесі використання водних та електроресурсів текстильної промисловості. Велика кількість органічних барвників та допоміжних речовин, що містяться в стічних водах, які є виробничими відходами, створюють ризики для навколишнього середовища через його забруднення. Тому, відповідно до «Стратегії розвитку Черкаської області на період 2021–2027 роки» згідно із положенням стратегічної цілі «Висока якість життя: екологія, безпека, інфраструктура» нагальним є питання створення технологій, які б забезпечували зниження собівартості текстильної продукції та зменшення екологічного навантаження під час її виготовлення та обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із перспективних способів реалізації циклічної технології є створення технологічних схем із адсорбційним очищенням стічних вод.

Існують дослідження, які висвітлюють адсорбційне очищення стічної води, забрудненої барвниками, використовуючи, як адсорбент, активоване вугілля, бентонітову глину, цеоліти. Так, активованим вугіллям доцільніше адсорбувати ті текстильні барвники, які мають невелику молекулярну масу і легше проникають в пори сорбенту [1]. Недоліком таких досліджень є використання дороговартісного сорбенту та використання для очищення лише модельних розчинів барвників, а не реальної стічної води виробництва.

Херсонські науковці [2] в своїй роботі досліджували сорбційний, коагуляційний та хімічний способи очищення стічних вод після фарбування активними барвниками природним сорбентом А. Довели, що при повторному використанні очищених стічних вод в процесі фарбування тканини активними барвниками, суттєво знижується якість пофарбованих тканин.

Мамитова А.Д. (Південно-Казахський державний університет, Казахстан) досліджувала адсорбційні властивості активованої шкарлупи кісточок в процесі очищення стічних вод фарбувально-оздоблювального виробництва [3]. Визначено, що запропонований адсорбент гарно знижує кольоровість стічної води, але стічна вода потребує доочищення, використання коагулянта.

Дослідження щодо вивчення адсорбційних властивостей природного цеоліту описано в наукових роботах [4, 5]. Відомо, що для покращення адсорбційної здатності цеоліту, його попередньо потрібно кислотно модифікувати. Так, Тарасевич Ю.І. [6, с. 69–70] рекомендує проводити хімічну модифікацію прожареного цеоліту 0,3Н розчином хлоридної кислоти.

Професор Мальований М.С. із науковцями Львівської політехніки [7] проводили дослідження щодо використання природних сорбентів бентонітів та палигорскітів в процесі очищення модельних розчинів текстильного барвника аніонного червоного. Встановлено вигляд кінетичної кривої у випадку використання для цього процесу для різних типів природних сорбентів. Вибір для досліджень саме цих адсорбентів обумовлений тим, що їх вартість є невеликою порівняно з вартістю інших адсорбентів, а адсорбційна ємність достатня для використання сорбентів в природоохоронних технологіях.

Отже, адсорбційне очищення дозволяє здійснити процес з використанням відносно недорогих природних матеріалів, які в подальшому можуть бути використані задля інших потреб в різних галузях промисловості, при цьому забезпечуючи високу ефективність очищення стічних вод з можливим поверненням їх у технологічний процес підприємства. Але не вирішеною залишається задача можливості практичного використання очищених та концентрованих стічних вод в процесі повторного фарбування текстильних матеріалів.

Постановка завдання. Основними ресурсами, які забезпечують створення технологічних компонентів фарбувально-оздоблювального виробництва (розчинів барвників, фарбувальних ванн тощо) є органічні барвники, вода та електроенергія (рис. 1).

Тож, з метою енерго- та ресурсозаощадження висувається гіпотеза щодо створення оборотного

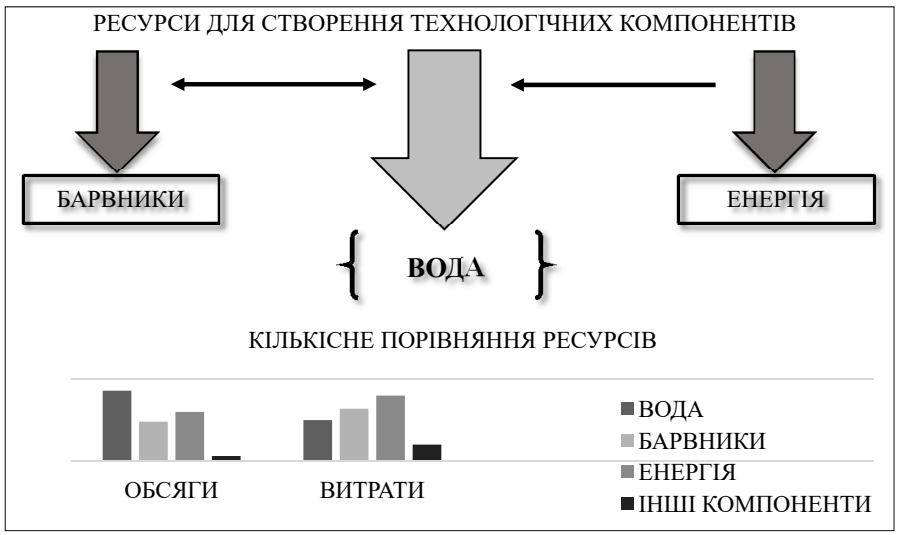


Рис. 1. Ресурси та їх аналіз для створення технологічних компонентів в процесі фарбування текстильних матеріалів

(циклічного) використання стічних вод в технології фарбування текстильних матеріалів.

Основними передумовами для формування основної гіпотези для наукового дослідження є:

– існування природних сорбентів з такими сорбційними властивостями, застосування яких дозволяє очистити стічну воду фарбувально-оздоблювального виробництва до початкового технологічного стану;

– після повного циклу фарбування в концентрованих стічних водах присутня певна кількість барвників, тобто є активні молекули. Такі розчини можна застосовувати для повторного використання в технології фарбування тканини. Ця гіпотеза була підтверджена лабораторними дослідженнями на реальному виробництві ПрАТ «ЧШК» (м. Черкаси, Україна). Вміст деяких класів барвників у концентрованих стічних водах наведений на рис. 2.

– циклічне використання ресурсів дозволить знизити ризики негативного впливу на навколишнє середовище;

– циклічне використання ресурсів призведе до економічного ефекту у технології фарбування текстильних матеріалів та в технологіях утилізації шкідливих відходів (забрудненої стічної води).

Головною гіпотезою наукового дослідження є можливість використання стічних вод (очищених та концентрованих) в технології фарбування текстильних матеріалів.

Метою експериментальних досліджень є отримання емпіричних результатів, що доводять можливість повторного використання стічних вод в технології фарбування текстильних матеріалів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Виходячи із визначених гіпотез та проведеного аналізу проблеми, є можливість формалізувати задачі та цілі наукового дослідження шляхом їх математичного опису. Враховуючи те, що технологія фарбування текстильних матеріалів розглядається як складний технологічний процес із залученням окремих об'єктів, їх можна виразити як:

$$U \equiv \langle \Psi, \Theta, E, \Delta \rangle$$

де U – технологія, Ψ – вода, Θ – текстильний барвник, E – використання електроенергії, Δ – сукупність допоміжних ресурсів.

Математична постановка головної задачі записується наступним виразом:

$$C(U) \xrightarrow{\mathbb{R} \to min} min,$$

де $C(U)$ – функція вартості витрат на технологію фарбування текстильних матеріалів, $\mathbb{R}$ – ресурси технології фарбування текстильних матеріалів, які загально можна виразити кортежем:

$$\mathbb{R} := \langle \Psi, \Theta, \Delta \rangle.$$

Математичний вираз вказує на створення такої функції витрат на фарбування тканин, яка при заданих умовах і початкових даних, обмеженнях і критеріях буде прагнути до зменшення в порівнянні із діючим показниками витрат існуючої технології.

Таким чином, для вирішення головної задачі можна сформулювати локальні задачі, які виражаються таким чином:

$$\left.\begin{matrix} \mathbb{R}(\Psi, \Theta) \to min \\ \mathrm{E}(\Psi) \to min \end{matrix}\right| \Rightarrow C(\mathbb{R}, \mathrm{E})$$

де Ψ –вода , Θ – текстильний барвник, $\mathbb{R}$ – ресурси технології фарбування текстильних матеріалів, Е – використання електроенергії.

Цей функціонал вказує на те, що із результату вирішення локальних задач визначається основна функція вартості технології фарбування, яка залежить від ресурсів та енергії.

Для вирішення цих локальних задач сформульовані наступні критерії: основні (кінцеві), які полягають у досягненні результатів фарбування в певних параметрах інтенсивності забарвлення, що виражаються такою нерівністю:

$$95\% < \omega^{i,j} < 100\%, \text{ при } \omega^{i,j} \in \Omega,$$

де ω^i – значення інтенсивності фарбування i -того зразку для j -ого фарбування; Ω – множина еталонів зразків.

Виконання основного критерію можливе при розв'язанні наступних допоміжних критеріїв: оптичної густини розчинів барвників та їх концентрацій у фарбувальних ваннах.

$$D^{\Theta^i} \overset{\lambda}{\Rightarrow} max \text{ при } \varepsilon = \frac{D^{\Theta^i}}{C \cdot l},$$

де ε – коефіцієнт екстинції для i -того барвника Θ; λ – довжина хвилі, нм

Експериментальні дослідження здійснюються за такими напрямками:

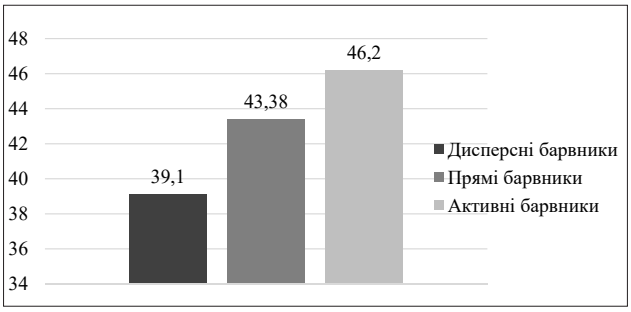


Рис. 2. Вміст барвників в концентрованій стічній воді фарбувально-оздоблювального виробництва

1. Повторне використання очищених стічних вод. Включає в себе такі етапи:

– фізико-хімічний аналіз стічних вод:

– вибір сорбенту;

– дослідження процесу адсорбції компонентів стічної води з подальшою коагуляцією та флокуляцією;

– фізико-хімічний аналіз стічних вод;

– порівняльний аналіз показників очищених стічних вод та технологічної води для виробництва;

– процес фарбування текстильних матеріалів, визначення інтенсивності фарбування;

– визначення відповідності пофарбованих зразків еталонним параметрам і показникам якості одержаних забарвлень.

2. Використання концентрованої стічної води після фарбування тканини:

– фізико-хімічний аналіз стічних вод;

– приведення концентрованих стічних вод до параметрів фарбувального розчину (фарбувальної ванни);

– фарбування текстильних матеріалів з подальшим визначенням інтенсивності забарвлення;

– визначення відповідності пофарбованих зразків еталонним параметрам і показникам якості одержаних забарвлень.

3. Математична обробка одержаних результатів:

– моделювання фізико-хімічних процесів, досліджених в експерименті;

– статистична обробка результатів.

Результати експериментальних досліджень слугують для створення наукових основ побудови ресурсозберігаючої технології фарбування текстильних матеріалів, які грунтуються на виборі методу очищення стічних вод природними сорбентами, рекомендаціями щодо поліпшення процесу відведення стічних вод фарбувально-оздоблювального виробництва та створення технологічної схеми повторного використання стічних вод (очищених та концентрованих) в технології фарбування текстильних матеріалів.

Для досягнення поставлених задач щодо створення нової ресурсозберігаючої технології, за основу було взято базову діючу принципову технологічну схему фарбування тканини фарбувально-оздоблювального виробництва ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат» (м. Черкаси) (рис. 3).

Принципово нова схема, яка пропонується до використання відповідно до плану експериментальних досліджень, представлена на рис. 4.

Для підтвердження висловленої гіпотези, в реальних виробничих (лабораторних) умовах ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат» (м. Чер-

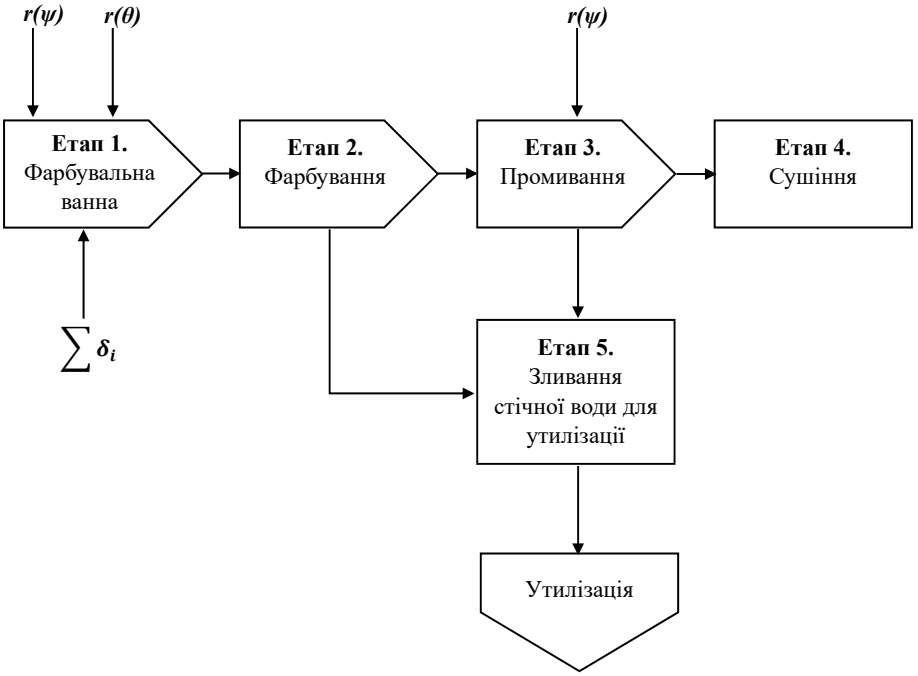


Рисунок. 3 Схема процесу фарбування тканини на реальному виробництві *r(ψ)* – керуюча дія початкового використання ресурсу води; *r(θ)* – керуюча дія початкового використання ресурсу барвника; $\sum\delta_i$ – керуюча дія сукупності допоміжних речовин

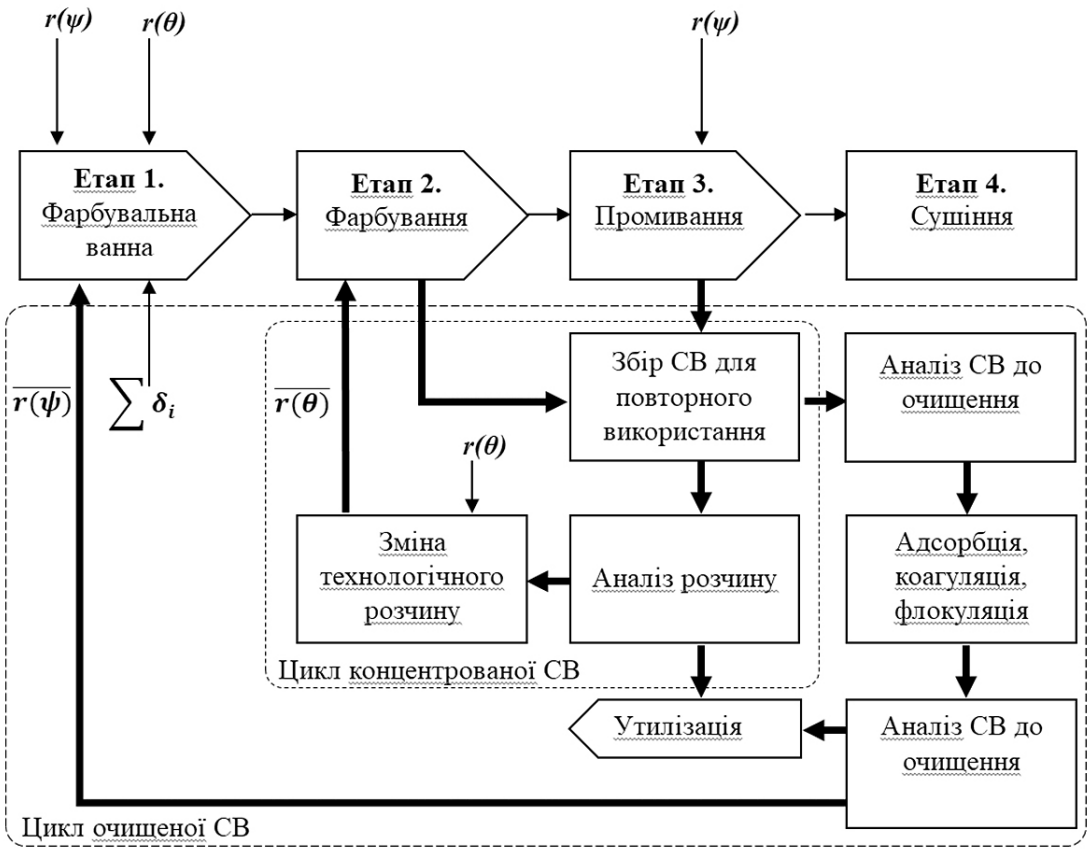


Рис. 4. Принципова схема технології фарбування тканини з циклічним використанням стічної води (СВ) (очищеної та концентрованої):
r(ψ) **– керуюча дія початкового використання ресурсу води;** *r(θ)* **– керуюча дія початкового використання ресурсу барвника,** $\overline{r(\psi)}$ **– керуюча дія циклічного використання ресурсу води,** $\overline{r(\theta)}$ **– керуюча циклічного використання ресурсу барвника,** $\sum \delta_i$ **– керуюча дія сукупності допоміжних речовин**

каси). здійснювалося фарбування поліефірної тканини дисперсними барвниками за двома запропонованими технологічними циклами із використанням очищеної та концентрованої стічної води.

При виконанні експериментальних досліджень використовували такі матеріали: природний цеоліт (сокирніт) Сокирницького родовища Закарпатської області (Україна) з розміром фракції 1–5мм, [8]; тканина «Поліефір» (арт. 033) – синтетична тканина, одержана методом екструзії полімерного сплаву поліетилентерефталату [9]; оцтова кислота CH_3COOH (98%) – кислотний реагент для фарбування дисперсними барвниками; текстильний барвник Дисперсний темно-синій З Використовують для фарбування гідрофобних волокон. Волокно фарбується за рахунок розчинення дисперсних барвників у волокні (утворюється твердий розчин) [10, с. 42].

За технологічним циклом із використанням очищеної стічної води, промислова стічна вода підлягала адсорбційному очищенню кислотно модифікованим природним цеолітом Сокирницького родовища та використовувалася повторно, як технологічна, в процесі фарбування тканини [11, 12]. Фарбування здійснювали на лабораторній фарбувальній машині «Ahiba nuance top speed» (США). Визначалися колірні характеристики одержаних забарвлень, результати яких зображені в табл. 1.

Якість та стійкість одержаних забарвлень здійснювали шляхом їх оцінювання та порівнювання із еталоном (зразки ПрАТ «ЧШК») за зміною первинного забарвлення і зафарбовування суміжних тканин відповідно до діючих державних стандартів України (ГОСТ 9733.0-83, ГОСТ 9733.27-83, ГОСТ 9733.4-83) Якісні показники стійкості забарвлень вимірювали на приладі «Stainingtester» (Угорщина). Результати представлені в табл. 2

Весь обсяг експериментальних даних містить масив проведених в межах цього дослідження результатів показників фарбування різних видів тканин Прямими та Активними барвниками.

Таблиця 1

Колірні характеристики пофарбованої тканини «Поліефір» (арт. 033) дисперсним барвником

Барвник		Світлість dL	Відтінок (червоно-зелений) dA	Відтінок (жовто-синій) dB	Колірне відхилення dE*	Інтенсивність забарвлення, % до еталону
Дисперсний темно-синій З	Фарбування за технологічним циклом з очищеною стічною водою					
	базова рецептура					100,0
	стічна вода	-0,01 темніший	+0,05 червоніший	-0,19 синіший	0,2	99,9
	Фарбування за технологічним циклом з концентрованою стічною водою					
	базова рецептура					100,0
	стічна вода	+0,66 світліший	-1,82 зеленіший	+0,56 жовтіший	1,98	95,4

* Колірне відхилення – відстань між двома кольорами у певному просторі. Визначає різницю між кольорами. Згідно з державними стандартами на текстильну продукцію, колірне відхилення dE не повинне перевищувати 2.

Таблиця 2

Якісні показники одержаних забарвлень

Барвник	Стійкість забарвлення, бали					
	сухе тертя		мокре тертя		дія мила	
	очищена стічна вода	концентрована стічна вода	очищена стічна вода	концентрована стічна вода	очищена стічна вода	концентрована стічна вода
Дисперсний темно-синій З	2/2	2/2	2/2	3/3	4/4	4/4

Проведений обсяг робіт виконаний у виробничих лабораторних умовах та за своїми обсягами і результатами вважається успішним.

Висновки

1. Традиційна технологія фарбування текстильних матеріалів має основний недолік – утилізації підлягають значні обсяги ресурсів (барвників, води), які можна повторно використати та які, за своєю значимістю, значним чином впливають на собівартість процесу фарбування.

2. З метою оптимального використання дороговартісних ресурсів, пропонується циклічна схема технології фарбування тканини, що включає в себе два цикли: технологію з використанням очищеної стічної води та технологію з використанням концентрованої стічної води.

3. Серією експериментальних досліджень визначено можливість циклічного використання очищеної та концентрованої стічних вод в технології фарбування текстильних матеріалів на прикладі Дисперсного темно-синього З, що науково доводить достовірність висунутої гіпотези про можливість повторного використання таких ресурсів, як барвники та вода із максимальною відповідністю до критерію інтенсивності забарвлення в межах 95%.

Список літератури:

1. Пыркова М.В., Меньшова И.И., Фролова Е.А., Чупартинова Э.М. Сорбенты в очистке сточных вод красильно-отделочного производства. Бутлеровские сообщения. 2014. Т. 37. № 2. С. 52–56.

2. Нестерова Л.А., Кондратюк Л.Н., Сарибеков Г.С. Разработка технологии очистки сточных вод после процесса крашения текстильных материалов активными красителями. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010. № 5/6 (47). С. 35–37.

3. Мамитова А.Д., Атаханова Р.А. Разработка и исследования технологии очистки сточных вод красильно-отделочных производст. Геология, география и глобальная энергия. 2010. № 2 (37). С. 144–147.

4. Shoumkova A. Zeolites for water and wastewater treatment: An overview URL: http:// www.ausihem.org Australian Institute of High Energetic Materials (ABN: 68 126 426 917) (дата звернення 19.11.2022).

5. Karmen Margeta, Nataša Zabukovec Logar, Mario Šiljeg, Anamarija Farkaš Natural Zeolites in Water Treatment– How Effective is Their Use URL: http://dx.doi.org/10.5772/50738 (дата звернення 19.1.2022).

6. Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды от дисперсных примесей Киев, 1981. 208 с.

7. Петрушка І.М., Леськів Г.З., Плахтій Г.І. Очищення стічних вод від барвників природними сорбентами. URL: http:// ena.lp.edu.ua. Lviv Polytechnic National University Institutional Repository. С. 230–233. (дата звернення 20.11.2022).

8. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В.С. Білецького.Донецьк. Східний видавничий дім, 2013. Т. 3: С–Я. 644 с.

9. Поліефірні тканини в Україні. URL:https://stg.ua/cats/poliefirni-tkanini (дата звернення 26.10.2022).

10. Бородкин В.Ф. Химия красителей. Химия, 1981. 248 с.

11. Спосіб очищення мультикомпонентних стічних вод фарбувально-оздоблювального виробництва. Коваль М.Г., Кузьменко В.Г., Романенко Н.Г. (Україна): пат. 151829 U Україна, МПК C02F 1/28 (2006.01) № u 2021 05931; заявл. 22.10.2021; опубл. 21.09.2022, Бюл. № 38.

12. Технологічна система комплексу очищення стічних вод фарбувально-оздоблювального виробництва природним цеолітом. Коваль М.Г., Кузьменко В.Г.: пат 151832 U Україна, МПК D06P 1/00 D06P 7/00 C02F 1/00 C02F 1/463 (2006.01) C02F 1/52 (2006.01) № u 2021 06700; заявл. 26.11.2021; опубл. 21.09.2022, Бюл. № 38.

Koval M.G. PLANNING AND ORGANIZATION OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE CYCLICAL USE OF RESOURCES IN THE TECHNOLOGY OF DYEING TEXTILE MATERIALS (VIA EXAMPLE OF DYE DISPERSED DARK BLUE Z)

The article gives the hypothesis put forward about the possibility of practical use of wastewater (purified and concentrated) dyeing and finishing production in the process of dyeing textile materials. Since the traditional painting technology has a significant expenditure of resources (dyes, water, electricity), this problem can be eliminated by creating a resource-saving technology for painting textile materials, which will significantly reduce the cost of the painting process. In order to optimally use expensive resources, the article provides a schematic diagram of the fabric dyeing technology, which includes two cycles: a cycle with the reuse of treated wastewater to a technological state (adsorption treatment with affordable natural sorbent zeolite) and a cycle using concentrated wastewater obtained directly after the dyeing process from the dyeing bath (using the example of the textile dye Dispersed dark blue Z). The presented series of experimental studies performed in real production conditions on the basis of the existing coloring and finishing production in Cherkasy (Ukraine) scientifically proves the reliability of the hypothesis put forward about the possibility of reusing resources such as dyes and water, with maximum compliance with the criterion of color intensity within 95%.

The article provides mathematical formalization of certain main and local problems of scientific research, for the implementation of which the following criteria are formulated: the main (final), which consist in achieving the results of dyeing textile materials in certain parameters of color intensity and auxiliary criteria: optical density of dye solutions and their concentrations in dyeing baths.

The entire volume of experimental data contains an array of results of staining indicators of various types of fabrics with Direct and Active dyes carried out within the framework of this study. The amount of work carried out on its results is considered successful.

Key words: *dyeing technology, textile materials, dye, wastewater, adsorption, zeolite, wastewater treatment, wastewater reuse, cycle, resource saving.*

УДК 665
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/33

Лебедєв В.В.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Мірошниченко Д.В.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Савченко Д.О.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Матюхов Д.В.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Лєндич Є.С.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Соловей Л.В.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІБРИДНИХ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ БІОГРАДАБЕЛЬНИХ ГУМІН-ПОЛІМЕРНИХ ГІДРОГЕЛЕЙ ЖЕЛАТИНУ

У статті показані дослідження щодо є дослідження експлуатаційних властивостей гібридних екологічно безпечних біоградабельних гумін-полімерних гідрогелей желатину. Гібридні екологічно чисті біодеградабельні плівки з бактерицидними властивостями отримували методом поливу розчинів полівінілового спирту з концентрацією 10 % мас., до яких додавали різну кількість гумінової кислоти. При одержані гібридних екологічно безпечних гібридних екологічно безпечних біоградабельних гумін-полімерних гідрогелей використовували харчовий желатин марки Р-11. Як гібридні модифікатори використовували гумінові кислоти, які отримували при екстракції бурого вугілля лужним розчином пірофосфату натрію з подальшою екстракцією 1 %-ним розчином гідроксиду натрію і осадженням мінеральної кислотою. Показано, що гібридна модифікація желатину гуміновими кислотами пов'язана з конформаційною зміною вторинної структури желатину. Також відмічене, що особливість гібридної модифікації желатину гуміновими кислотами можна пояснити взаємодіями Н-зв'язків між карбонільними групами атомів гумінової кислоти в залишках желатину. Показано, що гібридна модифікація желатину гуміновими кислотами дозволяє отримати гібридні біополімерні гідрогелі з підвищеним ступенем набряканням та надати їм антибактеріальні властивості, що підтверджується даними за показником часу появи плісняви у них. В результаті проведених в статті досліджень були досліджені новітні гібридні екологічно безпечні біоградабельні гумін-полімерні гідрогелі желатину, модифіковані гуміновими речовинами бурого вугілля, які мають високий потенціал для використання в харчовій, біомедичній та косметологічній галузях.

Ключові слова: *гібридні, екологічно безпечні, біодеградабельні полімерні гідрогелі, желатин, бактерицидні властивості, гумінові кислоти.*

Постановка проблеми. Сучасні полімерні гідрогелеві матеріали знаходять широкий спектр харчових, біомедичних та косметологічних застосувань [1]. Цей клас гідрофільних полімерних матеріалів демонструє вискоку здатність набухати у воді та інших відповідних розчинниках і поглинати та утримувати велику кількість води в своєї тривимірної структурі. Достатньо важливим напрямом розробки ефективних полімерних гідрогелевих матеріалів є їх гібридна модифікація, яка за рахунок взаємодії хімічно різних компонентів, найчастіше неорганічних і органічних, призводить до утворення просторової кристалічної структури, яка відрізняється від структур вихідних реагентів, але часто успадковує властивості вихідних компонентів [2]. На сьогодні отримання гібрідно модифікованих біодеградабельних полімерних гідрогелевих матеріалів дозволяє досягти

синергічного ефекту корисних властивостей для різних за хімічним складом компонентів у готовому матеріалі, що призводить до значного розширення напрямів і галузей застосування таких матеріалів. В той же час такі гібрідно модифіковані біодеградабельні полімерні гідрогелевих матеріали на сьогодні мають обмежене практичне розповсюдження. Саме тому на сьогодні залишається актуальною проблема одержання ефективних гібридних екологічно безпечних біоградабельних полімерних гідрогелей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі літературного огляду було доведено високу актуальність використання похідних бурого вугілля у вигляді гумінових речовин та кислот за для модифікацію різних полімерних гідрогелевих композицій [3]. В ряді робот [4, 5] встановлено, що властивості желатину, як основи для одержання полімерних гідрогелей, можна покращити шляхом додавання похідних вугілля, які взаємодіють через систему хімічних або фізичних зв'язків, щоб підвищити, з одного боку, реологічну та механічну міцність гідрогелей, або надати, з іншого боку, особливі властивості, такі як водостійкість або термостабільність. В наших попередніх роботах [6, 7] була встановлена ефективна гібридна та антибактеріальна дія гумінових кислот у гідро гелях на основі желатин та агар-агару. Саме тому актуальним є дослідження експлуатаційних характеристик гібридних біополімерніх гідрогелів желатину, модифікованих гуміновими речовинам.

Постановка завдання. Отже, метою статті є дослідження експлуатаційних властивостей гібридних екологічно безпечних біоградабельних гумін-полімерних гідрогелей желатину.

Завдання статті:

– вивчити особливості механізму гібридної модифікації желатину гуміновими кислотами,

– визначення впливу гібридної модифікації желатину гуміновими кислотами на комплекс експлуатаційних властивостей гібридних екологічно безпечних біоградабельних гумін-полімерних гідрогелей желатину.

Виклад основного матеріалу дослідження. Гібридні полімерні екологічно безпечні біоградабельні гумін-полімерні гідрогелі желатину готували наступним чином. Спочатку 10 % розчин желатину виготовляли в дистильованій воді при температурі 90–100 °С. Після цього шляхом змішування отримували розчини з гуміновими кислотами, в яких концентрація останньої становила 0, 5, 10 і 15 %.

При одержані гібридних екологічно безпечних гібридних екологічно безпечних біоградабельних гумін-полімерних гідрогелей використовували харчовий желатин марки Р-11. Як гібридні модифікатори використовували гумінові кислоти, які отримували при екстракції бурого вугілля лужним розчином пірофосфату натрію з подальшою екстракцією 1 %-ним розчином гідроксиду натрію і осадженням мінеральної кислотою. В таблиці 1 наведена характеристика дослідних зразків бурого вугілля різного ступеня метаморфізму.

Необхідно зазначити, що зразки бурого вугілля дещо різняться, а саме: вміст аналітичної вологи коливається від 8,1 до 30,6 %; зольність від 8,3 до 48,7 %; вміст загальної сірки від 1,87 до 4,00 %; вихід летких речовин від 29,1 до 43,7 %. Показники елементного аналізу та виходу гумінових кислот коливаються в залежності від виходу летких речовин.

ІЧ-спектри отримували на ІЧ-спектрофотометрі SPECORD 75 UR при 293-298 К в інтервалі частот 4000 – 500 $см^{-1}$ в наступних умовах: щілина – 3, час запису – 13.2 хв., постійна часу – 1 сек. Для рідких зразків використовували метод «роздавленої» краплі в тонкому (0,1 мм) шарі між стеклами KBr.

Набухання полімерних гідрогелів проводили у водних розчинах. Ступінь набухання розраховували за формулою:

$$Q = 100(\frac{m_1 - m}{m}) \quad (1)$$

Таблиця 1

Технічний аналіз бурого вугілля*

Зразок вугілля	Технічний аналіз, %			
	W^a	A^d	S^d_t	V^d
1	16,8	48,7	2,50	29,1
2	8,1	8,3	1,87	43,7
3	30,6	36,7	4,00	43,7

W^a – волога на аналітичний стан, %; A^d – зольність на сухий стан, %; S^d_t – вміст сірки на сухий стан, %; V^d – вихід летких речовин на сухий беззольний стан, %.

де m_1 – маса набряклого зразка, г.; m – маса зразка до витримування у водному розчині, г.

Антибактеріальні властивості полімерних гідрогелів визначали за часом інгібування зон активного росту плісняви Aspergillus niger (A. niger) на поверхні гібридних екологічно безпечних біодеградабельних гідрогелевих матеріалів у живильному середовищі за допомогою електронного мікроскопа Digital Microscope HD color CMOS Sensor.

Спочатку методом ІЧ-аналіз було проведені дослідження для визначення найбільш характерних функціональних груп в желатині, гумінових кислотах та системах желатин–гумінові кислоти для оцінки характеру гібридної модифікації рис. 1.

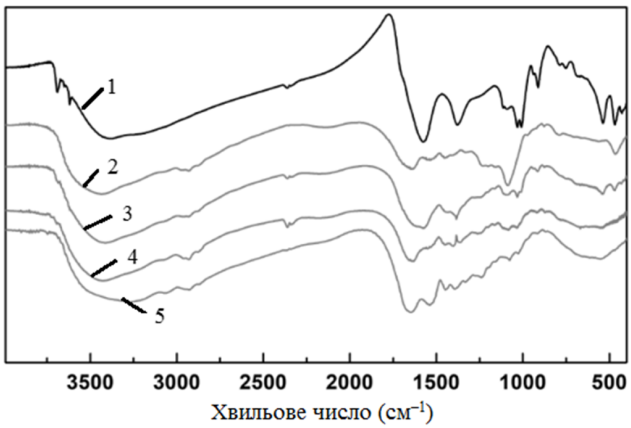


Рис. 1. ІЧ-спектри: 1 – гумінова кислота, 1 – желатин, 3 – желатин +5 % мас. гумінової кислоти № 1, 4 – Желатин +10 % мас. гуміновими кислотами № 1, 5 – Желатин +15 % мас. гуміновими кислотами № 1

Встановлено, що ІЧ-спектри чистого розчину желатину та желатин+5 % мас. гумінової кислоти №1 подібні, що пояснюється високою кількістю желатину в зразку, який покриває характерні смуги гумінової кислоти № 1 [5, 6]. З іншого боку, у ІЧ-спектрі систем желатин +10 % мас. гумінової кислоти № 1 смуга в діапазоні 3500–3400 см$^{-1}$, віднесена до валентних коливань N–H та O–H, зміщується в бік нижчих хвильових чисел (3270 см$^{-1}$) [6]. Це можна пояснити взаємодіями Н-зв'язків між карбонільними групами атомів гумінової кислоти № 1 в залишках желатину, що додатково підтверджує взаємодію між гуміновою кислотою і желатином. Якщо розглянути детальніше, у ІЧ-спектрі желатин+10 % мас. гумінової кислоти № 1 смуга первинних амідів змінює свою форму, рухаючись до нижчих хвильових чисел, що свідчить про те, що піки, пов'язані з невпорядкованими структурами, стають більш поширеними, що вказує на перебудову первинних амідів в суміші желатину з гуміновою кислотою. Крім того, смуги при 1653, 1540 та 1400 см$^{-1}$ відповідно, пов'язані з валентними коливаннями νC=O та νNH в первинних амідах та νNH, νC–N, νC–C та валентними модами во вторинних амідах, зростають більш інтенсивно у ІЧ-спектрі в системі желатин+15 % мас. гумінової кислоти № 1 [6]. Частково це може бути пов'язано з наявністю гумінової кислоти, чиї своєрідні смуги зустрічаються в тих же діапазонах. Ці модифікації є ще одним доказом конформаційної зміни вторинної структури желатину.

На рисунках 2–3 зображено графічні залежності ступеня набрякання і часу появи цвілі гібридних екологічно безпечних біоградабельних полімерних гідрогелей желатину від концентрації гумінових кислот, отриманих з різних зразків вугілля.

В таблиці 2 наведені властивості гібридних біополімерних гідрогелей желатину модифікованих ГК.

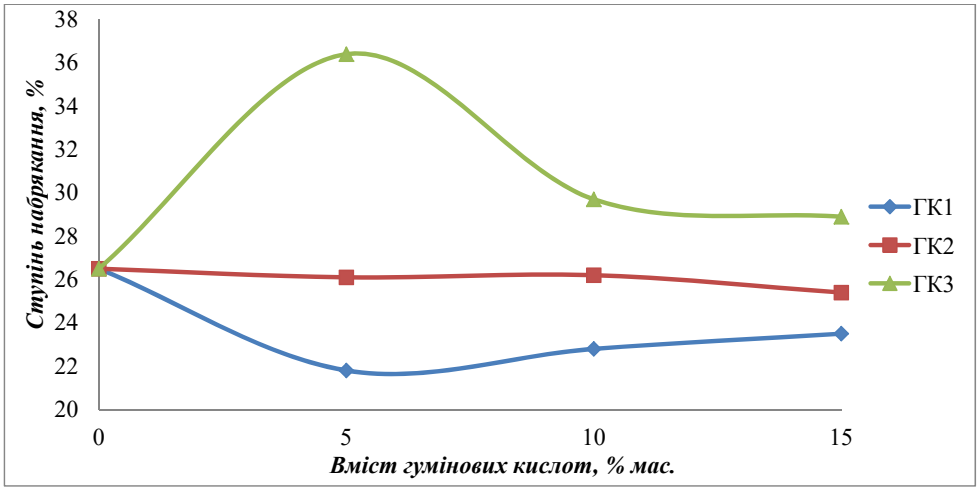


Рис. 2. Залежність ступеня набрякання гібридних екологічно безпечних біоградабельних полімерних гідрогелей желатину, модифікованих гуміновими кислотами

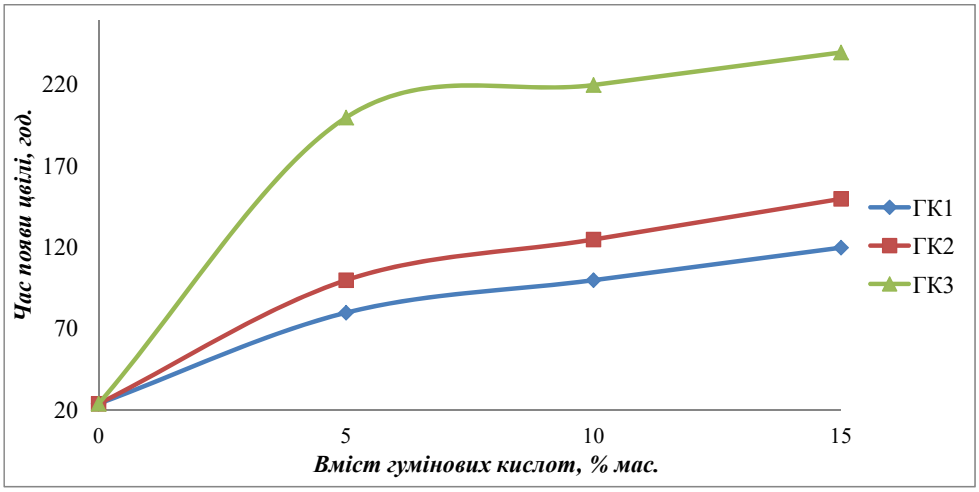


Рис. 3. Залежність часу появи цвілі у гібридних екологічно безпечних біоградабельних полімерних гідро гелях желатину, модифікованих гуміновими кислотами

Таблиця 2

Властивості гібридних біополімерних гідрогелей желатину модифікованих гуміновим кислотами

Зразок	Вміст ГК, % мас.	Ступінь набрякання, % мас.	Час появи цвілі, год
Чиста композиція		26,5	24
1	5	21,8	80
	10	22,8	100
	15	23,5	120
2	5	26,1	100
	10	26,2	125
	15	25,4	150
3	5	36,4	Не з'являється
	10	29,7	Не з'являється
	15	28,9	Не з'являється

З таблиці 2 видно, що гібридна модифікація біополімерних гідрогелів на основі желатину гуміновими кислотами дозволяє отримати гібридні біополімерні гідрогелі з підвищеним ступенем набряканням та надати їм антибактеріальні властивості, що підтверджується даними за показником часу появи плісняви у них.

Висновки. Загалом, в результаті проведених досліджень були досліджені новітні гібридні екологічно безпечні біоградабельні гумін-полімерні гідрогелі желатину, модифіковані гуміновими речовинами бурого вугілля. Показано, що гібридна модифікація желатину гуміновими кислотами пов'язана з конформаційною зміною вторинної структури желатину. Вона дозволяє отримати гібридні біополімерні гідрогелі з підвищеним ступенем набряканням та надати їм антибактеріальні властивості, що підтверджується даними за показником часу появи плісняви у них.

Таким чином, було розроблено новітні гібридні екологічно безпечні біоградабельні гумін-полімерні гідрогелі желатину, модифіковані гуміновими речовинами бурого вугілля, які мають високий потенціал для використання в харчовій, біомедичній та косметологічній галузях.

Список літератури:

1. Altomare L., Bonetti L., Campiglio C.E., De Nardo L., Draghi L., Tana F., Farè S. Biopolymer-based strategies in the design of smart medical devices and artificial organs. *The International Journal of Artificial Organs.* 2018. Vol. 41(6). P. 337–359.

2. Kim S., Oh T., Lee H., Nam J. Trends and perspectives in bio- and eco-friendly sustainable nanomaterial delivery systems through biological barriers. *Materials Chemistry Frontiers.* 2022. Vol. 6. P. 2152–2174.

3. Kneist S. Antibakterielle und antimykotische Wirkung von Huminsubstanzen aus dem Altteicher Moor. *Akademie gemeinnütziger Wissenschaften zu Erfurt. Jahrbuch*. 2005. P. 65.

4. Sousa A.M., Borges J., Silva A.F., Goncalves M.P. Influence of the extraction process on the rheological and structural properties of agars. *Carbohydrate Polymers*. 2013. Vol. 96(1). P. 163–171.

5. Nordqvist D., Vilgis T.A. Rheological Study of the Gelation Process of Agarose-Based Solutions. *Food Biophysics*. 2011. Vol. 6(4). P. 450.

6. Lebedev V., Miroshnichenko D., Xiaobin Z., Pyshyev S., Savchenko D. Technological Properties of Polymers Obtained from Humic Acids of Ukrainian Lignite. *Petroleum and Coal* . 2021. Vol. 63 (3). P . 646–654.

7. Lebedev V., Miroshnichenko D., Xiaobin Zhang, , Pyshyev S., Savchenko D., Nikolaichuk Y. Use of Humic Acids from Low-Grade Metamorphism Coal for the Modification of Biofilms Based on Polyvinyl Alcohol. *Petroleum and Coal*. 2021. № 63 (4). P. 953–962.

Lebedev V.V., Miroshnichenko D.V., Savchenko D.O., Matyukhov D.V., Lendych E.S., Solovey L.V.

STUDY OF OPERATIONAL PROPERTIES OF HYBRID ENVIRONMENTALLY SAFE BIODEGRADABLE HUMIN-POLYMER GELATIN HYDROGELS

The article shows research on the operational properties of hybrid environmentally safe biodegradable humin-polymer gelatin hydrogels. Hybrid environmentally friendly biodegradable films with bactericidal properties were obtained by pouring solutions of polyvinyl alcohol with a concentration of 10% by weight, to which different amounts of humic acid were added. When obtaining hybrid ecologically safe hybrid environmentally safe biodegradable humic polymer hydrogels, food gelatin of the P-11 brand was used. As hybrid modifiers, humic acids were used, which were obtained during the extraction of lignite with an alkaline solution of sodium pyrophosphate followed by extraction with a 1% solution of sodium hydroxide and precipitation with mineral acid. It was shown that the hybrid modification of gelatin with humic acids is associated with a conformational change in the secondary structure of gelatin. It is also noted that the peculiarity of the hybrid modification of gelatin with humic acids can be explained by H-bond interactions between carbonyl groups of humic acid atoms in gelatin residues. It is shown that the hybrid modification of gelatin with humic acids makes it possible to obtain hybrid biopolymer hydrogels with an increased degree of swelling and to give them antibacterial properties, which is confirmed by the data on the time of appearance of mold in them. As a result of the research carried out in the article, the latest hybrid environmentally safe biodegradable humin-polymer gelatin hydrogels, modified with lignite humic substances, which have a high potential for use in the food, biomedical and cosmetology industries, were investigated.

Key words: *hybrid, environmentally safe, biodegradable polymer hydrogels, gelatin, bactericidal properties, humic acids.*

УДК 666.762
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/34

Нудченко Л.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Береговий Т.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мережко Н.В.
Київський національний торгівельно-економічний університет

Свідерський В.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ СТАН ПОВЕРХНІ ДИСПЕРСНИХ ОКСИДІВ

Ефективність застосування дисперсних оксидів в складі композиційних матеріалів різного функціонального призначення в значній мірі визначається фізико – хімічними властивостями їх поверхні. Не менш важливим фактором являється і стабільність останніх в процесі експлуатації. Однак дані дані відносно таких особливостей дуже обмежені, тому метою статті є кількісна оцінка складу, енергетичного стану та адсорційної здатності ряду оксидів II – IV груп періодичної системи, що використовуються в якості наповнювачів або слугують складовими компонентами різних композитів.

Методами, що базуються на різних фізичних принципах (змочуваності полярними і неполярними рідинами, діелектричними властивостями, ІЧ – спектроскопія, комплексний термічний аналіз) оцінений енергетичний стан поверхні дисперсних оксидів та його зміни в процесі дії вологого середовища з мікроорганізмами.

Виявлено рівень розвитку деструкційних процесів та найбільш стабільні оксидні матеріали (Al_2O_3 та його модифікації).

Одержані результати можуть знайти застосування в промислових і біологічних процесах.

Ключові слова: *дисперсні оксиди, змочуваність, діелектричні втрати, питома поверхня, енергетичний стан поверхні, ІЧ – спектроскопія, дериватографія.*

Постановка проблеми. Ефективне застосування оксидних наповнювачів в складі композиційних матеріалів різного функціонального призначення представляє значний науковий і практичний інтерес. Існуючі сучасні підходи вибору тих чи інших оксидів базуються переважно на оцінці фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей кінцевого складу композиту і потребують обширних системних досліджень.

Властивості поверхні наповнювачів (енергетичний стан, наявність лужних і кислотних центрів, їх фізико-хімічні властивості) до уваги часто не беруться. Тому порівняльний аналіз вказаних властивостей дисперсних оксидів в аспекті взаємодії з адсорбатами різного ступеня хімічної активності дозволить визначити їх реакційну здатність та прогнозувати рівень впливу на покращення експлуатаційної надійності композитних матеріалів. З іншого боку наявність такої інформації може спростити процес вибору ефективних оксидних наповнювачів .

Аналіз останніх досліджень. Оксиди різни хімічних елементів знаходять широке використання в промисловості і медицині як складові та структуроутворюючі або функціональні інгредієнти цілої лінійки різноманітних матеріалів від водотривких і теплоізоляційних до конструкційних. В той же час слід відмітити наявність низки обмежень на їх використання в складі готових виробів через проблеми на стадії виробництва в частині керування процесами взаємодії зі зв'язувальною речовиною та досягнення оптимальних технологічних режимів.

Прогнозування ступеню взаємодії між рідкою і твердою фазою являється обов'язковою умовою при розробці низки процесів і технологій в хімічний промисловості, що відносяться до композиційних матеріалів різного функціонального призначення.

Повнота змочування поверхні наповнювачів являється визначаючим параметром в технології полімерних композитів, яка передбачає диспергування наповнювачів і пігментів в розчинах або розплавах високомолекулярних сполук, формування покриттів та склеювання субстратів різної хімічної структури, активацію поверхні неорганічних і органічних полімерів [1].

Регулювання повноти контакту між твердою поверхнею наповнювача та рідиною (зв'язуючим) в наш час базується на реалізації концепції гідрофільно – ліпофільного балансу (ГБЛ)[2]. Цей підхід має ряд обмежень, що констатується в роботах [3, 4]. Однією з причин цього являється зміна ГБЛ поверхні наповнювачів в процесі контакту з оточуючим середовищем, зокрема водою в різних агрегатних станах та іншими деструкційними агентами.

Характерною особливістю значної кількості оксидних матеріалів являється наявність кислотно – лужних властивостей їх поверхні. Так оксиди заліза, титана, кремнію і алюмінію відносяться до сильних твердих кислот апротонного та протонного типів, здатних до донорно – акцепторної взаємодії з фенільними групами в складі полімерних зв'язних. Електронно – акцепторна і протонно – донорна здатність зростає в ряду оксидів елементів від Co_2O_3 до Al_2O_3 [5].

Оксиди з основними властивостями можуть взаємодіяти з ланцюгами макромолекул по нуклеофільному механізму з наступним їх розривом і утворенням циклічних продуктів. Наслідком цього являється зниження температури початку деструкції і зменшення кількості твердого залишку полімера, а також зміщення максимальної швидкості розкладу в бік нижчих температур.

Передбачають, що оксиди слаболужного характеру сприяють зменшенню виділення легколетких продуктів деструкції полімерів та підвищенню суцільності покриттів на їх основі. Досягається це за рахунок зв'язування молекул води, що міститься в кристалогідратах таких оксидів [6].

Відомо, що стійкість оксидних сполук до дії рідких агресивних середовищ визначається величиною вільної енергії утворення їх із елементів. До найбільш стійких за цією ознакою відносяться оксиди кальцію, ітрію, лантану і торію. Однак CaO і La_2O_3 легко піддаються гідратації, а оксиди ітрію і торію не знаходять широкого використання. Тому розповсюдження на практиці отримали оксиди алюмінію, магнію і цирконію, які мають достатньо високу хімічну стійкість. Слід враховувати при цьому, що не всі згадані оксидні сполуки можуть задовільно суміщатися зі зв'язними речовинами різної хімічної природи внаслідок їх високої деструкційної активності [7].

Постановка завдання. Метою досліджень являється кількісна оцінка фізико – хімічних властивостей поверхні дисперсних оксидів елементів II – IV груп та особливостей їх змочування водою зокрема в присутності мікроорганізмів, як активного деструкційного середовища.

Пропонується оцінити властивості дисперсних оксидів за такими показниками, як змочуваність, коефіцієнт ліофільності, питома ефективна поверхня, умовний тангенса кута діелектричних втрат, поверхнева енергія та визначити рівень їх стабільності при дії відмічених деструкційних ефектів.

Задачами роботи є:

– кількісна оцінка змочуваності та енергетичного стану поверхні дисперсних оксидів;

– аналіз зміни властивостей поверхні під дією води в поєднанні з мікроорганізмами;

– встановлення особливостей взаємодії оксидів алюмінію з водою.

Виклад основного матеріалу. Об'єктами дослідження були вибрані дисперсні оксиди різних хімічних елементів II – IV груп періодичної системи марки «ч.д.а.». Крім того у випадку оксиду алюмінію для порівняння вивчались технічний глинозем, електрокорунд білий і нормальний та гідрооксид алюмінію.

Енергетичний стан поверхні досліджуваних матеріалів оцінювався за такими показниками, як змочуваність при натіканні водою $B_н$ (косинус кута змочування поверхні дисперсної речовини рідиною), коефіцієнт ліофільності β ($\beta=\frac{B_н}{B_н}$, де $B_н$ – змочуваність при натіканні неполярною рідиною), умовний тангенс кута діелектричних витрат (tg δ). Питома ефективна поверхня при змочуванні водою і бензолом визначились з використанням методів змочування при натіканні [8].

Насичення парою води дисперсних оксидів здійснювалось шляхом витримки в середовищі з 96% відносною вологістю в присутності мікроорганізмів до досягнення адсорбційної рівноваги [9].

Встановлено за результатами оцінки змочуваності водою при натіканні, що всі досліджувані матеріали можливо поділити на дві групи. Мінімальну змочуваність (на рівні $2,3 – 8,9\times10^{-2}$) мають оксиди Al, Ni, Ba, Co, Ti, Si, Ca та Mg. Всі інші оксидні матеріали характеризуються показниками змочуваності на рівні $10.0 – 20,4\times10^{-2}$. Найгірше змочується водою Al_2O_3 ($2,3\times10^{-2}$), а найкраще ZnO ($20,4\times10^{-2}$) (табл. 1).

Таблиця 1

Властивості поверхні дисперсних оксидів

Оксид	Змочуваність водою при натіканні (×10²)	Коефіцієнт ліофільності	Питома ефективна поверхня по воді, м²/г	Умовний тангенс кута діелектричних витрат
MgO	8.9 | 6.1	0.45 | 0.42	33.6 | 32.8	0.400 | 0.101
CaO	8.9 | 10.4	1.00 | 0.40	36.7 | 17.7	0.590 | 0.510
ZnO	20.4 | 9.8	1.07 | 0.38	9.2 | 5.6	0.594 | 0.419
BaO	5.7 | 11.3	0.49 | 0.53	1.3 | 5.5	0.550 | 0.490
SnO	17.4 | 5.3	2.23 | 0.31	16.5 | 5.3	0.359 | 0.282
PbO	15.6 | 6.6	0.47 | 0.32	6.2 | 1.4	0.219 | 0.100
B_2O_3	10.0 | 7.9	1.40 | 0.29	1.4 | 3.5	0.500 | 0.099
Al_2O_3	2.3 | 5.1	0.20 | 0.63	16.8 | 19.7	0.588 | 0.339
Cz_2O_3	14.7 | 5.5	0.47 | 0.37	2.8 | 1.6	0.590 | 0.229
Fe_2O_3	15.4 | 8.0	1.83 | 0.14	2.2 | 5.9	0.599 | 0.391
Co_2O_3	7.1 | 5.2	0.36 | 0.12	12.1 | 8.0	0.599 | 0.590
Ni_2O_3	5.0 | 8.4	0.54 | 0.34	21.4 | 37.9	–
SiO_2	8.8 | 0.9	0.62 | 0.47	19.9 | 15.1	0.599 | 0.299
TiO_2	7.8 | 11.6	1.66 | 0.54	7.1 | 1.7	0.599 | 0.590

Примітка: * В чисельному наведені дані для вихідних оксидів, а в знаменнику після витримки у вологому середовищі з мікроорганізмами

Заміна характеру змочуючої рідини на неполярний (бензол) дещо порушує порядок розташування оксидів за величиною коефіцієнта ліофільності. Мінімальні його значення зафіксовано для Al_2O_3. Найбільш ліофільним серед досліджуваних оксидів, як і у випадку змочуваності при натіканні водою, являється Fe_2O_3 (1.83). В групу гідрофільних матеріалів потрапили також оксиди Ca, Zn, B, Ti, а всі інші мають гідрофобну поверхню.

Стосовно ефективної питомої поверхні по воді можливо серед досліджуваних матеріалів виділити три групи. Максимальний її рівень (33.6 – 33.7 м²/г) відмічено у оксидів магнію і кальцію. Друга група включає оксиди алюмінію та заліза (16.8 – 19.9 м²/г). Інші досліджувані матеріали мають ефективну питому поверхню в межах 1.3(BaO) – 9.2(ZnO) м²/г.

Аналіз отриманих даних відносно умовного tg кута діелектричних втрат при частоті 1000 Гц свідчить про відсутність значної диференціації в рівнях взаємодії дисперсних оксидів з парою води на відміну від змочуваності в рідкому стані. Виключення складає тільки MgO (tg δ = 0.400, на фоні 0.500-0.599 для всіх інших діелектриків).

Прогнозування стабільності основних властивостей поверхні мінеральних наповнювачів, особливо на етапі експлуатації, представляє значний інтерес в науковому і прикладному плані. В першу чергу це стосується деструктивної дії води в різних агрегатних станах у поєднанні з різноманітними каталізуючими факторами. На прикладі вологого середовища (96%) з присутністю мікроорганізмів, як одного з найбільш розповсюджених випадків в процесі застосування композиційних матеріалів, було оцінено рівень стабільності основних властивостей поверхні дисперсних оксидів [10].

Виявлено в частині змочуваності водою неоднозначну картину. Зростання останньої спостерігається тільки для оксидів Ba (на 286%) та Al (на 121%). Змочуваність всіх інших тестованих матеріалів погіршилась в межах від 89.8 (SiO_2) до 21% (B_2O_3). Абсолютні максимальні значення $B_{(н)}$ відмічено для TiO_2 і BaO, а мінімальні у SiO_2 окрім двох останніх відносно суттєві зміни в процесі тестування спостерігається в Al_2O_3.

Ліофільно – ліофобний баланс поверхні дисперсних оксидів після дії вологи в поєднанні з мікроорганізмами, як і у випадку змочуваності водою, змінюється неоднозначно. Коефіцієнт ліофільності збільшується тільки для BaO (45.7%) та Al_2O_3 (117,9%). Максимальне його зменшення відмічено для Fe_2O_3 (92,3%), а мінімальне – MgO (6.7%). Лінійка оксидних матеріалів з найвищими значеннями β має такий вид: $BaO>Al_2O_3>TiO_2>SiO_2$.

Важливим фактором при оцінці енергетичного стану поверхні дисперсного матеріалу являється рівень розвитку її ефективності питомої складової. Аналогічно змочуваності встановлено диференційовану зміну ефективної питомої поверхні по воді досліджуваних оксидів після експозиції у вологому середовищі. Вона збільшується у BaO (322%), B_2O_3 (150%), SiO_2 (24%) та Al_2O_3 (18%).

За абсолютними величинами ефективна питома поверхня перебуває в межах 4.2 (BaO) – 3.1 $м^2/г$ (Al_2O_3). Зменшення поверхні після тестувань становить від 372% (TiO_2) до 2.4% (MgO), що складає відповідно 4.2 – 0.8 $м^2/г$.

Застосування методів дослідження, що базуються на інших фізичних принципах (оцінка діелектричних витрат після витримки у вологому середовищі) показало, на відміну від змочуваності, досить високу однорідність енергетичного стану поверхні дисперсних оксидів. Встановлено, що після дії вологи в присутності пліснявих грибів можливе значне його зниження (у B_2O_3 до 80%)). Окрім останнього найменші значення tg δ зафіксовано для MgO (0.101), Cr_2O_3 (0.229), SiO_2 (0.229), а найбільші у TiO_2 (0.590) та BaO (0.490).

Аналіз отриманих даних стосовно змочуваності і діелектричних витрат дозволяє стверджувати про нерівноцінну участь активних груп поверхні оксидів в забезпеченні її енергетичного стану. Доказом може слугувати – високі значення tg δ в TiO_2 у вихідному стані, а також їх мінімальне зменшення (всього на 0.09) після експозиції в агресивному середовищі. На цьому фоні змочуваність, коефіцієнт ліофільності і питома ефективна поверхня змінюється більш суттєво.

Детальна оцінка енергетичного стану поверхні дисперсних оксидів, які представляють практичний інтерес та входять до складу полімінеральних наповнювачів була здійснена шляхом оцінки їх кристалічного поверхневого натягу з використанням органічних речовин одного гомологічного ряду (табл. 2).

Таблиця 2

Критичний поверхневий натяг дисперсних оксидів (Н/м ×10^3) після дії вологи в присутності мікроорганізмів

Оксид	Вихідний стан	Після випробувань
MgO	96	86
CaO	126	90
Al_2O_3	85	120
Fe_2O_3	140	96
SiO_2	125	75

Встановлено, що максимальний критичний поверхневий натяг серед досліджуваних оксидів має Fe_2O_3 (140 × 10^{-3} Н/м), а мінімальний – Al_2O_3 (85×10^{-3} Н/м). Після експозиції у агресивному середовищі тільки для останнього відмічено його збільшення на 41,2%. Мінімальні зміни критичного поверхневого натягу спостерігається тільки у оксиду магнію (10%).

Отримані експериментальні дані показали наявність суттєвих відмінностей енергетичного стану поверхні дисперсних оксидів та його стабільності в присутності вологи з мікроорганізмами. Серед досліджуваних матеріалів особливої уваги заслуговує Al_2O_3. Його поверхня має мінімальну змочуваність водою і коефіцієнт ліофільності та критичний поверхневий натяг. Після експозиції у вологому середовищі для згаданих показників і питомої ефективної поверхні характерно стабільне зростання. Наявність таких закономірностей дає підстави стверджувати про високу хімічну активність реакційноздатних центрів на його поверхні відносно води, що може посилюватись амфотерними властивостям останнього. Лужно – земельні оксиди (Mg та Ca) та кислотні (Si, Ti) значно поступаються в здатності до хімічної взаємодії в поверхневому шарі оксиду алюмінію.

З метою вияснення особливостей поведінки Al_2O_3 вологому середовищі для порівняння були протестовані різновиди електрокорунду $Al(OH)_3$ суміші оксидів алюмінію і кремнію (табл. 3).

Встановлено, що гідрофобність матеріалів на основі Al після експозиції у вологому середовищі з мікроорганізмами міняється неоднозначно. Погіршення змочування (зниження β від 1.19–2.00 до 0.08–0.39) характерно для всіх сполук, за виключенням Al_2O_3 та нормального електрокорунду. Коефіцієнт ліофільності вказаних матеріалів збільшується від 0.20–0.22 до 0.30–0.32. Гідрофобізація дисперсних матеріалів може бути пояснена орієнтованою адсорбцією кислих продуктів метаболізму. В разі оксиду алюмінію і нормального електрокорунду даний процес не є переважним. Відмінна особливість досліджуваного Al_2O_3 – збільшення pH водних витяжок (на 0.11–0.28) в процесі випробування. Аналогічний ефект відмічено для суміші SiO_2 у співвідношенні 75:25.

Питома ефективна поверхня по воді і бензолу їх дещо зростає (0.9–2.9 $м^2/г$). Для інших композицій концентрація водневих іонів значно збільшується і особливо для діоксида кремнію (pH змінюється від 7.52 до 5.45).

Виконаний фізико – хімічний аналіз видів оксиду алюмінію показав, що особливості взаємодії з пліснявими грибами у вологому середовищі визначаються наявністю в його складі різних форм води. Збільшення pH реакційного середовища характерно для частково гідратованого, а зменшення – для безводного оксиду. Дереватографічний аналіз оксидів алюмінію різного ступеня

Таблиця 3

Властивості поверхні дисперсних матеріалів на основі алюмінію

Матеріал	$B_н \times 10^2$	β	pH водяної витяжки	Питома ефективна поверхня по воді, $м^2/г$	Питома ефективна поверхня по бензолу, $м^2/г$
$Al(OH)_3$	3.23/5.25*	2.00/0.39	–	1.5/2.4	1.3/1.2
Електрокорунд білий	6.04/5.04	0.31/0.21	–	5.7/7.6	1.7/0.9
Електрокорунд нормальний	1.43/1.96	0.22/0.30	–	1.7/1.4	2.7/2.6
Суміші Al_2O_3 та SiO_2 (мас.%)					
75:25	3.14/2.48	0.32/0.26	7.92/8.03	17.6/18.6	14.9/15.8
50:50	2.95/2.32	0.31/0.25	7.95/6.86	18.3/17.4	10.1/9.6
25:75	2.63/1.83	0.30/0.24	7.72/6.88	19.1/16.3	6.3/5.4

Примітка * – по аналогії з таблиці 1.

гідратації (наявність $Al(OH)_3$ та AlO(OH) підтверджують ендоефекти при 548–578 і 813 К відповідно) в корунді виявив ослаблення зв'язку гідроксильних груп з матеріалом після дії пліснявих грибів. Ендоефекти, викликані наявністю $Al(OH)_3$ AlO(OH), зникають повністю (рис. 1).

Одночасно з цим відмічається поява ендотермічних ефектів при 443–458 К, обумовлених видаленням адсорбованої води. Витримка вказаних матеріалів у вологому середовищі (96%) практично не впливає на наявність гідроксильних груп. Відсутність для деяких видів гідратованого оксиду алюмінію ендоефекту характерного для AlO(OH) пов'язано з незначною його кількістю (менше 0.5мас). Максимальна втрата маси (4.37%) відмічено у матеріалу зі збільшеним вмістом AlO(OH).

Дія пліснявих грибів на гідроксид алюмінію супроводжується зменшенням інтенсивності ендоефекту при 593–608 К (часткова дегідратація $Al(OH)_3$) та другого не менш вираженого при 818 – 823 К (повна дегідратація). Втрата маси для гідроксиду алюмінію після впливу мікроорганізмів складає інтервал 593–608 К 19.0 % в порівнянні з 17.6% у контрольного і 17.02 % після витримки у вологому середовищі при кінцевих значеннях 34.8 та 34.55% відповідно. Отже, мікроорганізми сприяють послабленню зв'язку гідроксильних груп з атомом алюмінію.

Можливість гідратації оксиду алюмінію в процесі дії пліснявих грибів підтверджують появою на його ІЧ – спектрах широкої смуги поглинання з максимумом 3450 $см^{-1}$. Суттєвих змін в даній області для вихідного і видержаного у вологому середовищі оксиду не спостерігається (рис. 2).

Дія пліснявих грибів на електрокорунд, який не містить практично води, супроводжується протіканням дещо інших процесів. Максимум ендоефекту, обумовленого видаленням адсорбційної води, зміщується в більш високотемпера-

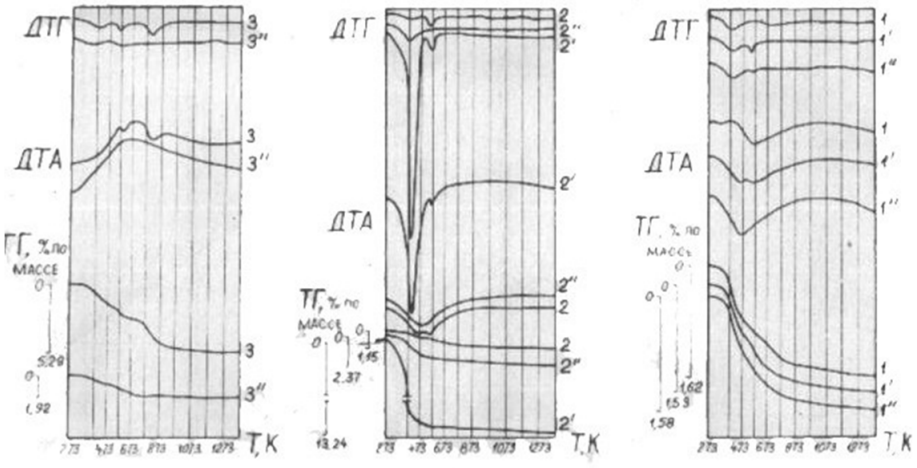


Рис. 1. Дериваторами Al2O3:
1, 2, 3 – вихідний Al2O; 1′, 2′ – після витримки у вологому середовищі;
1″, 2″, 3″ – після дії мікроорганізмів та вологого середовища

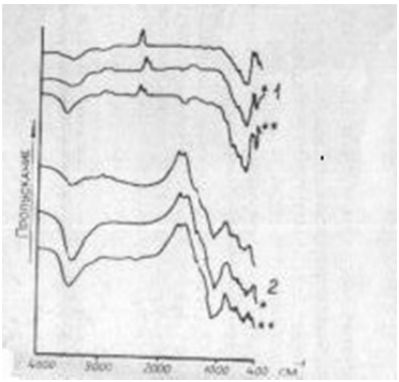


Рис. 2. ІЧ – спектри оксиду алюмінію (1) та білого електрокорунду (2) після витримки у вологому середовищі (*) та в присутності мікроорганізмів(**)

турну область на 55–70 градусів. Після витримки у вологому середовищі для нормального електрокорунду це значення не перевищує 45. а для білого електрокорунду 5 градусів. Зменшення маси складає 0.1%. Отже, вплив мікроорганізмів на електрокорунд сприяє появі більш міцно сорбованої води.

Виконаний комплексний фізико – хімічний аналіз дозволив пояснити механізм змін на поверхні Al_2O_3. Сутність його полягає в утворенні гідроксидів при дії мікроорганізмів та води на безводний Al_2O_3 з інгібуванні їх розвитку за рахунок кислотно – основного зв'язування продуктів метаболізму або в безпосередньому перебігу зазначених процесів на частково гідратованому оксиді.

Висновки і пропозиції. Методами аналізу, що базується на різних фізичних принципах досліджень фізико – хімічних властивостей поверхні дисперсних оксидів та їх стабільність у вологому середовищі з мікроорганізмами. Наведена класифікація оксидів за показниками змочуваності, tg кута діелектричних втрат та критичного поверхневого натягу. Виявлено найбільш стійкі матеріали (на основі алюмінію).

Одержані результати можуть мати практичне значення.

Список літератури:

1. Maxim, L. Daniel; Niebo, Ron; McConnell, Ernest E. (2014-04-01). "Perlite toxicology and epidemiology – a review". InhalationToxicology. 26 (5): 259–270. doi:10.3109/08958378.2014.881940. ISSN0895– 8378. PMC 4002636. PMID 24601903.
2. Bilim C. Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material. Constr Build Mater 2011; 25:3175–80.
3. Скоробогатий Я.П. Фізична і колоїдна хімія та фізико-хімічні методи дослідження / Я.П. Скоробогатий, В.Ф. Федорко. Львів: Компакт-ЛВ, 2005. 245 с.
4. Киреев В. А. Краткий курс физической химии : Учебник для вузов. 5-е изд., стереотипное. М. : Химия, 1978. 624 с.
5. Ліпатніков, В. Є. Фізична та колоїдна хімія / В. Є. Ліпатніков, К. М. Козаков. Київ: Вища школа, 1993. 197 с.
6. Романова Н.В. Загальна та неорганічна хімія. К.: Вища школа, 1988. 432 с.
7. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т./ за ред. В. С. Білецького. Донбас, 2004.Т.2. 640 с.
8. Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А. и др. Введение в физику поверхности / Под ред. В. И. Сергиенко. М.: Наука, 2006. 490 с.
9. Сальник В. Г. Фізико-хімічна механіка дисперсних структур у технології будівельного фарфору / В. Г. Сальник, В. А. Свідерський, Л. П. Черняк. К. : Знання, 2012. 158 с.
10. Пащенко А. А. Кремнийорганические покрытия для защиты от биокоррозии / А.А. Пащенко, В. А. Свидерский. К.: Техніка, 1988. 136 с.

Nudchenko L.A., Berehovy T.O., Merezhko N.V., Sviderskyi V.A. **ENERGY STATE OF THE SURFACE OF DISPERSED OXIDES**

The effectiveness of the use of dispersed oxides in composite materials of various functional purposes is largely determined by the physical and chemical properties of their surface. An equally important factor is the stability of the latter during operation. However, the given data regarding such features are very limited, so the purpose of the article is to quantitatively assess the composition, energy state, and adsorption capacity of a number of oxides of groups II-IV of the periodic table, which are used as fillers or serve as components of various composites.

Using methods based on various physical principles (wettability by polar and non-polar liquids, dielectric properties, IR spectroscopy, complex thermal analysis), the energy state of the surface of dispersed oxides and its changes during the action of a moist environment with microorganisms was assessed.

The level of development of destructive processes and the most stable oxide materials (Al2O3 and its modifications) were revealed.

The obtained results can find application in industrial and biological processes.

Key words: *dispersed oxides, wettability, dielectric losses, specific surface area, energy state of the surface, IR spectroscopy, derivatography.*

УДК 621.35
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/35

Savvova O.V.
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

Zaitseva I.S.
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

Smirnova O.L.
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Voronov G.K.
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

Fesenko O.I.
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

Pylypenko O.I.
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF TI6AL4V TITANIUM ALLOY IN MALIC ACID SOLUTIONS

The results of research the influence of electrolysis parameters on the process of oxidation of Ti6Al4V titanium alloy in malic acid solutions have been given. It has been shown that the character of the forming dependences is definded by the value of the used current density. It has been shown that for the formation of oxide films it is necessary to use an anode current density of at least 0.5 A·dm–2. At lower current densities, the film is not formed and the dependence of the cell voltage on the electrolysis time has a complex shape due to the parallel processes of film dissolution and the formation of intermediate oxides. At current densities above 0.5 A·dm–2, the forming dependences obtained on the alloy have the form of straight lines, which indicates the formation of continuous barrier-type oxide films with good passivating properties. The growth rate of the oxide under these conditions is directly proportional to the used value of ja, which is evidence that the entire used current is spent on the formation of titanium dioxide, which forms the passive layer. The effect of the final cell voltage, current density, and electrolyte concentration on the time to reach the maximum thickness of the oxide film on the alloy has been studied. The influence of the value of the final voltage on the cell manifests itself in an increase in the duration of electrolysis, which corresponds to a larger film thickness. This effect is due to the fact that the oxide is formed under conditions of a constant potential gradient in the film. The limiting thickness of the oxide will increase in direct proportion to the increase in cell voltage, since the increase in V causes the potential gradient in the film to be maintained for a longer time. The result of electrochemical oxidation of alloy Ti6Al4V in malic acid solutions at current densities greater than 0.5 A·dm–2 is the formation of interference-colored oxide films with good adhesion to the metal surface. The color of the film depends on the final value of V on the cell. The limiting thickness and color of the oxide film are defined by the forming voltage and do not depend on other electrolysis parameters.

Key words: *titanium, forming dependences, oxide film, anode oxidation, passivity, electrical resistance, barrier layer.*

1. Introduction. Titanium is an active metal, but under ordinary conditions, a natural oxide film forms on its surface [1]. This film is a protective barrier passivating titanium in many oxidizing mediums. In some cases, such a film acts like a functional material with increased corrosion resistance [2] and properties of biological inertness [3] and compatibility [4]. Artificially obtained films are characterized by a certain structure and thickness, as well as, as a rule, a more developed relief [5]. These properties, along with the homogeneity of the chemical composition, determine sufficiently high protective properties of the films and allow the formation of a highly developed surface, which is important in the case of using titanium for the manufacture of medical implants [6].

Artificial films on titanium are obtained by thermal oxidation [7] or plasma oxidation [8], diffusion introduction of oxygen [9] and anodic oxidation [10]. The latter method of oxidation, sometimes referred to as anodizing, is the most widely spread.

2. The aim of research. Establishment of the influence of electrolysis parameters on the process of electrochemical oxidation of Ti6Al4V titanium alloy in the malic acid solution.

3. Research tasks. *a*) Show the influence of electrolysis parameters (current density, voltage, electrolyte concentration) on the forming dependences of alloy oxidation. *b*) Determine the dependence of the electrolysis duration (time to reach the limiting film thickness) on the electrolysis parameters.

4. Experimental technique. Titanium alloy specimens in the form of rectangular plates were used for research. The specimens were polished, degreased and flushed with tap water. Degreased specimens were etched in the mixture of nitric and hydrofluoric acids (3:1) and then flushed with the tap water and distilled water. The electrolysis was carried out in the galvanostatic mode, setting the cell voltage in the range of 10–100 volt with a step of 10 volt using a power source. A change in the cell voltage value was recorded by the multimeter Keithley-2000. A beaker with a volume of 250 cm^3 made of chemically resistant glass was used as a cell for electrolysis. Lead was used as the auxiliary electrode.

5. Results and discussion. The most informative for the research of the anodizing process is the study of forming dependences, which show the change in the cell voltage during electrolysis. Such dependences make it possible to study the dynamics of film growth and establish the influence of the electrolysis mode on the features of oxide formation and its structure. Experimental data show that the general type of the forming dependence is determined by the used current density of electrolysis (j_a) and is the same for the entire range of used voltages V. The forming dependences of the alloy were obtained in a solution containing 100 g·dm^{-3} of acid at V = 60 volt (Fig. 1). At j_a = 0.2–0.5 A dm^{-2}, the dependences are non-linear and are often not reproduced (Fig. 1, *1* and *2*). At j_a = 0.2 A·dm^{-2}, the preset V value is not reached at all. This is due to the fact that the process of oxide formation consists of two processes: the electrochemical formation of the film and its dissolution as a result of chemical interaction with electrolyte components. The first process increases the film thickness and its electrical resistance. Chemical dissolution reduces film thickness. The horizontal plateau in dependence *1* (Fig. 1) indicates that the oxidation is carried out in a stationary mode, in which the rate of electrochemical formation of the film is equal to the rate of its chemical dissolution [11]. With an increase j_a to 0.5 A dm^{-2} (Fig. *1* and *2*), a plateau on the curve is appeared, after which a gradual increase in the cell voltage is observed with a final achievement of the preset V. The process is characterized by the presence of a deceleration period, which indicates a change in the kinetics of film formation and the transition of the film structure to one that is less sensitive to the effect of the electrolyte.

Increasing the density j_a to 1–5 A·dm^{-2} results to a linear trend of dependences (Fig. 1, *3–6*), which indicates the formation of minimum porous films with protective properties. The color of the obtained film depends on its thickness, the value of which is defined by preset value of the final cell voltage.

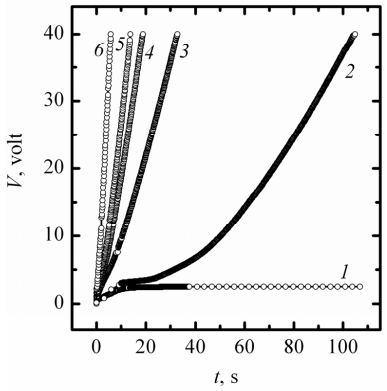


Fig. 1. Dynamics of oxide film formation on Ti6Al4V alloy in malic acid solutions. Electrolysis conditions: j_a, A·dm^{-2}: 0.2(*1*); 0.5(*2*); 1(*3*); 0.75(*4*); 2(*5*); 5(*6*); V = 60 volt; c_A = 100 g·dm^{-3}

The dependence of the time to achieve a preset voltage on the current density has a characteristic shape, which is not changed for the entire series of curves obtained on specimens oxidized in the same mode (Fig. 2, *1–3*).

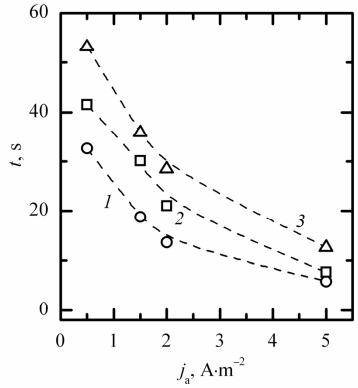


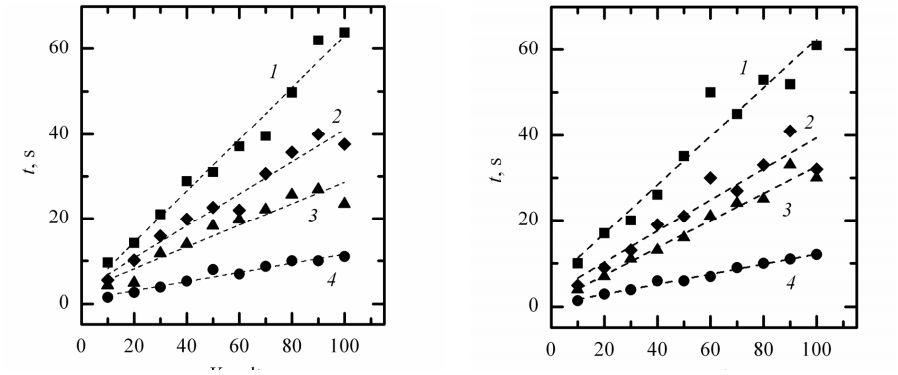
Fig. 2. Dependence of the time to reach the limiting thickness of the oxide film on the anodic current density. V, volts: 40(*1*); 60(*2*); 80(*3*). c_A = 20 g·dm^{-3}

With a sequential increase in voltage, an increase in time t is observed (Fig. 2, dependences from *1* to *3*). The value of the time interval required to achieve a preset V corresponds to the time to achieve the limiting film thickness for the given electrolysis conditions and is the maximum possible duration of electrolysis.

The dependence of the time to achieve the limiting film thickness on U for a series of equal current densities is linear (Fig. 3). The slope of these dependences does not remain constant, but decreases with increasing cell voltage.

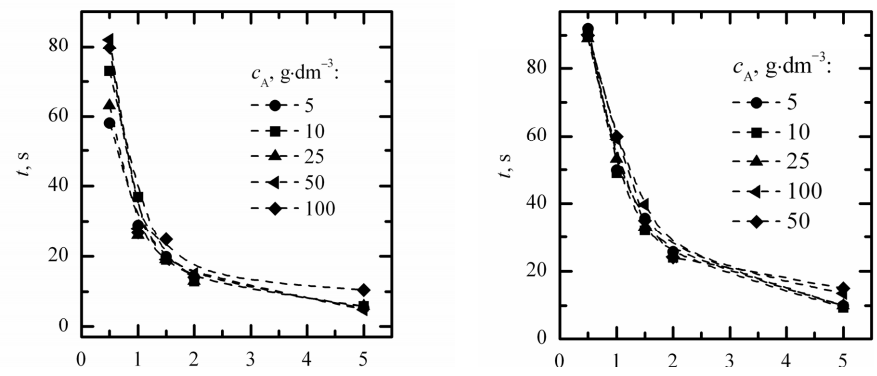
Experimental data (Fig. 4) show that a change in the electrolyte concentration in the solution within 5–100 g·dm^{-3} does not influence the change in the duration of film growth. The limiting film thickness depends only on the preset value V. For a series of electrolyte solutions with the equal acid concentration, the dependence $t=f(V)$ is linear (Fig. 5, *a*, *b*). The slope of the dependences in all cases is the same for the entire studied range of electrolyte concentrations. Some deviations that are noticeable in the figure are due to inaccuracies in the measurement of time, as well as the difference in the surface area of the oxidized specimens.

Thus, the data obtained show that the limiting film thickness depends only on the preset value of the final voltage. The formation of an oxide film occurs as a result of the counter migration of ions Ti^{4+} and O^{2-}. The motive force of the process is a significant intensity of the electric field in the film during the anode oxidation [12]. The increase in the film thickness practically is stopped as soon as the value of the potential gradient is achieved, that fails to provide the motion of ions through the oxide. If the oxide is formed at a constant current density, the film voltage should increase linearly. Therefore, the thickness of the oxide film of a barrier type is defined by the formula $\Delta = a \cdot U$, where a – constant of the film growth (nm·volt^{-1}). The values of this constant for titanium, given in the literature, are changed in the range of 1.9 to 6.0 nm·volt^{-1}. The value of α is influenced by the electrolysis parameters, the method of measuring the oxide thickness, the preparation of the specimen, the physical properties of the film (density, crystal structure, morphological properties – surface uniformity and porosity) [13].



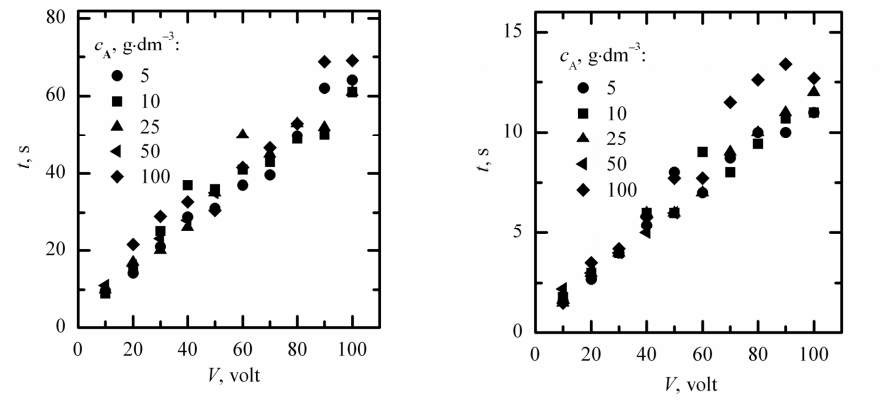
a) **b)**

Fig. 3. Dependence of the time to reach the limiting thickness of the oxide film during anodic oxidation: *a*) – c_A = 30 g·dm^{-3}; *b*) – c_A = 50 g·dm^{-3}. j_a, A·dm^{-2}: 1(*1*); 1.5(*2*); 2(*3*); 5(*4*)



a) **b)**

Fig. 4. Dependence of the time to reach the limiting thickness of the oxide film during anodic oxidation of the alloy Ti6Al4V: *a*) – V = 50 volt; *b*) – V = 100 volt



a) **b)**

Fig. 5. Dependence of the time to reach the limiting thickness of the oxide film during anodic oxidation of the alloy Ti6Al4V. j_a, A·dm^{-2}: *a*) – 1; *b*) – 5

The above facts explain the independence of the limiting film thickness from the current density of electrolysis and electrolyte concentration. Indeed, the film thickness is defined only by the forming voltage. As it increases, the potential falling gradient in the oxide gradually decreases. The oxide is not formed when the critical value of the gradient potential is achieved. Therefore, the thickness and color of the film is defined only by the voltage value. An increase in the value of V increases the electrolysis duration and promotes the formation of a thicker oxide.

6. Conclusions. The process of electrochemical oxidation of Titanium alloy Ti6Al4V in malic acid solutions has been studied. It has been shown that the anodic current density decisively influences on the character of the forming dependence of the alloy specimen. At $j_a < 0{,}5$ A dm^{-2}, a continuous oxide film is not formed and the preset voltage is not achieved. With an increase in $j_a > 0{,}5$ A·dm^{-2}, a linear character of the dependences is observed, indicating the formation of minimum porous films. Films obtained at $j_a > 0{,}5$ A·dm^{-2} are interference-colored. The limiting thickness of the oxide film is defined by the forming voltage and does not depend on other parameters of electrochemical machining of metal. For a series of equal voltage values, the dependence of the time to achieve the limiting thickness of the film on the current density is linear. A change in the electrolyte concentration in the range of 5–100 g·dm^{-3} does not influence the change in the duration of film growth.

Bibliography:

1. Tomashov N. D., Altovsky R. M., Chernova G. P. Passivity and corrosion resistance of titanium and its alloys. *J. Electrochem. Soc.* 1961. Vol. 108. P. 113–119.

2. Alvesa A. C., Wenger F., Ponthiaux P., Celis J.-P., Pintoa A. M., Rocha L. A., Fernandes J. C. S. Corrosion mechanisms in titanium oxide-based films produced by anodic treatment. *Electrochem. Acta*. 2017. Vol. 234. P. 16–27.

3. Sanchez-Martinez X. R. Development and use of titanium alloys for biomedical and orthopedic applications. *Undergraduate Research in MSE*. 2020. Vol. 1. P. 36–39.

4. Siti Nur Hazwani M. R., Lim L. X., Lockman Z., Zuhailawati H. Fabrication of titanium-based alloys with bioactive surface oxide layer as biomedical implants: Opportunity and challenges. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022. Vol. 2. P. 1–44.

5. Pouilleau J., Devilliers D., Garrido F., Durand-Vidal S., Mahéa E. Structure and composition of passive titanium oxide films. *Mat. Sci. Eng.: B*. 1997. Vol. 47. P. 235–243.

6. Liu W., Liu S., Wang L. Surface modification of biomedical titanium alloy: micromorphology, microstructure evolution and biomedical applications. *Coatings*. 2019. Vol. 9. P. 249.

7. Ma K., Zhang R., Sun J., Liu C. Oxidation mechanism of biomedical titanium alloy surface and experiment. *Int. J. Corr*. 2020. Vol. 2020. P. 1678615.

8. Rinner M., Gerlach J., Ensinger W. Formation of titanium oxide films on titanium and Ti6Al4V by O2-plasma immersion ion implantation. *Surf. Coat. Techn*. 2000, Vol. 132. P. 111–116.

9. Sarvadii S. Y., Gatin A. K., Kharitonov V. A., Dokhlikova N. V., Ozerin S. A., Grishin M. V., Shub B. R. Oxidation of thin titanium films: determination of the chemical composition of the oxide and the oxygen diffusion factor. *Crystals*. 2020. Vol. 10. P. 117.

10. Jarosz M., Zaraska L., Kozieł M., Simka W., Sulka G. D. Electrochemical oxidation of Ti15Mo alloy – the tmpact of anodization parameters on surface morphology of nanostructured oxide layers. *Nanomaterials*. 2020. Vol. 11. P. 68.

11. Ivashchenko M., Smirnova O., Kyselova S., Avina S., Sincheskul A., Pilipenko A. Establishing the patterns in the formation of films on the alloy Ti6Al4V in carbonic acid solutions. *EEJET*. 2018. Vol. 5. P. 21–26.

12. Pilipenko A., Maizelis A., Pancheva H., Zhelavska Y. Electrochemical oxidation of VT6 titanium alloy in oxalic acid solutions. *Chem. Chem. Technol*. 2020. Vol. 14. P. 221–226.

13. Aladjem A. Anodic oxidation of titanium and its alloys. *J. Mat. Sci*. 1973. Vol. 8. P. 688–704.

Саввова О.В., Зайцева І.С., Смірнова О.Л., Воронов Г.К., Фесенко О.І., Пилипенко О.І.

ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ОКСИДУВАННЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti6Al4V У РОЗЧИНАХ ЯБЛУЧНОЇ КИСЛОТИ

Наведені результати дослідження впливу параметрів електролізу на процес окиснення титанового сплаву Ti6Al4V у розчинах яблучної кислоти. Показано, що характер формуючих залежностей визначається значенням використаної густини струму. Показано, що для формування оксидних плівок необхідно використовувати анодну густину струму не меншу, ніж 0,5 А·дм$^{-2}$. За менших густин струму плівка не утворюється і залежність напруги на комірці від часу електролізу має складну форму внаслідок протікання паралельних процесів розчинення плівки та утворення проміжних оксидів. При густині струму більше за 0,5 А·дм$^{-2}$ отримані на сплаві формувальні залежності мають вигляд прямих ліній, що свідчить про формування суцільних оксидних плівок бар'єрного типу з хорошими пасивуючими властивостями. Швидкість росту оксиду в цих умовах прямо пропорційна використаному значенню j_a, що свідчить про те, що весь використаний струм витрачається на утворення діоксиду титану, який формує пасивний шар. Досліджений вплив кінцевої напруги на комірці, густини струму та концентрації електроліту на час досягнення максимальної товщини оксидної плівки на сплаві. Вплив величини кінцевої напруги на комірці проявляється у збільшенні тривалості електролізу, що відповідає більшій товщині плівки. Цей ефект обумовлений тим, що оксид утворюється в умовах постійного градієнта потенціалу в плівці. Гранична товщина оксиду буде збільшуватися прямо пропорційно збільшенню напруги комірки, оскільки збільшення V призводить до того, що градієнт потенціалу в плівці зберігається постійним протягом більш тривалого часу. Результатом електрохімічного окиснення сплаву Ti6Al4V у розчинах яблучної кислоти при густині струму вище 0,5 А·дм$^{-2}$ є утворення інтерференційно-забарвлених оксидних плівок з хорошою адгезією до поверхні металу. Колір плівки залежить від кінцевого значення V на комірці. Граничні товщина і колір оксидної плівки визначаються напругою формування і не залежать від інших параметрів електролізу.

Ключові слова: *титан, формувальна залежність, оксидна плівка, анодне окислення, пасивність, електричний опір, бар'єрний шар.*

УДК 676.166
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/36

Трембус І.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гондовська А.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Черьопкіна Р.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

БЕЗХЛОРМІСТКЕ ВИБІЛЮВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ОРГАНОСОЛЬВЕНТНОЇ СОЛОМ'ЯНОЇ ЦЕЛЮЛОЗИ

Показано можливість одержання солом'яних волокнистих напівфабрикатів органосольвентним способом делігніфікації стебел пшеничної на основі суміші мурашиної та оцтової кислот. Запропонована технологія дозволяє отримати целюлозу з високими показниками якості: виходом 51,7 %, вмістом залишкового лігніну 5,2 %, розривною довжиною 3600 м, опором роздиранню 260 мН та опором продавлюванню 261 кПа. Проведено вибілювання FORMACELL солом'яної целюлози без використання хлору та хлормістких реагентів. Вивчено вплив витрат пероксиду водню на показники якості солом'яних волокнистих напівфабрикатів. Експериментально доведено, що для отримання високого ефекту білості органосольвентної целюлози необхідно проводити дві стадії пероксидного вибілювання. Показано, що вибілювання за схемою Q-П$_1$-П$_2$-К дозволило отримати целюлозу білістю 78 %. Наведено лігнін-вуглеводневу діаграму для порівняння ефективності різних процесів делігніфікації січки пшеничної соломи. Встановлено, що вибілена солом`яна целюлоза має високі паперотворні властивості. Експериментально встановлено, що за використання 75 % вибіленої FORMACELL солом'яної целюлози у композиції з вибіленою сульфатною хвойною целюлозою виготовлено писальний папір марки А № 1. Папір для гофрування марки Б-0 може бути одержаний за використання 25 % солом'яної органосольвентної целюлози у композиції з вторинним волокном. Використання волокнистих напівфабрикатів із січки пшеничної соломи у виробництві паперової продукції призводить до підвищення економічності виробництва внаслідок меншої їх собівартості та зниження енерговитрат на їх розмелювання на 25–30 %. Встановлено, що досліджена технологія отримання вибіленої солом'яної целюлози характеризується високою вибірковістю і рекомендується для промислового впровадження на целюлозних підприємствах.

Ключові слова: *пшенична солома, целюлоза, вибілювання, пероксид водню, лігнін-вуглеводна діаграма, писальний папір, папір для гофрування.*

Постановка проблеми. Вибілювання целюлози є важливим технологічним процесом, що дозволяє отримувати продукцію з необхідними показниками якості. Все більше жорсткі стандарти охорони навколишнього середовища вимагають розробки та впровадження сучасних технологій вибілювання рослинних волокон. Тому однією з проблем сучасної целюлозно-паперової промисловості (ЦПП) є розробка екологічно чистих технологій вибілювання волокнистих напівфабрикатів (ВНФ).

Використання молекулярного хлору і його сполук супроводжується утворенням високотоксичних хлорорганічних сполук: хлорфенолів, діоксинів, фуранів [1]. В сучасних схемах вибілювання все більше застосовують кисень, пероксид водню, озон [2–3]. Перспективним напрямком є використання пероксокислот (надкислот) і ферментів (ензимів). Гіпохлорити як і молекулярний хлор мають тенденцію до виключення з процесу вибілювання целюлози [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування недеревної рослинної сировини (НДРС) і відходів сільського господарства для отримання волокнистих напівфабрикатів пов'язане з розробленням сучасних технологій делігніфікації, які дозволяють поєднати переваги традиційних способів варіння з сучасними

вимогами зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище [5]. Вченими досліджено ряд органосольвентних варінь НДРС, зокрема стебел пшеничної соломи, такими способами як ASAM, ASAE, MILOX та інші [6]. Головною перепоною практичному їх застосуванню є використання спиртів та надоцтової кислоти, які мають високу вартість [7]. Перспективними, на сьогодні, є технології органосольвентних варінь рослинної сировини розчинами мурашиної та оцтової кислоти, так званий FORMACELL спосіб варіння.

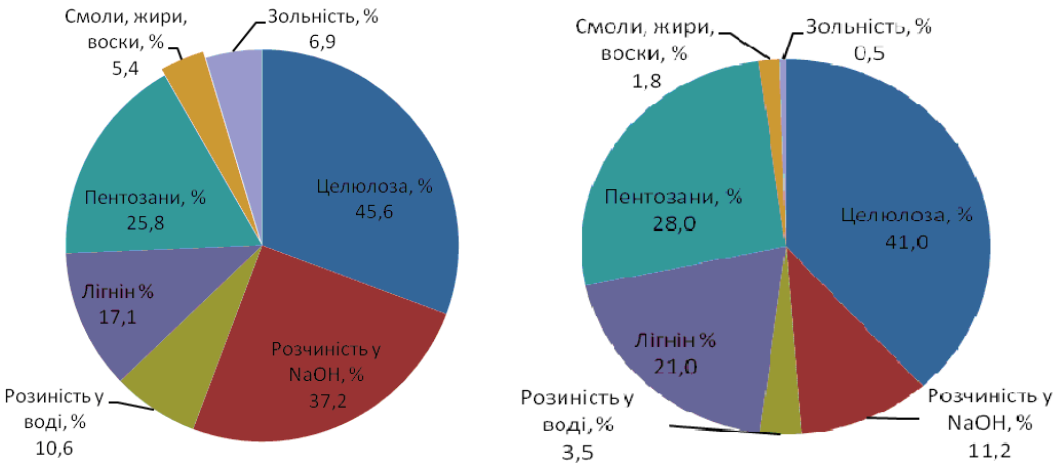
Целюлоза, одержана із сільськогосподарських рослин та інших представників недеревної рослинної сировини (насамперед, пшеничної соломи), має ряд особливостей, які потрібно врахувати в процесі її вибілювання. Для вибілювання недеревних целюлоз зі ступенем делігніфікації 12–18 од. Каппа використовують гіпохлоритне вибілювання з витратою хлору 4 – 5% від маси абсолютно сухої целюлози (абс. сух. целюлози), що дозволяє одержати вибілену целюлозу з показником білості до 75% [8]. Але слід зазначити, що за такого вибілювання відбувається значне зниження в'язкості і показників механічної міцності недеревної целюлози (на 30–40 %), а також застосування відповідного процесу призводить до великих хімічних та механічних втрат волокна (8–10 %) [9].

Вибілювання органосольвентної солом'яної целюлози з вмістом залишкового лігніну 2,5–5,0 % від маси абс. сух. сировини та їх білістю 37–42% пропонується проводити з використанням безхлорвмістких реагентів, наприклад, пероксиду водню [10].

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є визначення оптимальних умов пероксидного вибілювання солом'яної органосольвентної целюлози та використання її у композиції масових видів паперу.

Виклад основного матеріалу дослідження. В роботі використано стебла пшеничної соломи (***лат. Triticum aestivum L.***). Стебла попередньо сортувалися і подрібнювалися до розмірів 15–20 мм і зберігалися в ексикаторі для підтримання постійної вологи та хімічного складу. Хімічний склад рослинної сировини визначено у відповідності до існуючих стандартів TAPPI для різних компонентів, а саме: Т-222 – для лігніну, Т-257 для речовин, що екстрагуються гарячою водою, Т-212 для речовин, що екстрагуються 1% NaOH, Т-204 – для речовин, що екстрагуються спирто-бензольним розчином, Т-211 – для визначення зольності (рис. 1).

За хімічним складом стебла пшеничної соломи наближаються до деревини листяних порід. При цьому за приблизно однакового вмісту вуглеводнів в пшеничній соломі міститься значно менше лігніну, але значно більше мінеральних речовин, ніж у деревині. Стебла пшеничної соломи містять менш однорідні волокна у порівнянні з деревиною. Варто зазначити, що стебла відходів сільського господарства (злакових культур) захищенні епідермісом, який складається з мертвих пласких лусчатих клітин із зубчатими краями. Також, до складу цих рослин входять луб'яні волокна до 50%, середня довжина яких становить 1,0–1,5 мм, це найбільш цінні волокна для целюлозно-папрової промисловості. Однак в однорічних рослинах міститься до 50 % менш



а) б)

Рис. 1. Хімічний склад стебел пшеничної соломи (а) та берези (б)

цінних з погляду паперового виробництва коротких клітин покривного шару, паренхімних, судинних клітин, що вимагає особливого підходу до вибору технології одержання з них волокнистих напівфабрикатів.

Процес делігніфікації січки пшеничної соломи проводили способом FORMACELL. Варильний розчин складався з суміші органічних кислот (CHCOOH/CH_3COOH) за їх співвідношення 70:30 об'ємних %. Гідромодуль варіння (ГМ) становив 10:1, температура 90±2°С, тривалість 210 хв, в якості каталізатора процесу використовували $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ в кількості 4% від маси абс. сух. сировини.

В роботі вивчено вплив витрат вибілювального реагенту – пероксиду водню на показник білості солом'яної FORMACEL целюлози. Вибілювання H_2O_2 проводили за його витрат від 1 до 9%. Вибілювання органосольвентних волокнистих напівфабрикатів із стебел пшеничної соломи проводили за наступною схемою: хелатуюча обробка (Q) – вибілювання пероксидом водню у дві стадії ($П_1$ і $П_2$) – кислотування (К). Першу стадію вибілювання – хелатуючу обробку целюлози проводили розчином трилону Б з його витратою 0,2 % від маси абс. сух. целюлози, тривалістю 60 хв. за температури 50 ^{0}С. Витрата H_2O_2 становила 7 % від маси абс. сух. целюлози (відповідно 4 і 3 % на першій і другій стадіях), температура вибілювання становила 90 ^{0}С, тривалість 60–80 хв., pH = 9 – 10 з додаванням в масу для створення необхідного значення pH розчинів $MgSO_4$, NaOH та $Na_2S_iO_3$ безпосередньо перед вибілюванням. Кислотування проводили сірчистою кислотою за витрати SO_2 – 0,5 % від маси абс. сух. целюлози, тривалістю 60 хв. за кімнатної температури. Кожна стадія вибілювання целюлози закінчувалася її промиванням дистильованою водою до нейтральної реакції.

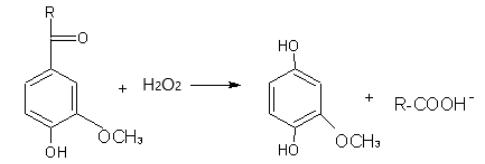
Розмелювання ВНФ і виготовлення лабораторних зразків писального паперу та паперу для гофрування, проводили у відповідності до методик TAPPI [11].

Для проведення дослідження використовували солом'яну целлюлозу, одержану FORMACEL способом делігніфікації з білістю 36% та наступними показниками якості: вихід 51,7%, вміст залишкового лігніну 5,2%, розривна довжина 3600 м, опір роздиранню 260 мН, опір продавлюванню 261 кПа.

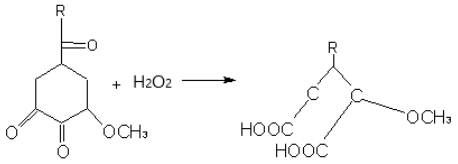
У водневому розчині пероксид водню гідролізується з утворенням іонів гідроксонію і пероксид іонів:

$$H_2O_2 + H_2O \rightarrow H_3O^+ + HO_2^- \quad (1)$$

Саме пероксид іон (HO_2^-) діє як нуклеофільний вибілювальний реагент, який руйнує хроморфні групи лігніну та інші компоненти технічної целюлози. Для отримання високого ефекту вибілювання необхідно збільшувати концентрацію HO_2^-:



(2)



Тому на першому етапі дослідження вивчали вплив витрат пероксиду водню на показники білості солом'яної органосольвентної целюлози (рис. 2).

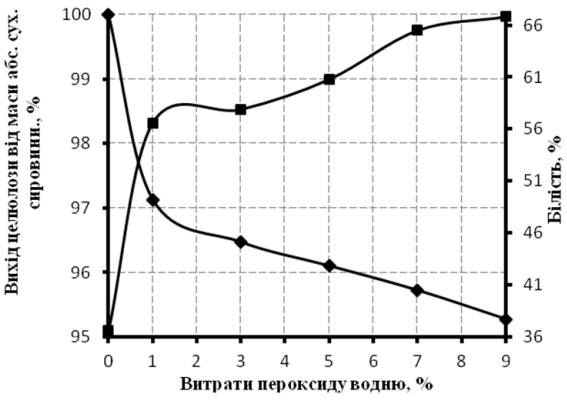


Рис. 2. Залежність показників якості целюлози від витрат пероксиду водню: -♦- вихід целюлози; -■- – білість

Отримані результати (рис. 2) свідчать, що зі збільшенням витрат пероксиду водню білість закономірно зростає, за рахунок модифікації хроморфних груп лігніну під дією HO_2^-. Найбільш ефективне зростання білості спостерігається за витрат H_2O_2 – 7% від маси абс. сух. целюлози.

Слід відмітити, що вихід вибіленої солом'яної целюлози по відношенню до невибіленої практично не змінюється, за виключенням втрат, за рахунок часткового вимивання волокна при промиванні целюлози на сітці. Не високі втрати целюлози пояснюються мінімальною деструк-

цією вуглеводневих компонентів рослинної сировини за пероксидного вибілювання (рис. 2). Основні реакції при використанні H_2O_2 спрямовані на окислення використання хромофорних груп лігніну і екстрактивних речовин, за рахунок чого білість целюлози зростає без значного зниження її виходу, тому що кінцеві продукти цих реакцій не переходять у розчинний стан [12, 13].

Для вибілювання FORMACELL солом'яної целюлози використовували схему Q-$П_1$-$П_2$-К з витратами H_2O_2 на першій стадії 4%, на другій – 3% від маси абс. сух. целюлози. Вибір даної схеми обумовлений тим, що пероксид водню забруднений солями металів (заліза, міді, срібла, хрому, вольфрамату, ванадію, молібдену, а також металів платинової групи), тому може відбутися швидке гомогенне розщеплення реагенту на воду і кисень. Процес розщеплення відбувається за ланцюговою реакцією, в якій іони металу послідовно окислюються і відновлюються. Для мінімізації процесу розщеплення проводять обробку невибіленої целюлози комплексонами, наприклад трилоном Б. Позитивний вплив обробки трилоном Б пояснюється утворенням комплексів з катіонами перехідних металів, які запобігають розкладанню пероксиду водню і більш ефективній деструкції залишкового лігніну. В результаті, застосування даної схеми вибілювання Q-$П_1$-$П_2$-К вдалося досягти білості отриманої FORMACELL солом'яної целюлози на рівні 78%.

Для порівняння ефективності різних процесів делігніфікації січки пшеничної соломи на рис. 3 наведено діаграму, яка характеризує залежність виходу одержаного волокнистого напівфабрикату від вмісту в ньому залишкового лігніну. Похила лінія «ідеальної делігніфікації» характеризує максимальний вміст полісахаридів рослинної сировини для певного вмісту залишкового лігніну у волокнистому напівфабрикаті. Тому, чим ближче лінія конкретного процесу делігніфікації для певного залишкового лігніну, тим більший вихід ВНФ за рахунок збереження, перш за все, полісахаридів (целюлози і геміцелюлози) [14].

Із графіка можна зробити висновок про те, що за наближенням до лінії «ідеальної лінії делігніфікації», тобто за збільшенням ефективності одержання із стебел пшеничної соломи ВНФ різними способами делігніфікації, їх можна розташувати у порядку зростання в наступній послідовності: оцтове варіння-естерне варіння-Na-FORMACELL-нейтрально-сульфітна-FORMACELL + $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$.

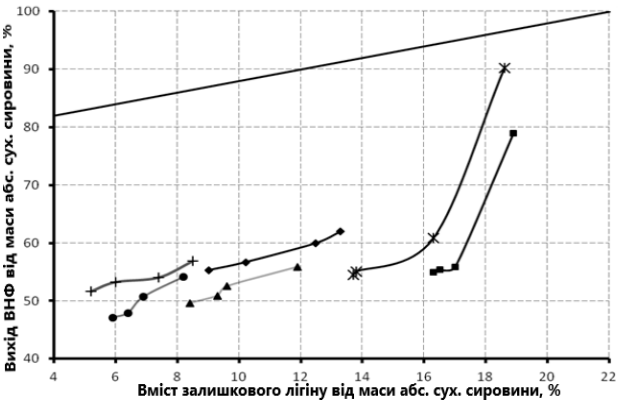


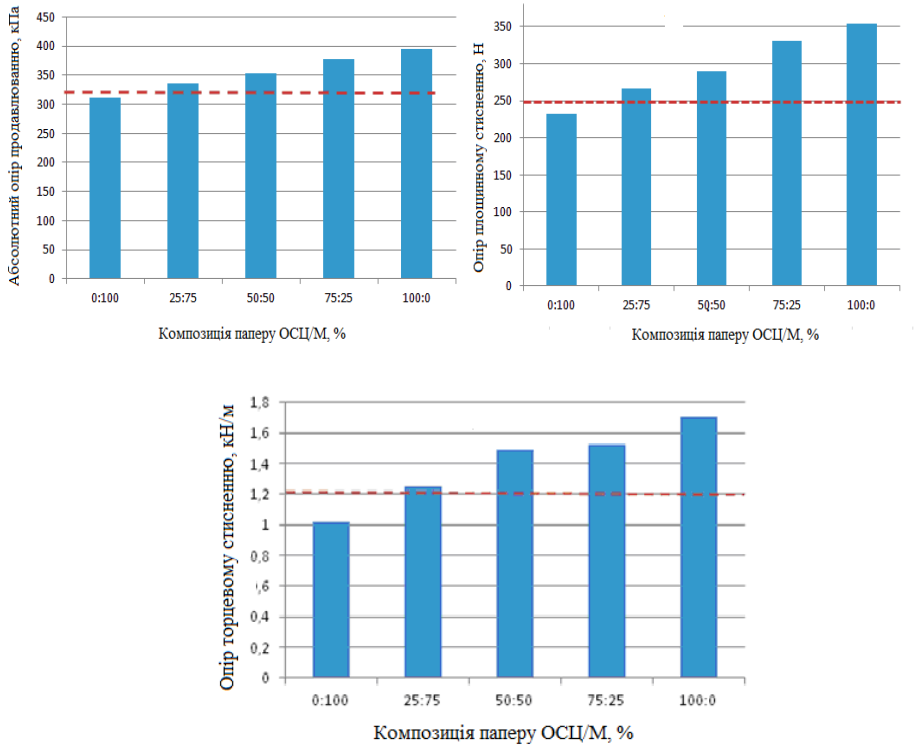
Рис. 3. Залежність виходу ВНФ із стебел пшеничної соломи, одержаних різними способами делігніфікації від вмісту залишкового лігніну: -▲- Na [15]; -■- оцтове варіння [15]; -*- естерне варіння[15]; -♦- Formacell; -●- нейтрально-сульфітна [15]; -+- Formacell + $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$

Волокнисті напівфабрикати із відходів недеревної рослинної сировини знаходять широке застосування в композиції різних видів картонно-паперової продукції [15–16]. В роботі проведено дослідження використання органосольвентних солом'яних ВНФ в композиції найбільш масових видів картонно-паперової продукції, а саме писального пареру та паперу для гофрування.

Лабораторні зразки паперу для гофрування виготовлялися різного композиційного складу (невибілена органосольвентна солом'яна целюлоза та макулатура марки МС-5Б), масою 112 г/м^2, ступінь млива ВНФ становив 40±2°ШР. Для досягнення необхідних показників якості у волокнисту масу вводили 1,5% білого каніфольного клею та 2% сірчанокислого алюмінію від маси абс. сух. целюлози. Результати досліджень наведено на рис. 4.

Отриманні результати свідчать проте, що папір для гофрування з волокнистою композицією, яка складається з 25% солом'яної невибіленої целюлози та 75% макулатури, за своїми показниками якості відповідає вимогам ДСТУ 7798:2015 паперу для гофрування марки Б-0. Використання солом'яних волокнистих напівфабрикатів у композиції з макулатурою дозволяє покращити механічні показники паперу для гофрування та здешевити кінцевий продукт у порівнянні з використанням деревної целюлози.

Зразки писального паперу масою 70 г/м^2 виготовлялися з використанням вибіленої солом'яної целюлози та сульфатної хвойної вибіленої целюлози різного композиційного складу. Ступінь



ОСЦ- органосольвентна солом'яна целюлоза;

М – макулатура марки МС-5Б.

Рис. 4. Фізико-механічні показники паперу для гофрування різного композиційного складу

Таблиця 1

Вплив вмісту вибіленої органосольвентної солом'яної целюлози в композиції волокнистої маси на фізико-механічні показники писального паперу

Композиція паперу (ОСЦ/Са), %	Маса 1 м², г	Розривна довжина, м	Ступінь проклеювання, мм	Білість, %
0:100	71	4160	1,5	78
25:75	72	3760	1,5	73,5
50:50	70	4040	1,5	75,3
75:25	72	3820	1,5	78,1
100:0	71	3930	1,5	78,4
Вимоги ГОСТ 18510-87	70 ± 3	не менше 2700	1,2 – 1,6	77 – 80

ОСЦ – органосольвентна солом`яна целюлоза;

Са – сульфатна вибілена хвойна целюлоза.

млива ВНФ становить 35±2 °ШР, у волокнисту масу додавали 2,0% каолінової суспензії, 3% білого каніфольного клею та 4,5% сірчанокислого алюмінію від маси абс. сух. волокна. Показники якості паперу наведено в табл. 1.

Використання 75 % вибіленої FORMACELL солом'яної целюлози у складі паперу відповідає нормативним показникам якості для писального паперу марки А №1. Запропонована технологія одержання писального паперу суттєво зменшує собівартість готової продукції.

Висновки. В результаті проведених експериментальних досліджень запропоновано безхлормістку технологію вибілювання органосольвентної солом'яної целюлози. Запропоновано лігнін-вуглеводну діаграму. Показано, що зі збільшенням ефективності видалення лігніну із стебел пшеничної соломи способи варіння, які

розглядалися в роботі розташовуються у наступний ряд: оцтове варіння-естерне варіння-Na-FORMACELL-нейтрально-сульфітна-FORMACELL + $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$. Встановлено паперотворні властивості органосольвентної солом'яної целюлози та експериментально обґрунтовано композиційний склад паперу для гофрування та писального паперу з використанням солом'яної целюлози, показники якості яких задовольняють вимогам чинних стандартів.

Список літератури:

1. Barbash V., Trembus I., Nagorna J. Pulp obtaining from corn stalks. *Chemistry and Chemical Technology.* 2012. Vol. 6, No. 1. P. 83–87.

2. Oral J., Sikula J., Puchyr R., Hajny Z., Stehlik P., Bebar L. Processing of waste from pulp and paper plant. *Journal of Cleaner Production.* 2005. Vol. 13, No. 5. P. 509–515.

3. Rumpf J., Do X., Burger R., Monakhova Y., Schulze M. Extraction of high-purity lignins via catalyst-free organosolv pulping from low-input crops. *Biomacromolecules.* 2020. Vol. 11, No. 5. P. 1929–1942.

4. Simenez L., Rodringez A., Resez I., Calero A. M., Ferrer J. I. Ethylene glycol/soda organosolv pulping of olive tree rimmings. *Wood and Fiber Science.* 2004. Vol. 36, No. 3. P. 423–431.

5. Barbash V., Trembus I., Shevchenko V. Ammonia-sulfite-ethanol pulp from wheat straw. *Cellulose Chemistry Technology*. 2014. Vol. 48, No.3. P. 345–353.

6. Barbash V., Trembus I,. Sokolovska N. Performic pulp from wheat straw. *Cellulose Chemistry and Technology.* 2018. Vol. 52, No.7–8. P. 673–680.

7. Saberikhah E., Rovshandeh J. M., Rezayati-Charani P. Organosolv pulping of wheat straw by glycerol. *Cellulose Chemistry and Technology*. 2011. Vol. 45, No. 1–2. P. 67–75.

8. Liao J.J., Latif N. H. A., Trache D., Brosse N., Hussin M. H. Current advancement on the isolation, characterization and application of lignin. *Int. J. Biol. Macromol*. 2020. Vol. 162. P. 985–1024.

9. Massicotte M., Emily D. Cranston. Comparison of Techniques for Drying Cellulose Nanocrystal Pickering Emulsions into Oil Powders. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering.* 2022. Vol. 10, No. 45. P. 14914–14925.

10. David K. Okot, Paul E. Bilsborrow, Anh N. Phan. Thermo-chemical behavior of maize cob and bean straw briquettes. *Energy Conversion and Management: X*. 2022. Vol. 16. P. 8.

11. TAPPI test methods. *Tappi Press.* Atlanta, Georgia. 2004.

12. Li Z., Court G. D., Belliveau R., Crowell M., Murphy R., Gibon A., Wajer M., Branch B., Ni Y. Using magnesium hydroxide $Mg(OH)_2$ as the alkali source in peroxide bleaching at Iriving Paper. *Pulp and Paper Canada*. 2005. Vol. 106, No 6. P. 24–28.

13. Барбаш В. А., Нагорна Ю. М. Вплив попередньої обробки волокон льону на показники целюлози. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. № 4(6). с. 4–8.

14. Trembus I., Trophimchuk J., Deykun I., Cheropkina R.. The catalytic delignification of sunflower stalks with hydrogen peroxide in the environment of acetic acid. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* 2021. Vol. 56, No. 2. P. 296–301.

15. Trembus I., Halysh V. Wheat straw solvolysis delignification. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* 2019. Vol. 54, No. 5. P. 986–992.

16. Li M., Wang L. J., Li D., Cheng Y. L., Adhikari B. Preparation and characterization of cellulose nanofibers from de-pectinated sugar beet pulp. *Carbohydrate Polymers*. 2014. Vol. 102. P. 136–143.

Trembus I.V., Hondovska A.S., Cheropkina R.I. CHLORINE-FREE BLEACHING AND USE OF ORGANOSOLVENT STRAW CELLULOSE

The possibility of obtaining straw fibrous semi-finished products by the organosolvent method of delignification of wheat stalks based on a mixture of formic and acetic acids is shown. The proposed technology makes it possible to obtain pulp with high quality indicators: a yield of 51.7%, a residual lignin content of 5.2%, a breaking length of 3600 m, a tear resistance of 260 mN and a compressive strength of 261 kPa. Bleaching of FORMACELL straw cellulose was carried out without the use of chlorine and chlorine-containing reagents. The effect of hydrogen peroxide consumption on the quality indicators of straw fibrous semi-finished products was studied. It has been experimentally proven that in order to obtain a high whiteness effect of organosolvent cellulose, it is necessary to carry out two stages of peroxide bleaching. It was shown that bleaching according to the Q-P_1-P_2-K scheme made it possible to obtain cellulose with a brightness of 78%. A lignin-hydrocarbon diagram is presented to compare the effectiveness of various processes of wheat straw chaff delignification. It was established that bleached straw cellulose has high paper-making properties. The experimentally established that by using 75% of bleached FORMACELL straw cellulose in a composition with bleached sulfate coniferous cellulose, of brand A №1 writing paper was produced. The corrugated cardboard

paper B-0 can be obtained using 25% organosolvent cellulose in a composition with secondary fiber. The use of fibrous semi-finished products from wheat straw in the production of paper products leads to an increase in the efficiency of production due to their lower cost and a reduction in energy consumption for grinding them by 25-30%. The established that the researched technology for obtaining bleached straw cellulose is characterized by high selectivity and is recommended for industrial implementation at pulp enterprises.

Key words: *wheat straw, cellulose, bleaching, hydrogen peroxide, lignin-carbohydrate diagram, writing paper, corrugated cardboard paper.*

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 633.1
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/37

Бажай-Жежерун С.А.
Національний університет харчових технологій

Береза-Кіндзерська Л.В.
Національний університет харчових технологій

ПРИРОДНІ ХАРЧОВІ СОРБЕНТИ ЗЕРНА

Харчові волокна є важливою складовою раціону людини. Ці нутрієнти є природними харчовими сорбентами, вони здійснюють детоксикацію організму, сприяють виведенню радіонуклідів та важких металів, позитивно впливають на діяльність шлунково-кишкового тракту, знижують рівень холестерину у крові.

Зернові культури характеризуються значним вмістом харчових волокон, зокрема клітковини, геміцелюлоз, лігніну тощо.

Нами досліджено вміст харчових волокон у нативному та звільненому від оболонок зерні найпоширеніших злакових культур: пшениці, ячменю, тритикале, вівса, кукурудзи. Визначено, що вміст клітковини у зазначених нативних зернових культурах складає 2…9%; пектинових речовин – 0,8…2,5%, залежно від культури. Очищення зерна від оболонок, шліфування та полірування суттєво знижує вміст природних харчових сорбентів у зерні.

Визначено вміст харчових волокон у ядрі та оболонках зерна проса, чумизи, пальчастого проса, пайзи, могару. Встановлено, що найвищим вмістом харчових волокон характеризуються оболонки зерна чумизи та пайзи – відповідно 71,8 та 75,8%. У ядрі просяних культур найбільша кількість харчових волокон міститься у пайзі та могарі.

Проаналізовано вплив температурного фактора на вологоутримуючу здатність харчових волокон зерна пшениці, ячменю, вівса, тритикале та кукурудзи. Водоутримувальна здатність харчових волокон досліджуваних зразків зерна становить 2,5…5,6 г води/г харчових волокон, залежно від культури. Найвищою є водоутримувальна здатність зерна вівса. При підвищенні температури вологоутримуюча здатність значно зростає.

Визначено, що за температури 20 °С водоутримувальна здатність харчових волокон просяних культур: проса, чумизи, пальчастого проса (дагуси), пайзи та могару становить 2–3 г води/г харчових волокон. При підвищенні температури до 36 °С водоутримувальна здатність зростає і складає 3,0…4,5 г води/г харчових волокон.

Харчові волокна злакових та просяних культур за водоутримувальною здатністю відносяться до групи середньоводозв'язуючих.

Використання харчових волокон злакових та просяних культур у виробництві продуктів оздоровчого та профілактичного призначення є перспективним напрямом підвищення їх харчової цінності.

Ключові слова: *харчові волокна, природні харчові сорбенти, зерно, злакові, просяні культури, водоутримувальна здатність.*

Постановка проблеми. Відомо, що об'єктивною потребою для організму людини є надходження достатньої кількості рослинних волокон, які характеризуються вираженими сорбційними властивостями щодо екзо- та ендотоксинів. Поряд з овочевими та фруктовими видами сировини, зерно та продукти його перероблення є найбільш цінними за вмістом біологічно активних сполук. Зернові культури є джерелом крохмалю, білкових речовин вітамінів, мінеральних речовин, а також природних ентеросорбентів – харчових волокон. Полісахариди клітковина, геміцелюлози, пектинові речовини, лігнін є основними компонентами харчових волокон.

Природні харчові сорбенти до яких відносять зокрема, харчові волокна, відіграють важливу роль у відновленні та підтриманні на нормальному рівні здоров'я людини. Важливою перевагою при-

родних сорбентів на основі рослинної сировини є можливість їх тривалого використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Харчові волокна, які включають комплекс структурних та не структурних полісахаридів, мають широкий спектр фізіологічного впливу на організм людини, зокрема, здійснюють детоксикацію організму, поліпшують діяльності шлунково-кишкового тракту, мають пребіотичні властивості тощо [1].

Харчові волокна здатні знижувати рівень холестерину у крові та виводити з організму продукти його метаболізму, радіонукліди та важкі метали, вирівнювати рівень глюкози в крові, стимулювати перистальтику кишечника, мають обволікаючі властивості [2]. Відмінна риса їх у стійкості до гліколітичних ферментів [3]. У товстому кишечнику харчові волокна частково гідролізуються наявною мікрофлорою [4]

Хімічний та компонентний склад харчових волокон може залежати від видових особливостей рослини, типу тканини та її фізіологічного стану. До харчових волокон відносять такі поліглікани, як целюлоза, геміцелюлози, камеді, пектин, слизи, карагінани та альгінові кислоти тощо. Вони можуть бути як гомогенні, так і гетерогенні за молекулярним складом, мати різні функціональні групи (метоксильні, гідроксильні, ацетильні, амідні, карбоксильні), мати лінійну, або розгалужену будову ланцюга, перебувати у різних конформаціях [5, 6]. Зазначені особливості будови впливають на їх фізико-хімічні властивості, зокрема, сорбційну ємність та водоутримувальну здатність.

За водоутримувальною здатністю харчові волокна поділяють на три види, в яких найбільш міцні волокна здатні зв'язати більше ніж 8 г води на 1 г харчових волокон [7].

Харчові волокна знижують ризик розвитку пухлин верхніх травних і дихальних шляхів, а також регулюють мікробіоценоз у кишківнику [8].

Структурні компоненти харчових волокон, зокрема пектини, містять карбоксильні групи галактуронової кислоти що надає їм сорбційно-хімічних властивостей зв'язувати метали та утворювати нерозчинні комплекси, це сприяє виведенню шкідливих речовин з організму людини, пектини мають радіозахисну дію [9, 10].

Зернові культури є джерелом харчових волокон, які у значній кількості містяться в насіннєвих та плодових оболонках, алейроновому шарі зерна пшениці та жита; квіткових та насіннєвих оболонках зерна проса, вівса, ячменю; плодових оболонках гречки [11].

Харчові волокна на основі зернових культур є мають виражені сорбційні властивості. Так розроблений сорбент на основі клітковини рисової лузги рекомендовано при інтоксикаціях різної етіології, діареї, диспепсії, метеоризмі, захворюваннях кишечника [12].

У літературі відсутні дані щодо комплексної характеристики вмісту харчових волокон та їх водоутримувальної здатності у злакових та просяних культурах.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є визначення вмісту харчових волокон у зернових та просяних культурах, дослідження їх водоутримувальної здатності.

Викладення основних результатів дослідження.

Харчові волокна містяться у насіннєвих та плодових оболонках, алейроновому шарі зерна пшениці та жита; квіткових та насіннєвих оболонках зерна проса, вівса, ячменю; плодових оболонках гречки.

Нами досліджено вміст харчових волокон у нативному та звільненому від оболонок зерні найпоширеніших культур: пшениці, ячменю, тритикале, вівса, кукурудзи (табл. 1).

Клітковина – один з основних компонентів харчових волокон – є активатором травних фер-

Таблиця 1

Харчові волокна зернових культур

№	Культура	Вміст у зерні нативному,%		Вміст у зерні, звільненому від оболонок,%	
		Клітковина	Пектинові речовини	Клітковина	Пектинові речовини
1	Пшениця	2,04	1,01	1,80	0,51
2	Ячмінь	3,26	1,51	1,52	0,64
3	Тритикале	2,63	0,80	2,12	0,35
4	Овес	9,25	1,53	2,90	0,68
5	Рис	7,91	1,60	0,40	0,10
6	Кукурудза	2,25	2,52	1,85	1,02

ментів, на її поверхні відбувається їх стабілізація, що сприяє підвищенню активності ферментних систем, покращенню процесів детоксикації організму. Пектинові речовини є природними ентеросорбентами для очищення організму.

Досліджено, що вміст клітковини у зазначених нативних зернових культурах складає від 2 до 9%. Вміст пектинових речовин становить від 0,8 до 2,5%, залежно від культури. Очищення зерна від оболонок, шліфування та полірування суттєво знижує вміст природних харчових сорбентів у зерні.

Важливе значення має водоутримувальна здатність харчових волокон, яка пов'язана із ступенем їх гідрофільності та кількістю присутніх у них біополімерів; характером поверхні, пористості та розмірів частинок.

Проаналізовано вплив температурного фактора на вологоутримуючу здатність харчових волокон зерна пшениці, ячменю, вівса, тритикале та кукурудзи. Дослідження проводилися за кімнатної температури та за 36 °С, щоб максимально наблизити до умов перебування харчових волокон у шлунково-кишковому тракті організму людини. Відмічено, що при підвищенні температури вологоутримуюча здатність харчових волокон значно зростає. На рис.1. зображено показники вологоутримуючої здатності харчових волокон зерна досліджуваних зернових культур.

Нами визначено, що водоутримувальна здатність харчових волокон досліджуваних зразків зерна становить 2,5…5,6 г води/г харчових волокон, залежно від культури. Тобто харчові волокна даних зернових культур за водоутримувальною здатністю відносяться до групи середньоводозв'язуючих харчових волокон. Найвищою є водоутримувальна здатність зерна вівса.

Високі значення водоутримувальної здатності зернових культур зумовлені наявністю значної кількості целюлози. Вода, яка утримується складною системою зерна, має різний характер зв'язку з полімерами. Целюлоза та деякі види геміцелюлоз, які складають комплекс високомолекулярних вуглеводів нерозчинних харчових волокон, мають різну здатність утримувати воду. Клітинна стінка целюлозного волокна має фібрилярну структуру, що дозволяє ділити волокно на повздовжні фрагменти будь-яких розмірів, а також зв'язувати волокна між собою в єдину структуру. Целюлоза характеризується значною кількістю гідроксильних груп і розвиненою системою субмікроскопічних капілярів, що визначає її здатність поглинати і утримувати воду. Геміцелюлози відносяться до гідрофільних колоїдів, відрізняються високим ступенем набухання у воді та мають спорідненість до целюлози.

Просо відома круп'яна культура, яку здавна вирощують в Україні. З проса отримують пшоно шліфоване, відокремлюючи ядро від квіткових плівок, плодових і насіннєвих оболонок, зародка і частково від алейронового шару.

Зважаючи на високу харчову та споживчу цінність, ядро проса також використовують для отримання борошна, в пивоварінні та спиртовій тощо.

Рід проса (*Panicum*) культивують у тропіках, субтропічних та помірних зонах, він є одним з найбільш розповсюджених родів підродини просяних і включає більше 500 видів. У Державному Реєстрі сортів рослин придатних до поширення в Україні на 2016 рік занесені 25 сортів проса [13].

До просяних культур, окрім проса посівного, також відносяться чумиза, просо пальчасте (елевсіна або дагуса), пайза, могар.

Чумиза, чорний рис, головчасте просо (Setaria italica) – зернова і кормова культура.

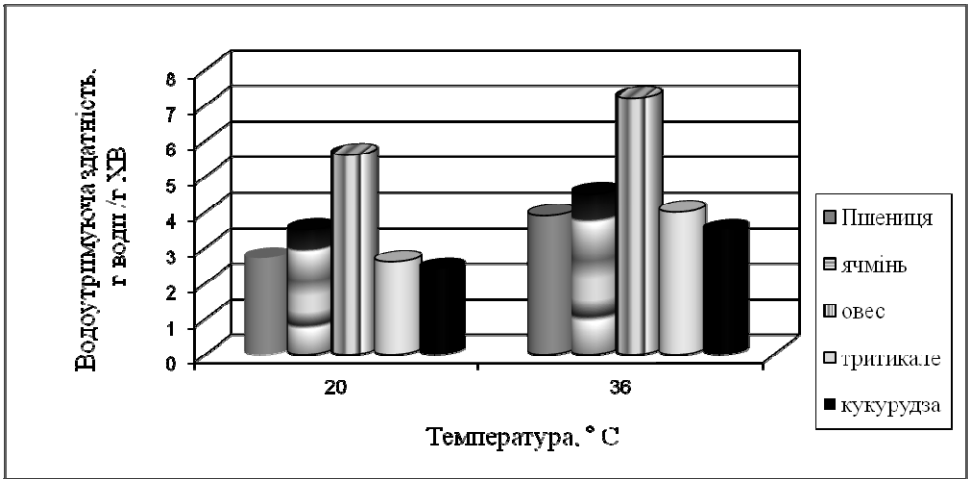


Рис. 1. Вологоутримуюча здатність харчових волокон зернових культур

Здавна вирощується в Китаї, останнім часом широко культивується в ряді Європейських та Азіатських країн. З чумизи отримують олію, борошно, крупу.

Елевсіна, дагуса, просо пальчасте (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) – посухостійка рослина, перспективна зернова і фуражна культура, яку в основному вирощують в Індії. Зерно має високу харчову цінність, його переробляють на крупу та борошно, яке використовують для приготування каш, супів, приправ, хлібців.

Могар, італійське просо (*Setaria mochariam* A.) – харчова і кормова культура. Для продовольчих цілей могар використовують як сировину для спиртової промисловості.

Пайза, японське просо (*Ehcinochloa colonum* L.) – трав'яна рослина родини злакові. Зерно та зелену масу пайзи використовують на корм худобі, після переробки зерна отримують крупу, яку застосовують у харчових цілях.

Нами визначено вміст харчових волокон у ядрі та оболонках зерна проса, чумизи, пальчастого проса, пайзи, могару (табл. 2).

Встановлено, що найвищим вмістом харчових волокон характеризується оболонка зерна чумизи та пайзи – відповідно 71,8 та 75,8%. У ядрі просяних культур найбільша кількість харчових волокон міститься у пайзі та могарі.

Досліджено вологоутримуючу здатність харчових волокон зерна просяних культур, рис. 2.

Визначено, що за температури 20 °С водоутримувальна здатність харчових волокон досліджуваних просяних культур становить 2 – 3 г води/г харчових волокон. При підвищенні температури до 36 °С водоутримувальна здатність зростає і складає від 3,0 до 4,5 г води/г харчових волокон. Тобто харчові волокна досліджених просяних культур за водоутримувальною здатністю відносяться до групи середньоводозв'язуючих харчових волокон. Найвищою є водоутримувальна здатність зерна чумизи.

Висновки. Зерно з непорушеною структурою, без відділення оболонок, а також продукти його перероблення – борошно грубого помелу, крупа, пластівці тощо є джерелом клітковини, пектинів, геміцелюлоз. Харчові волокна дослі-

Таблиця 2

Вміст харчових волокон у зерні просяних культур

№	Культура	Частка квіткових плівок, оболонок та алейронового шару,% до маси зерна	Вміст харчових волокон,%			
			ядро		оболонки зерна	
			клітковина	пектинові речовини	клітковина	пектинові речовини
1	Просо посівне	25	1,5	0,8	55,5	3,5
2	Чумиза	28	1,6	1,2	71,8	4,0
3	Просо пальчасте	13	2,1	1,0	57,7	3,8
4	Пайза	29	3,9	1,5	75,8	2,2
5	Могар	27	4,0	0,6	59,0	3,0

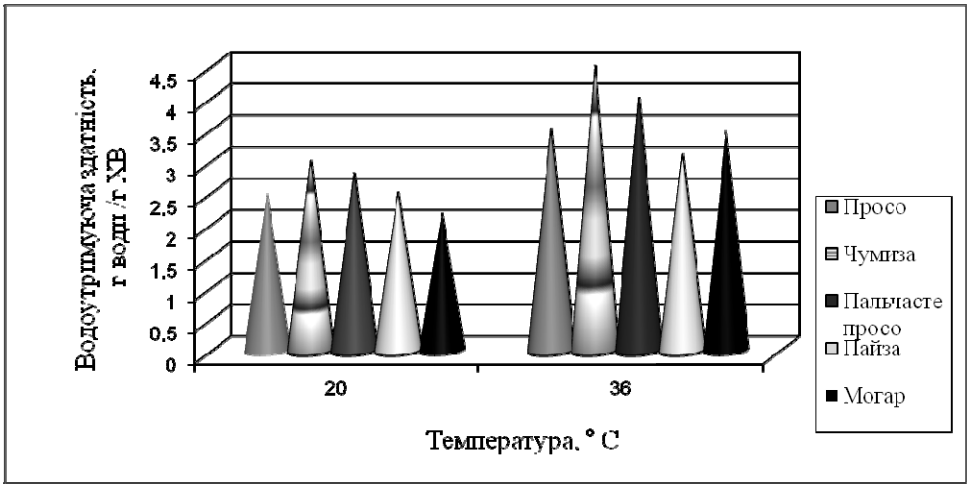


Рис. 2. Вологоутримуюча здатність харчових волокон просяних культур

джених злакових та просяних культур за водоутримувальною здатністю відносяться до групи середньоводозв'язуючих. Харчові волокна зерна є природними харчовими сорбентами, які виконують важливу фізіологічну роль а організмі людини.

Список літератури:

1. Федоренченко Л.О., Сімахіна Г.О. Технологія природних харчових сорбентів: підручник. Київ: НУХТ, 2006. 100 с.

2. Дудкин, М.С., Черно Н.К., Казанская И.С. К. : Урожай, 1988. 152 с.

3. Cheng G., Zhang X., Simmons B., Singh S. Theory, practice and prospects of X-ray and neutron scattering for lignocellulosic biomass characterization: towards understanding biomass pretreatment // Energy Environmental Science. 2015. V. 8. P. 436–455.

4. Lattimer J.M., Haub M.D. Effects of dietary fiber and its components on metabolic health // Nutrients. 2010. V.2. P. 1266–1289. doi: 10.3390/nu2121266

2. Fadaei V., Salehifar M. Some chemical and functional characteristics of dietary fiber from five fiber sources // European Journal of Experimental Biology. 2012. V. 2(3). P. 525–528.

5. Goni I., Diaz-Rubio M.E., Perez-Jimenez J., Saura-Calixto F. Towards an updated methodology for measurement of dietary fiber, including associated polyphenols, in food and beverages // Food Research International. 2009. V. 42. P. 840–846. doi: 10.1016/ j.foodres.2009.03.010

6. Daou Ch., Zhang H. Physicochemical properties and antioxidant activities of dietary fiber derived from defatted rice bran // Advance Journal of Food Science and Technology. 2011. V. 3(5). P. 339–347.

7. Ozyurt V.H., Otles S. Effect of food processing on the physicochemical properties of dietary fibre // Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria. 2016. V.15(3). P. 233–245. doi: 10.17306/J.AFS.2016.3.23

8. Tappy L. (2006), Effects of break fast cereals containing various amounts of beta-glucan fibres on plasma glucose and insulin responses in NIDDM subjects. *Diabetes Care,* 19, p. 831–834.

9. Wang R.; Li Y., Shuai X., Liang, R., Chen, J., Liu, C. (2021), Pectin/Activated carbon-based porous microsphere for Pb2+ adsorption: Characterization and adsorption behaviour. *Polymers* , 13, 2453.

10. Jandosov J., Alavijeh M., Sultakhan S., Baimenov A., Bernardo M., Sakipova Z., Azat S., Lyubchyk S., Zhylybayeva N., Naurzbayeva G., Mansurov Z., Mikhalovsky S., Berillo D. (2022), Activated Carbon/Pectin Composite Enterosorbent for Human Protection from Intoxication with Xenobiotics Pb(II) and Sodium Diclofenac. *Molecules*, 27, 2296. DOI.org/10.3390/molecules27072296

11.Осокіна Н. М., Костецька К. В.Порівняльна оцінка круп'яних властивостей зерна ярих пшениці, тритикале та ячменю. *Вісник Уманського національного університету садівництва.* 2014. № 1. С. 79–83.

12. Нуралиев М.А., Панов **С.А.,** Мырзагалиев А.М. Сравнение адсорбционных свойств пищевой клетчатки, полученной из растительного сырья. *Медицинский журнал Западного Казахстана*. 4 (56) 2017. С. 75–84.

13. Дубініна, А.А. Хімічний склад пшона із зерна проса різних сортів, районованих у Харківській області. Ленерт ХДУХТ, Харків., 2013. С. 151–158.

Bazhay-Zhezherun S.A., Bereza-Kindzerska L.V. NATURAL FOOD SORBENTS GRAIN

Dietary fibers are an important component of the human diet. These nutrients are natural food sorbents, they detoxify the body, promote the removal of radionuclides and heavy metals, have a positive effect on the activity of the gastrointestinal tract, and reduce the level of cholesterol in the blood.

Cereal crops are characterized by a significant content of dietary fibers, in particular fiber, hemicellulose, lignin, etc.

We investigated the dietary fiber content in native and dehusked grains of the most common cereal crops: wheat, barley, triticale, oats, and corn. It was determined that the fiber content in the specified native cereal crops is 2...9%; pectin substances – 0.8...2.5%, depending on the culture. Cleaning grain from shells, grinding and polishing significantly reduces the content of natural food sorbents in grain.

The content of dietary fibers in the kernel and shells of Panicum, Setaria italica, Eleusine coracana, Setaria mochariam, Ehcinochloa colonum, was determined. It was established that the shells of Setaria italica and Ehcinochloa colonum grains are characterized by the highest content of dietary fibers – 71.8 and 75.8%, respectively. In the kernel of millet crops, the largest amount of dietary fiber is contained in Ehcinochloa colonum and Setaria mochariam.

The influence of the temperature factor on the moisture-retaining capacity of dietary fibers of wheat, barley, oats, triticale and corn was analyzed. The water-retaining capacity of dietary fibers of the studied grain samples is 2.5...5.6 g of water/g of dietary fibers, depending on the culture. The water-retaining capacity of oat grain is the highest. As the temperature rises, the moisture-retaining capacity increases significantly. It

was determined that at a temperature of 20 °C, the water-retaining capacity of dietary fibers of millet crops: Panicum, Setaria italica, Eleusine coracana, Setaria mochariam, Ehcinochloa colonum is 2…3 g of water/g of dietary fiber. When the temperature rises to 36 °C, the water-retaining capacity increases and amounts to 3.0...4.5 g of water/g of dietary fiber.

Dietary fibers of cereal and millet crops belong to the group of medium water-binding in terms of their water-retaining capacity.

The use of dietary fibers of cereal and millet crops in the production of health and preventive products is a promising direction of increasing their nutritional value.

Key words: *food fibers, natural food sorbents, grain, cereal, millet crops, water-retaining capacity.*

УДК 664.694-047.44:664.641.2+635.621
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/38

Любич В.В.
Уманський національний університет садівництва

Желєзна В.В.
Уманський національний університет садівництва

Новіков В.В.
Уманський національний університет садівництва

КУЛІНАРНА ЯКІСТЬ МАКАРОНІВ З ДОБАВЛЯННЯМ РІЗНОЇ КІЛЬКОСТІ БОРОШНА ГАРБУЗОВОГО

Борошно гарбузове – продукт, який має високу кількість каротину і добре зберігається. Цей продукт – перспективна складова цілої низки продуктів харчування. Статтю присвячено вивченню добавляння різної кількості борошна гарбузового на кулінарну якість макаронів.

Показники кулінарної якості змінювались залежно від кількості борошна гарбузового. Слід відзначити, що колір макаронів до варіння змінювався від кремового без добавляння борошна гарбузового до жовтого за добавляння 15 % його борошна. Після варіння кремовий і жовтий колір макаронів не змінювався. Світло-жовтий колір після варіння змінився на світло-коричневий. При цьому макарони добре тримали форму після варіння – 7 бала. Добавляння борошна гарбузового не впливало на форму макаронів після варіння. Проте коефіцієнт розварювання зі збільшенням кількості борошна гарбузового знижувався.

Встановлено, що з підвищенням кількості борошна гарбузового споживний запах і смак макаронів знижувався. Найвищою була кулінарна оцінка за добавляння 2,5–7,5 % борошна гарбузового. Слід відзначити, що запах і смак гарбуза був відсутнім за добавляння 2,5 % борошна гарбузового. За добавляння 5,0 % борошна гарбузового смак гарбуза був відсутнім, а його запах на рівні 7,2 бала, солодкий смака гарбуза також був відсутнім. Збільшення кількості борошна гарбузового до 15,0 % забезпечувало сильний солодкий смак гарбуза – 3,1 бала.

Враховуючи високу кулінарну якість (8,2–8,9 бала) за добавляння 7,5 % борошна гарбузового, для споживачів, які надають перевагу гарбузвмісним продуктам, можна рекомендувати вищий вміст такого борошна. Отже, в технології виробництва макаронів з гарбузвмісними продуктами допустимо добавляти 2,5–5,0 % борошна гарбузового. Крім цього, можливе підвищення кількості борошна гарбузового до 7,5 %.

У технології виробництва макаронів з гарбузвмісними продуктами доцільно добавляти 2,5–5,0 % борошна гарбузового. Застосування такої кількості борошна забезпечує формування макаронів з кулінарною якістю на рівні 8,5–9,0 бала. Запах гарбуза становить 7,2 бала, смак відсутній. При цьому не відчувається солодкий смак гарбуза в макаронах.

Ключові слова: *макарони, борошно гарбузове, технологічні параметри, рецептура, кулінарна якість.*

Постановка проблеми в загальному вигляді. Рослинна сировинна містить різноманітні функціональні компоненти, такі як вітаміни, мінерали, фенольні сполуки, антиоксиданти і фітохімічні речовини [1]. Функціональні продукти збагаченні рослинною сировиною, відіграють важливу роль у здоров'ї організму. У дослідженнях [2] наголошується на важливості вживання фруктів і овочів для здоров'я, а також на технологічні перспективи їх застосування в країнах, що розвиваються. Фітохімічні речовини, що містяться в цільних зернах, фруктах та овочах, є найпоширенішими джерелами функціональних компонентів.

Поживна цінність плодів гарбуза висока, але змінюється залежно від сорту. У свіжій масі плодів загальний вміст каротиноїдів є основним фактором, що сприяє високій харчовій цінності гарбуза та коливається від 2 до 10 мг/100 г, вміст вітамінів С і Е, що становить 9–10 мг/100 г і 1,03–1,06 мг/100 г відповідно [3]. Цінними є і плоди гарбуза як джерело вітамінів B_6, К, тіаміну та рибофлавіну, а також мінералів: калію, фосфору, магнію, заліза та селену. М'якоть

гарбуза – смачна та цінна добавка для різноманітних харчових продуктів. Плоди гарбуза зазвичай переробляються для отримання соку, пасти, консервування та сушіння [4].

Сушіння є альтернативою споживанню свіжих овочів і фруктів, що дозволяє їх вживати у міжсезонний період. Це один із найпоширеніших методів консервування, і його мета видалення води з харчових продуктів. Крім забезпечення довшого терміну зберігання, це спосіб забезпечує менші потреби у просторі для зберігання та менших ємкостей для транспортування. Сушіння сільськогосподарської продукції можна проводити у закритому обладнанні (сонячні або промислові сушарки), щоб гарантувати високу якість кінцевого продукту [5].

Борошно гарбузове – натуральний продукт, який має високу харчову та біологічну цінність. До того ж науковцями [6] показано, що корисні властивості гарбуза не змінюються під дією високих температур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Макарони – популярний продукт харчування в багатьох країнах світу [7]. Споживачі віддають перевагу йому за його легкість у транспортуванні, транспортуванні, приготуванні та зберіганні. Нині макарони стали ще більш популярними завдяки своїм поживним властивостям, розглядаючись як продукт «з низьким глікемічним індексом» [8]. Оскільки макарони містять переважно крохмаль, багато досліджень намагалися покращити поживні властивості макаронів [9]. До них відносяться добавки білка, харчових волокон, вітамінів і мінералів або заміна (частково або повністю) крупки з твердих сортів пшениці нетрадиційними видами борошна. Проблема з додаванням таких волокон у звичайні макаронні вироби полягає в тому, що вони можуть небажано змінити смакові та кулінарні властивості [10]. Споживання овочів і макаронних виробів, збагачених насінням, може бути використано для створення потенційно функціональної їжі, яка може допомогти зменшити деякі хронічні захворювання [11].

М'якоть гарбуза переробляються для отримання соку, пасти, соління та сушених продуктів [12]. Гарбуз можна переробити на борошно, яке має більший термін зберігання. Гарбузове борошно використовується через його дуже бажаний смак, солодкість і насичений жовто-оранжевий колір. Повідомляється, що він використовується як доповнення до борошна зернових у хлібобулочних виробах, таких як тістечка, печиво, хліб, для приготування супів, соусів, локшини швидкого приготування та спецій, а також як природний барвник у макаронних виробах і борошняних сумішах [13].

Формування цілей статті. Метою роботи є вивчення кулінарної якості макаронів з добавлянням різної кількості борошна гарбузового.

Матеріали і методи дослідження. Експериментальну частину роботи проводили у лабораторії «Оцінювання якості зерна і продуктів його перероблення» кафедри харчових технологій Уманського національного університету садівництва.

Рецептура макаронів включала крупка – 100 г, вода – 30 $см^3$ і борошно гарбузове кількістю від 2,5 до 15,0 % з інтервалом 2,5 %. Борошно гарбузове (сорт Атлант, гарбуз великоплідний) добавляли заміною певної кількості крупки. Спочатку замішували суміш борошна з водою, а потім проводили формування макаронів за допомогою преса Unold модель 68801 (Німеччина).

Збереження форми макаронів визначали за шкалою: 9 – дуже висока, 7– висока, 5 – середня, 3 – низька, 1 – дуже низька. Запах і смак гарбуза в готовому продукті, солодкий смак макаронів визначали за шкалою: 9 – відсутній, 7 – слабкий, 5 – відчутний, 3 – сильний, 1 – дуже сильний. Запах і смак споживний: 9 – надзвичайно подобається, 8 – дуже подобається, 7 – достатньо подобається, 6 – несуттєво подобається, 5 – не подобається, 4 – несуттєво не подобається, 3 – достатньо не подобається, 2 – дуже не подобається, 1 – надзвичайно не подобається.

Математичну обробку експериментальних даних здійснювали, використовуючи пакет стандартних програм Microsoft Excel 2007 і Statistica 10.

Виклад основного матеріалу дослідження. Показники кулінарної якості змінювались залежно від кількості борошна гарбузового (табл. 1). Слід відзначити, що колір макаронів до варіння змінювався від кремового без добавляння борошна гарбузового до жовтого за добавляння 15 % його борошна. Після варіння кремовий і жовтий колір макаронів не змінювався. Світло-жовтий колір після варіння змінився на світло-коричневий. При цьому макарони добре тримали форму після варіння – 7 бала. Добавляння борошна гарбузового не впливало на форму макаронів після варіння. Проте коефіцієнт розварювання зі збільшенням кількості борошна гарбузового знижувався.

Встановлено, що з підвищенням кількості борошна гарбузового споживний запах і смак макаронів знижувався (табл. 2). Найвищою була кулінарна оцінка за добавляння 2,5–7,5 % борошна гарбузового. Слід відзначити, що запах

Таблиця 1

Кулінарна якість макаронів залежно від кількості борошна гарбузового

Варіант досліду	Колір макаронів		Збереження форми, бал	Коефіцієнт розварювання за	
	до варіння	після варіння		масою	об'ємом
Контроль	кремовий	кремовий	7	2,22	1,85
2,5	кремовий	кремовий	7	2,21	1,80
5,0	світло-жовтий	світло-коричневий	7	2,20	1,81
7,5	світло-жовтий	світло-коричневий	7	2,19	1,80
10,0	світло-жовтий	світло-коричневий	7	2,17	1,78
12,5	жовтий	жовтий	7	2,16	1,77
15,0	жовтий	жовтий	7	2,14	1,76
$НІР_{05}$	–	–	1	0,10	*0,09*

Таблиця 2

Запах і смак макаронів залежно від кількості борошна гарбузового

Варіант досліду	Запах	Смак	Запах	Смак	Солодкий смак
	споживний		гарбуза		
Контроль	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
2,5	8,8	9,0	9,0	9,0	9,0
5,0	8,5	8,9	7,2	9,0	9,0
7,5	8,2	8,9	5,3	7,2	7,4
10,0	6,2	7,7	5,0	5,4	7,0
12,5	6,0	7,0	5,0	5,0	5,3
15,0	5,8	6,2	3,1	3,2	3,1
$НІР_{05}$	0,4	0,5	0,3	0,3	*0,3*

і смак гарбуза був відсутнім за добавляння 2,5 % борошна гарбузового. За добавляння 5,0 % борошна гарбузового смак гарбуза був відсутнім, а його запах на рівні 7,2 бала, солодкий смака гарбуза також був відсутнім. Збільшення кількості борошна гарбузового до 15,0 % забезпечувало сильний солодкий смак гарбуза – 3,1 бала.

Відомо, що рівень кулінарної оцінки 8,0–9,0 бала дуже високий, 6,6–8,0 – високий, 5,4–6,6 – середній, 4,0–5,4 – низький, ≤4,0 – дуже низький. Отже, за добавляння 2,5–7,5 % борошна гарбузового кулінарна якість була дуже високою. За добавляння 10,0–15,0 % борошна гарбузового кулінарна якість була середньою.

Враховуючи високу кулінарну якість (8,2–8,9 бала) за добавляння 7,5 % борошна гарбузового, для споживачів, які надають перевагу гарбузвмісним продуктам, можна рекомендувати вищий вміст такого борошна. Отже, в технології виробництва макаронів з гарбузвмісними продуктами допустимо добавляти 2,5–5,0 % борошна гарбузового. Крім цього, можливе підвищення кількості борошна гарбузового до 7,5 %.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Визначено технологічні параметри макаронів з добавлянням різної кількості борошна гарбузового. Встановлено, що добавляння борошна гарбузового впливає на кулінарну якість макаронів. У технології виробництва макаронів з гарбузвмісними продуктами доцільно добавляти 2,5–5,0 % борошна гарбузового. Застосування такої кількості борошна забезпечує формування макаронів з кулінарною якістю на рівні 8,5–9,0 бала. Запах гарбуза становить 7,2 бала, смак відсутній. При цьому не відчувається солодкий смак гарбуза в макаронах.

Список літератури:

1. Kulaitienė J. et al. Antioxidant Activity and other Quality Parameters of Cold Pressing Pumpkin Seed Oil. *Not Bot Horti Agrobo*. 2018. Vol. 46(1). P. 161–166.

2. Любич В. В., Желєзна В. В., Стратуца Я. С. Перспективи використання тритикале в хлібопекарській промисловості. *Таврійський науковий вісник*. 2022. № 3. С. 133–143.

3. Любич В. В., Желєзна В. В., Грабова Д. М. Якість кексів з тритикале, збагаченого пастою гарбузовою. *Збірник наукових праць Уманського НУС.* 2021. Вип. 2. С. 17–28.

4. Paris H. S., Tadmor Y., Schaffer A. A., Cucurbitaceae Melons, Squash, Cucumber. Reference Module in Life Sciences. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences (Second Edition)*. 2017. Vol. 3. P. 209–217.

5. Господаренко Г. М., Любич В. В., Желєзна В. В., Новіков В. В. Оптимізація технології хліба з використанням борошна гарбузового. *Вісник Уманського НУС*. 2022. № 1. С. 82–88.

6. Guiné R. P. F., Pinho S., Barroca M. J. Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Journal of Food and Bioproducts Processing*. 2010. Vol. 8. P. 152–158.

7. Tazrart K., Lamacchia C., Zaidi F., Haros M. Nutrient composition and in vitro digestibility of fresh pasta enriched with *Vicia faba*. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2016. Vol. 47, no. 4, P. 8–15.

8. Tudorica C. M., Kuri V., Brennan S. Nutritional and Physicochemical Characteristics of Dietary Fiber Enriched Pasta. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2002. Vol. 50, no. 2. P. 347–356.

9. Любич В. В. Кондитерські властивості зерна пшениці спельти залежно від походження сорту та лінії. *Зб. наук. пр. Уманського НУС*. 2017. Вип. 91. С. 46–54.

10. De Pilli T., Derossi A., Severini C. Cooking quality characterisation of 'spaghetti' based on soft wheat flour enriched with oat flour. *International Journal of Food Science and Technology*. 2013. Vol. 48, no. 11. P. 2348–2355.

11. Abdel-Moemin A. R. 2016. Analysis of phenolic acids and anthocyanins of pasta-like product enriched with date kernels (*Phoenix dactylifera* L.) and purple carrots (*Daucus carota* L. sp. sativus var. atrorubens). *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2016. No. 4. P. 14.

12. Любич В. В., Чернега А. О., Калайда К. В., Худік Л. М. Якість свіжих ягід і варення різних сортів смородини. Новітні агротехнології. 2022. Т. 10, № 1.

13. Любич В. В., Желєзна В. В. Математичне моделювання водотеплового оброблення зерна пшениці спельти. Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. 2022. Вип. 1. С. 28–33.

Liubych V.V., Zheliezna V.V., Novikov V.V. MACARONI CULINARY QUALITY WITH THE ADDITION OF DIFFERENT AMOUNTS OF PUMPKIN FLOUR

Pumpkin flour is a product that has a high amount of carotene and is well stored. This product is a promising component of a whole range of food products. The article is dedicated to the study of the addition of different amounts of pumpkin flour on macaroni culinary quality.

Culinary quality indicators varied depending on the amount of pumpkin flour. It should be noted that macaroni colour before cooking changed from creamy without the addition of pumpkin flour to yellow with the addition of 15% of its flour. After cooking, the creamy and yellow colour of macaroni did not change. The light yellow colour changed to light brown after cooking. Moreover, macaroni kept its shape well after cooking – 7 points. The addition of pumpkin flour did not affect macaroni shape after cooking. However, macaroni cooking indicator decreased with an increase in the amount of pumpkin flour.

It was established that with an increase in the amount of pumpkin flour, the consumer smell and taste of macaroni decreased. The highest culinary score was with the addition of 2.5–7.5% of pumpkin flour. It should be noted that the smell and taste of pumpkin was absent when 2.5% of pumpkin flour was added. With the addition of 5.0% of pumpkin flour, the taste of pumpkin was absent, and its smell was at the level of 7.2 points. Sweet pumpkin taste was also absent. Increasing the amount of pumpkin flour to 15.0% ensured a strong sweet pumpkin taste – 3.1 points.

Considering the high culinary quality (8.2–8.9 points) with the addition of 7.5% of pumpkin flour, a higher content of such flour can be recommended for consumers who prefer pumpkin-containing products. Therefore, it acceptable to add 2.5–5.0% of pumpkin flour in the macaroni production technology with pumpkin-containing products. In addition, it is possible to increase the amount of pumpkin flour up to 7.5%.

In macaroni production technology with pumpkin-containing products, it is advisable to add 2.5–5.0% of pumpkin flour. The use of this amount of flour ensures macaroni formation with culinary quality at the level of 8.5–9.0 points. Pumpkin smell is 7.2 points, there is no taste. At the same time, sweet pumpkin taste in macaroni is not felt.

Key words: *macaroni, pumpkin flour, technological parameters, recipe, culinary quality.*

ТРАНСПОРТ

УДК 656.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/39

Кириченко Г.І.
Державний університет інфраструктури та технологій

Бердниченко Ю.А.
Державний університет інфраструктури та технологій

Стрелко О.Г.
Державний університет інфраструктури та технологій

Антонів О.С.
Державний університет інфраструктури та технологій

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОТРИМАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗАЛІЗНИЦІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

Своєчасне забезпечення вагонами відповідного типу усіх відправників вантажу відповідно до їх замовлень та широке впровадження автоматизованих систем управління залізничним транспортом – ключове питання для системи залізничних перевезень в умовах розвитку транспортного ринку. Метою даної роботи є дослідження можливості підвищення ефективності використання вагонів, пов'язаної з дотриманням термінів доставки вантажів, на основі нових методів та принципів розрахунку. Виконання часу доставки вантажів і норм обігу вагонів є ознакою дотримання технологічного процесу, за яким організована експлуатаційна робота. Обіг вагону не відображає якості роботи підрозділів з рухомим складом. Дослідження фахівців та науковців свідчать про невиконання встановлених норм використання рухомого складу, також спостерігається суттєва різниця між плановими та фактичними показниками обігу вагона. Досліджено підвищення ефективності використання парку вагонів, пов'язаного з цим дотримання термінів доставки вантажу, за рахунок нової методики та принципу розрахунку і прогнозу основних показників роботи. Проаналізовано можливості відійти від умовного визначення обігу за формулами, що використовують балансовий метод та застосовувати сучасні статистичні методи для визначення обігу вагонів як характеристики певного перевезення. При розробці нової методики запропоновано не розраховувати нормативи та показники, що виконуються за допомогою застарілих формул, а встановлювати обіг вагона, використовуючи дані реальної експлуатаційної роботи. Це дозволить встановлювати реальні норми обігу вагонів та терміни доставки вантажів, що забезпечать дотримання технологічних процесів експлуатаційної роботи залізниці при обслуговуванні клієнтів.

Ключові слова: *автоматизовані системи, терміни доставки вантажів, обіг вагонів, методика розрахунку, технологічний процес, залізниця.*

Постановка проблеми. Геополітичне положення і економіка України висувають вимоги пов'язані з вдосконаленням управління та контролю засобів транспорту в експлуатаційному процесі, технологій перевезення вантажів, та підвищення клієнтоорієнтованості галузі. У той же час один з важливих якісних показників контролю використання засобів транспорту – обіг вагону, не відображає якості роботи підрозділів з рухомим складом. Недоліки організації експлуатаційного процесу залізниці, координації роботи з суміжними видами транспорту та вантажоотримувачами лише фіксуються після здійснення доставки вантажів. Наявність всіх перелічених факторів при перевезенні вантажів складають задачі управління процесами доставки вантажів, які поки що залишаються не вирішеними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі формування методів управління та більшість систем управління базується на

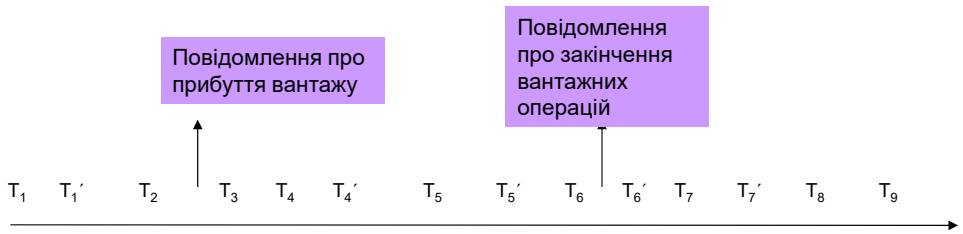
використанні інформаційних технологій [1-5], які дозволяють відтворити інформаційну (кількісну) модель системи управління у процесі змін її параметрів, а також визначити закономірності функціонування системи на підставі кількісних показників та якісних залежностей між ними.

Адекватність моделі системи управління залежить від точності опису окремих технологічних процесів при використанні кількісних даних [145]. Ці дані, як частина знань на тему технолого-економічних характеристик процесу вантажних перевезень, складають інформаційне забезпечення автоматизованих систем, які використовуються в управлінні залізничним транспортом України. Тому, природно, що від якості первинної інформації залежить якість управління об'єктами перевезень. До головних об'єктів системи управління, крім вагона відноситься і вантаж, інформація про характеристики якого також важлива, як і дані про час та місце знаходження вагону з вантажем.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є дослідження можливості підвищення ефективності використання вагонів, пов'язаної з дотриманням термінів доставки вантажів, на основі нових методів та принципів розрахунку.

Виклад основного матеріалу. До основних показників роботи залізниць належить важливий якісний показник – обіг вагона. Збільшення його, порівняно з нормативним часом, на практиці означає нестачу робочого парку вагонів та складнощі в виконанні основної функції перевізника. Теоретично існує кілька видів формул, якими користуються при нормуванні показника. Серед складових формул відсутні елементи, що враховують технічний стан вагонного парку, що змінюється, наприклад, і інші характеристики реального перевізного процесу, що і обумовлює найчастіше невідповідність нормованого і реального виконання показника обігу вагона. Фахівці, наприклад, роблять спроби введення у формули поправочних коефіцієнтів, пов'язаних з експертними оцінками, прогнозом. Завдання визначення нормативного часу обігу вагонів залишається актуальним і для адміністрацій залізниць, і для власників вагонного парку. Перевищення норми обігу вагона означає порушення технології – залізниці та порушення часу доставки вантажів – клієнтам.

Важливо зазначити, що інформаційна система Укрзалізниці містить дані про всі операції, що відбулися з вагонами і вантажами від моменту навантаження до наступного навантаження. Однією з особливостей інформаційних технологій (ІТ) залізниць України є те, що фінансові документи створюються на підставі даних про операції із вагонами та вантажами. Це дозволяє, зокрема, вести фінансові розрахунки з клієнтами щодо часу перебування вагонів на під'їзній колії під вантажними операціями, що є однією із складових обігу вагона. До часу користування, за який платить або звільняється від плати клієнт, відносяться і відрізки часу, що розраховуються, по базі ІТ, у т. ч. час затримок у просуванні вагона в дорозі, на станції, під'їзній колії, що зображено на рисунку 1. Наведена схема на рисунку 1 демонструє існуючу деталізацію передачі інформації про опера-



T1 – T1´– затримки вагонів при підході до клієнтів
T2 – прибуття вагонів на станцію
T3 – розформування поїздів
T4 – T4´ затримка подачі вагона з вини клієнта, залізниці
T5 – подавання вагона
T5´ – алгоритм подавання за умовами договору
T6 – T6´ – затримка забирання вагана з вини клієнта, залізниці
T7 – T7´ – акт ф. ГУ-23
T8 – забирання вагона з під'їзних колій
T9 – відправлення вагона зі станції

Рис. 1. Складові часу знаходження вагона у користуванні клієнта

ції з вагонами в автоматизованій системі управління Укрзалізниці.

До основних нових напрямів розвитку залізниць України належать: забезпечення часу доставки вантажів, прискорення обігу вагонів та вдосконалення системи керування на базі інформаційних технологій. Виконання часу доставки вантажів і норм обігу вагонів, очевидно, є ознакою дотримання технологічного процесу, яким організовується експлуатаційна робота. На жаль, дослідження фахівців та науковців свідчать про невиконання встановлених норм. Крім того, спостерігається суттєва різниця між плановими та фактичними показниками обігу вагона. Логічно виникає завдання адекватності нормативів, що задаються, а також завдання зміни методики нормування обігу, обліку його виконання та відходу від балансових методів при розрахунках показників.

Положення нової методики нормування та визначення виконаного обороту вагонів пов'язані з використанням даних ІТ про події перевізного процесу [6]. Під час розробки нової методики нормування обороту враховується таке:

– не використовувати застарілі формули, що базуються на балансовому методі, а визначати обіг вагонів на підставі реальних експлуатаційних операцій за базою ІТ,

– слід визначати обіг вагонів під час перевезення конкретного вантажу (чи з його номенклатурної статистичної групі), тобто визначати обіг вагона як показник обслуговування певного вантажопотоку.

З метою аналізу показника,, що розглядається, було опрацьовано дані за рік про навантаження вагонів з чорними металами на Криворізькій дирекції перевезень, призначенням до Одеського морського порту та подальшим навантаженням вагонів за групами: на Придніпровській, Одеській, інших дорогах [7]. Вибірку склали 2242 вагони з такими статистичними показниками: середній час обігу 10.14, стандартним відхиленням 5.87, медіаною, що дорівнює 8.77, мінімальним часом обігу 2.52 та максимальним обігом – 61.01.

Значення (median x) вибрано як критичний час ($t_{0.5}^{R}$) знаходження на кожному з полігонів залізниці. Вагони у вибірці розділимо за типами. Тип 1- час перебування на Одеській залізниці перевищує критичний, 2 – той самий на Придніпровській, 3 – час перевищено на обох дорогах, 4 – час нижче критичного. Кожен вагон вибірки потрапляє лише до одного типу, а об'єднання цих чотирьох типів вагонів утворює повну вибірку. Тоді результати вибірки з вагонів (таких вагонів виявилося 858), у яких обіг становив більше медіани часу 8,77 діб, можна представити у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вибірки з вагонів

Типи вагонів	1	2	3	4
$t_{0.5}^{R}$	16,6	34,0	48,4	1,0

Аналіз дозволяє визначити також зону відповідальності кожної залізниці і відповідно дирекції, при більшій деталізації. Статистичні дослідження показали наступне:

- тривалість обігу вагона залежить від багатьох чинників, зокрема. змінюється протягом року, залежно від місяця року,

- складові циклу – година перебування на окремих залізницях суттєво відрізняється,

- зі структури вибірки вагонів випливає, що відповідальність за перевищення «середньої норми» знаходження вагонів однозначно ідентифікується.

Структура вибірки та статистичні дані демонструють можливість визначення «участі» кожної залізниці або її структурного підрозділу у збільшенні часу обігу вагона. Мотиваційний вплив та вживання заходів при керуванні експлуатаційною роботою має співвідноситися з розмірами вагонів типу 1, типу 2 і, можливо, типу 3. Крім того, ці можливості можна використовувати і в оперативній роботі, не чекаючи кінця повного циклу обігу вагона шляхом візуалізації даних в диспетчерському апараті для ухвалення рішення.

Висновки. При розробці нової методики запропоновано не розраховувати нормативи та показники, що виконуються за допомогою застарілих формул, а встановлювати обіг вагона, використовуючи дані реальної експлуатаційної роботи. Інформаційна система, що функціонує зараз на залізницях України, дозволяє розраховувати обіг вагона, у т.ч. за кожним номером, дозволяє розраховувати обіг вагона за виділеними характеристиками перевізного процесу і визначати час знаходження вагонів, порівняно з нормою, на структурних підрозділах при виконанні всього циклу.

Використання викладених у методиці положень дозволить відійти від розрахунку показника за формулами, що використовують балансовий метод та не враховують існуючі умови експлуатаційної роботи. Реальні нормативи та їх виконання дозволять забезпечити дотримання технологічного процесу залізниці та час доставки вантажів для її клієнтів.

Список літератури:

1. Овчаренко С. М. Визначення та формалізація функцій контролю за виконанням графіків доставки вантажів на залізничному транспорті. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту*. Серія «Транспортні системи і технології». 2012. Вип. 20. С. 254–261.
2. Бочаров О. П., Мукмінова Т. А. Централізація інформаційних ресурсів та формування інформаційного середовища на залізничному транспорті. *Залізничний транспорт України*. 2007. № 4. С. 4–9.
3. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Горбова О. В. Методи збору даних про функціонування залізничних станцій. *Транспортні системи та технології перевезень*: збірник наукових праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2014. Вип. 8. С. 58-64. DOI: 10.15802/tstt2014/38087
4. Бутько Т. В., Ломотько Д. В. Перспективи організації інформаційної взаємодії учасників перевезення в умовах залізнично-водних транспортно-логістичних вузлів. *Залізничний транспорт*. 2007. № 6. С. 62–65.
5. Лаврухін О. В., Гаркавий А. О., Скобель І. В. Удосконалення змінно-добового планування шляхом впровадження автоматизації. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ.* 2010. Вип. 112. С. 51–59.
6. Statyvka Yurii, Kyrychenko Hanna, Strelko Oleh, Berdnychenko Yuliia, Gaba Vasyl, Hrushevska Tetiana Improvement of the technique of calculating operational parameters using an automated system. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol 294. DOI: 10.1051/matecconf/201929406002
7. Statyvka, Y., Kyrychenko, H., Strelko, O., Berdnychenko, Y. Control of technological processes using A fuzzy controller of the system for management of cargo delivery by railway. *Acta Scientiarum Polonorum, Administratio Locorumthis link is disabled.* 2021. 20(3). P. 241–251.

Kirichenko H.I., Berdnychenko Yu.A., Strelko O.H., Antoniv O.S. ENSURING COMPLIANCE WITH THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF THE RAILWAY WHEN USING AN AUTOMATED SYSTEM

The timely provision of wagons of the appropriate type to all shippers of goods in accordance with their orders and the wide implementation of automated railway transport management systems is a key issue for the railway transportation system in the context of the development of the transport market. The purpose of this work is to study the possibility of increasing the efficiency of the use of wagons, related to compliance with the terms of cargo delivery, based on new calculation methods and principles. Compliance with the time of delivery of goods and norms of circulation of wagons is a sign of compliance with the technological process according to which operational work is organized. Car turnover does not reflect the quality of work of units with rolling stock. The studies of specialists and scientists testify to the non-fulfillment of the established standards for the use of rolling stock, and there is also a significant difference between the planned and actual indicators of carriage circulation. The improvement of the efficiency of the use of the fleet of wagons, the associated compliance with the terms of cargo delivery, due to the new methodology and principle of calculation and forecasting of the main indicators of work was studied. The possibilities of moving away from the conventional determination of circulation based on formulas using the balance method and applying modern statistical methods to determine the circulation of wagons as a characteristic of certain transportation are analyzed. When developing a new methodology, it is proposed not to calculate standards and indicators that are performed with the help of outdated formulas, but to establish the circulation of the car using the data of real operational work. This will make it possible to establish real standards for the circulation of wagons and terms of cargo delivery, which will ensure compliance with the technological processes of the railway's operational work while serving customers.

Key words: *automated systems, cargo delivery terms, wagon circulation, calculation method, technological process, railway.*

УДК 656.615
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/40

Мурад'ян А.О.
Одеський національний морський університет

Демидюков О.В.
Одеський національний морський університет

ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ МОРСЬКИХ ПОРТІВ В УМОВАХ ЦИФРОВИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ: ЗАКОРДОННИЙ ДОСВІД

Відзначено необхідність зміни підходів до розвитку сучасних морських портів. Доведено, що трендом світового транспортного ринку є цифровізація та інтелектуалізація. Зазначено, що порти світу – лідери галузі зазнають цифрових трансформацій, в результаті яких запроваджуються інноваційні технології в управлінні роботою портових операторів, відбувається інтеграція всіх учасників глобального ланцюга поставок, зростає ефективність управління трафіком порту, підвищується пропускна здатність при перевантаженні та відправленні вантажів, створюється додатковий рівень безпеки. Дослідження особливостей розвитку галузі дозволило констатувати, що більш ніж половина контейнерних портів світу сконцентрована в Азії, переважно в Китаї, інфраструктурні об'єкти якого відіграють значну роль у світовій морській торгівлі та судноплавстві та посідають перші місця у рейтингу. Зазначено, що в багатьох портах світу процеси цифровізації технологічно та технічно знаходяться на стадії запровадження. Встановлено, що трансформаційні процеси суттєво модернізували концепцію розвитку найкрупніших морських портів світу, яка сьогодні спирається на технологічні новації та призвели до зміни управлінської парадигми. Проаналізовано світові практики запровадження цифрових технологій. Серед морських портів світу, які характеризуються значними цифровими трансформаціями, відзначено такі, як: Роттердам, Циндао, Сінгапур, Пусан, Сямень, Шанхай, Антверпен та інші. Особливу увагу приділено технології блокчейн, яка дозволяє відстежувати в режимі реального часу та управляти логістичною діяльністю в ланцюгах постачань, забезпечуючи безпечність обміну даними між сторонами, сприяючи розвитку морських перевезень та оптимізації морської, в тому числі портової, логістики. Відзначено труднощі, з якими стикаються морські порти при реалізації таких проєктів та питання, які потребують вирішення. Узагальнено цифрові рішення та технології, що використовуються в морських портах світу та запровадження яких представляє інтерес для вітчизняної галузі. Це сприятиме підвищенню ефективності її діяльності та конкурентоспроможності в рамках міжнародної транспортної системи.

Ключові слова: *морський порт, перевантаження вантажів, управління роботою портових операторів, цифровізація, цифрові технології, морський транспорт, логістичні операції, розвиток, автоматизація.*

Постановка проблеми. Ефективність діяльності морського порту, його конкурентоспроможність на світовому ринку перевезень залежить від оптимізації системи управління, використання сучасного технічного оснащення та запровадження інноваційних технологій, які відповідають міжнародним вимогам.

Жорстка конкуренція, яка панує сьогодні на ринку, сучасні виклики, які впливають на функціонування морських портів, вимагають зміни існуючих підходів до їх розвитку.

Зазначимо, що загально визнаним трендом світового транспортного ринку визнана цифровізація та інтелектуалізація, на роль якої в розвитку різних секторів та національної економіки в цілому неодноразово зверталась увага як на європейському, так і світовому рівні [1; 2].

Зазначимо, що останнім часом найкрупніші порти світу зазнають цифрових трансформацій, в результаті яких запроваджуються інноваційні технології в управлінні роботою портових операторів, відбувається інтеграція всіх учасників глобального ланцюга поставок у єдину взаємопов'язану мережу, зростає ефективність управління трафіком порту, підвищується пропускна здатність при перевантаженні та відправленні вантажів, створюється додатковий рівень безпеки.

Проте слід вказати, що в ряді портів світу, які є ланками глобальних транспортних ланцюгів, в тому числі і вітчизняних, рівень цифрового розвитку значно поступається світовим показникам.

Це підтверджують результати дослідження [3], за висновками якого лише 34% портів визна-

чили готовність до виконання вимог Міжнародної морської організації (*International Maritime Organization*) по електронному обміну даними судно-берег, а понад 31% – не вживали дій в цьому напрямі. При цьому серед основних перешкод на шляху таких процесів визначено такі, як: відсутність належної фінансової допомоги; низький рівень взаємодії між ключовими зацікавленими сторонами в портах; прогалини в законодавчому регулюванні.

Отже, існує потреба у дослідженні досвіду цифрових трансформацій провідними морськими портами світу, адаптація якого сприятиме розвитку вітчизняної портової галузі. Це обумовлює актуальність даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження теоретичних та практичних аспектів функціонування морських портів світу, основні засади їх розвитку з використанням інноваційних технологій виступають предметом дискурсів в різних країнах світу, знаходячись в полі зору зарубіжних та вітчизняних науковців.

Так, в наукових роботах [4-6] акцентується увага на пріоритетності цифрових трансформацій в морських портах, аналізуються різноманітні технології та інструменти їх реалізації.

Авторами досліджень [7; 8] розглядаються підходи до цифровізації морських портів (роботизація, штучний інтелект тощо), опрацьовуються та характеризуються технологічні особливості таких процесів, розробляються надійні методики оцінки ефективності технологій та аналізується їх вплив на результати операційної діяльності порту [9; 10].

Особлива увага приділяється перспективам впровадження технологій, в тому числі блокчейн при організації оброблення суден в морських портах [11]; розвитку світової системи забезпечення безпеки людей, вантажів, та об'єктів шляхом розробки технічних рішень щодо підтримки е-Навігації [12; 13].

Зазначимо, що окремі технологічні питання цифровізації морських портів, активно досліджуються міжнародними організаціями. Так, рівень готовності цих інфраструктурних об'єктів до таких трансформацій досліджувався Міжнародною асоціацією портів та гаваней (*International Ports and Harbors Association*) спільно зі Світовим банком (*World Bank*) що дозволило визначити основні проблеми та сформулювати відповідні рекомендації щодо їх усунення [3]. Різні моделі розвитку морських портів аналізуються Конференцією ООН з торгівлі та розвитку (*United Nations Conference on Trade and Development*), в матеріалах якої робиться акцент на моделі «Workport», що передбачає «максимальну комп'ютерну оптимізацію всіх процесів» [14].

Але, враховуючи стрімкість глобальних цифрових трансформацій, зміни вимог до розвитку транспортної системи та, відповідно, інфраструктурних об'єктів, питання запровадження сучасних цифрових технологій в морських портах різних країн та узагальнення найкращих світових практик потребують подальших досліджень, що дозволить комплексно розглянути проблему та сприятиме розвитку вітчизняного портового господарства.

Постановка завдання. Дослідження досвіду цифрових трансформацій, який запроваджено світовими лідерами портової галузі, імплементація якого сприятиме розвитку морських портів України.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження особливостей розвитку лідерів портової галузі дозволило констатувати, що більш ніж половина контейнерних портів світу сконцентрована в Азії, переважно в Китаї, інфраструктурні об'єкти якого очолюють рейтинг, відіграючи значну роль у світовій морській торгівлі та судноплавстві (рис. 1) та демонструючи зростання вантажообігу.

Так, одним з найбільших портів визнано Шанхай, вантажообіг якого за даними 2021 року підвищився на 8 %, сягнувши позначки 47 млн. TEU. На другому місці – Сінгапур, який є важливим вузлом передачі контейнерів з одного лінійного сервісу до іншого для доставки до кінцевого пункту призначення (37,5 млн. TEU), на третьому – *Нінбо-Чжоушань (31,1* млн TEU*).*

Зазначимо, що трансформаційні процеси суттєво модернізували концепцію розвитку найкрупніших портів світу, яка сьогодні спирається на технологічні новації (використання інноваційного програмного забезпечення, сучасного обладнання) та передбачає зміни управлінської парадигми (формування корпоративної культури та зовнішніх комунікацій).

Загальновідомо, що першою сходинкою таких процесів було запровадження в порту Роттердам (1993 рік) безпілотних машин для обробки та горизонтального перевантаження контейнерів та автоматизації процесу цифровізації документів, що дозволяло учасникам логістичного ланцюга відстежувати місцезнаходження контейнерів.

Сьогодні цей інфраструктурний об'єкт визнаний одним із самих передових в Європі. Серед масштабних трансформацій, які було здійснено

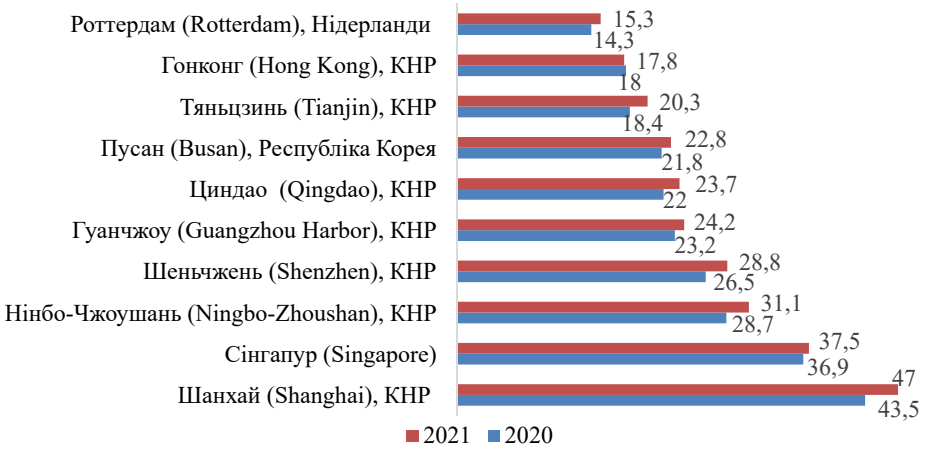


Рис. 1. Рейтинг найкрупніших контейнерних портів світу за вантажообігом, млн TEU
Джерело: побудовано за даними [13; 15]

в цьому морському порту заслуговують на увагу такі, як:

– проєкт «гіперумний» Container 42, який розпочато у 2019 році зусиллям значної кількості компаній (IBM, Cisco, Intel, Van Donge & de Roo, Simwave, Advanced Mobility Services, Kalmar і Shipping Technology тощо). Він передбачав відправку експериментального контейнеру, оснащеного датчиками, комунікаційним обладнанням, а також сонячними панелями. Його мета – збір протягом двох років інформації, яка необхідна при створенні «цифрового двійника» порту (умови транспортування на борту суден, залізницею і автотранспортом: вібрації, рівні забруднення повітря, температуру, вологість тощо);

– проєкт «Розумний порт в світі», який базується на технології Інтернету речей та передбачає створення протяг всієї портової зони цифрового двійника порту, що дозволить відслідковувати рух суден, управляти інфраструктурою та супутніми даними та до 2025 року – прийом автономних підключених вантажних суден.

Аналіз світових практик цифровізації в портах світу дозволив відзначити запровадження таких новацій, як: робототехніка, автоматизовані та полуавтоматизовані контейнерні термінали, штучний інтелект, безпілотні транспортні засоби, технологія блокчейн тощо.

Проте, звертаючи увагу на процеси автоматизації слід вказати, що в цілому технологічно та технічно ця ініціатива знаходиться на стадії запровадження. Про це свідчить той факт, що близько 97% контейнерних терміналів в портах світу не автоматизовано. При цьому частка повністю автоматизованих дорівнює 1%. Серед них: міжнародний контейнерний термінал «Вікторія» (порт Мельбурн, Австралія), міжнародні контейнерні термінали порту Сідней (Австралія), термінал «Нью Цяньвань» (порт Циндао, Китай) та інші. Напівавтоматизованими є лише 2%. Серед них: контейнерний термінал «Фишермен айленд» (Брісбен, Австралія), термінали «Пасир-Панджанг» 1–4 (Сінгапур), термінал «Ои 5» (Токіо, Японія) тощо.

В наукових дискурсах і дослідженнях серед основних труднощів, які перешкоджають процесам автоматизації в морських портах, виокремлюються такі, як: значні часові та фінансові витрати; нестача кваліфікованих кадрів та матеріальних ресурсів для запровадження технологій автоматизації і управління ними; стурбованість з боку профспілок щодо скорочення робочих місць [14; 16].

Акцентуємо увагу на тому, що практичний інтерес, в контексті підвищення ефективності діяльності морських портів, представляє технологія блокчейн, яка дозволяє відстежувати в режимі реального часу та управляти логістичною діяльністю в ланцюгах постачань, забезпечуючи безпечність обміну даними між сторонами, сприяючи розвитку морських перевезень та оптимізації морської, в тому числі портової, логістики.

Слід вказати, що сьогодні результати її запровадження та пілотних тестувань виступають предметом досліджень та численних обговорень [2; 9; 14, с. 3; 16].

Серед морських портів, в яких реалізовано такі технологічні новації – порт Роттердам, де реалізується масштабний проєкт Blockchain logistics, який спрямований на охоплення всього ланцюга постачань. В порту функціонує blockchain – лабораторія, яка здійснює науково-дослідницьку діяльність та опрацювання отриманих результатів.

Крім того, тестування цієї технології та запровадження пілотних проєктів, які спрямовані на зміну традиційної організації логістичних процесів та документообороту, здійснюються і в інших портах світу (Антверпен, Сінгапур, Циндао, Пусан та інших), доводячи її ефективність.

Але, вважаємо доцільним зауважити, що, практична реалізація такого проєкту в морських портах пов'язана з рядом питань, які потребують вирішення. А саме: наявність специфічних та унікальних договірних умов між учасниками логістичного процесу, що ускладнює універсалізацію та потребує налаштування такої опції в системі; складність запровадження невеликими компаніями через можливу відсутність належних технологічних можливостей та фінансування тощо [16].

Тому, підкреслюючи значущість блокчейн для розвитку морських портів, погоджуємось з думкою дослідників, які зазначають, що ця технологія виступатиме каталізатором більшої консолідації в галузі або сприятиме створенню дворівневої системи, в якій деякі лінії залишаться працювати з використанням цифрових технологій лише фрагментарно [14].

Зазначимо, що морські порти світу мають накопичений досвід в сфері запровадження цифрових технологій, які характеризуються певним різноманіттям. Узагальнення напрацювань, які представляють практичний інтерес для вітчизняної галузі представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Запровадження цифрових рішень та технологій в ряді морських портів світу

Порт	Цифрові рішення та технології	Формування додаткового потенціалу для розвитку порту
Антверпен	пілотне тестування технології blockchain	оптимізація портової логістики та підвищення ефективності та безпечності управління базами даних
	платформа NxtPort	інтелектуальна обробка масивів інформації, що сприяє підвищенню ефективності та прозорості управління та обміну даними в порту; сумісність з існуючими платформами, що дозволить синхронізувати логістичні операції в порту, знизити витрати і затримки, збільшити пропускну спроможність і ефективність роботи
Пусан	запровадження blockchain в межах ланцюга постачання	оптимізація портової логістики, безпечність обміну даними між сторонами
Роттердам	інтернет речей, блокчейн, технологій доповненого інтелекту	підвищення якості зв'язку між судами та береговими службами для раціоналізації управління рухом; оптимізація маршруту, визначення часу прибуття судна та доступності причалів
	система електронної навігації в режимі реального часу	зростання ефективності обміну інформацією між суднами та між судном і берегом за рахунок досконалішої організації опрацювання даних (наприклад, стосовно дорожньої ситуації в порту, завантаженості інфраструктури тощо), підвищення рівня безпеки судноплавства, надійності та ефективності морських перевезень
Сямень	Xiamen Ocean Gate Container Terminal – «розумний» порт, в якому запроваджено інтелектуальну систему управління операціями з використанням технології 5G (від розвантаження вантажів до їх зберігання на складі)	повна автоматизація управління логістичними процесами та операціями в порту
Тілбері	інтегрований мобільний додаток бронювання транспортних засобів	можливість замовлення перевізниками контейнерів і перевірка їх місцезнаходження з мобільних пристроїв
Циндао	Повністю автоматизований контейнерний термінал, який управляється лазерними сканерами і системами позиціонування контейнерів для точного закріплення і перенесення їх на вантажівки без водія; безпілотна інтелектуальна система воріт	автоматичне швартування суден, повна автоматизація управління логістичними процесами (плануванням обладнання, доставкою контейнерів тощо)

Джерело: узагальнено та сформовано за даними [14; 16]

Як інструмент цифровізації морських портів представляє інтерес Система портового співтовариства (Port Community Systems – PCS), яка є інформаційною системою, що працює в режимі реального часу та має наступні переваги: дозволяє оптимізувати логістичні процеси у ланцюзі постачання через встановлення стандартів обміну даними; забезпечує прозорість інформації на всіх етапах обробки вантажів; підвищує ефективність та швидкість портових процесів, зокрема, через спрощення системи документообороту; забезпечує високий рівень кібербезпеки всього логістичного ланцюга в порту через єдиний центр реагування на кіберзагрози. Такий проєкт був реалізований та довів ефективність в таких портах, як: Лос-Анджелес, Барселона, Шанхай тощо.

Висновки. Зазначимо, що останнім часом найкрупніші порти світу зазнають цифрових трансформацій, в результаті яких запроваджуються інноваційні технології в управлінні роботою портових операторів, відбувається інтеграція всіх учасників глобального ланцюга поставок у єдину взаємопов'язану мережу, зростає ефективність управління трафіком порту, підвищується пропускна здатність при перевантаженні та відправленні вантажів, створюється додатковий рівень безпеки тощо. В багатьох портах світу процеси цифровізації технологічно та технічно знаходяться на стадії запровадження. Але серед лідерів, які характеризуються значними цифровими трансформаціями слід відзначити такі, як: Роттердам, Циндао, Сінгапур, Пусан, Сямень, Шанхай, Антверпен та інші. Узагальнення цифрових рішень та технологій, які використовуються в морських портах світу дозволило виокремити ті, та запровадження яких представляє інтерес для вітчизняної галузі. Серед них: робототехніка, автоматизовані та полуавтоматизовані контейнерні термінали, штучний інтелект, безпілотні транспортні засоби, технологія блокчейн тощо. Це сприятиме підвищенню ефективності діяльності портів та їх конкурентоспроможності в рамках міжнародної транспортної системи.

Однак, запровадження таких новацій потребує опрацювання відповідних технологічних механізмів реалізації таких проєктів, що складає перспективи подальших досліджень.

Список літератури:

1. European Commission. 2030 Digital Compass: the European way for the Digital Decade. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX %3A52021DC0118 (дата звернення 02.09.2022).

2. Digital Culture: The Driving Force of Digital Transformation. World Economic Forum, 2021. URL: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Digital_ Culture_Guidebook_2021.pdf (дата звернення 02.09.2022).

3. Global ports survey on the implementation of electronic data exchange to conform with the IMO Convention on Facilitation of International Maritime Traffic. IAPH, 2021. URL: https://sustainableworldports.org/wp-content/ uploads/IAPH-FAL-Survey-Report-Jan-2021.pdf (дата звернення 02.09.2022).

4. Chen S.-L., Jeevan J., Cahoon S. Malaysian Container SeaportHinterland Connectivity: Status, Challenges and Strategies. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. 2016. Vol. 32 (3). P. 127–138. doi: http://doi.org/10.1016/ j.ajsl.2016.09.001

5. de Langen, P. W., van der Lugt, L. M. Institutional reforms of port authorities in the Netherlands; the establishment of port development companies. *Research in Transportation Business & Management,* 2017. Vol. 22. P. 108–113.

6. Sugawara J. Port and hinterland network: a case study of the Crescent Corridor intermodal freight program in the US. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. P. 916–927. doi: http://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.466

7. Martín-Soberón A. M., Monfort A., Sapiña R., Monterde N., Calduch D. Automation in port container terminals. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 160. P. 195-204. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.12.131

8. Bell M. G. H. Container Port Automation. *International Encyclopedia of Transportation. Elsevier*. 2021. P. 323-326. DOI: 10.1016/B978-0–08-102671-7.10263-5

9. Morton R. Digital transformation: real results. *Port technology*. 2021. Edition 106. P. 3–5.

10. Кулішова О., Котенко В., Яковцев С. Перспективи впровадження цифрових технологій у процеси управління операційною безпекою морських портів. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка.* 2022. № 11. С. 76–85. https://doi.org/10.32851/2708-0366/2022.11.11

11. Melnyk O., Bychkovsky Y., Voloshyn A. Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport.* 2022. Vol. 114. P. 91–101. DOI: https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8

12. Мельник О.М., Онищенко О.А., Васалатій Н.В., Корякін К.С., Пуляєв І.О., Щенявський Г.С. Технології інформаційної взаємодії у процесі підвищення безпеки мореплавства. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2022. Том 33 (72) № 4. С. 260-265. DOI https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/39

13. Титов А., Баракат Л., Хаизаран А. Состояние и перспективы реализации технологии е-навигации. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* 2019. № 4(56). С. 621–630. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630

14. Review *of Maritime Transport 2021.* URL: https://unctad.org/en/ PublicationsLibrary/rmt2019_en.pdf (дата звернення 05.09.2022).

15. Hafen Hamburg. Top 20 Containerhäfen. URL: https://www.hafen-hamburg.de/en/statistics/ (дата звернення 20.09.2022).

16. Drewry Maritime Research. Ports and terminal insight. 2020. Quarter 2. URL: https://www.drewry.co.uk/maritime-research-products/ (дата звернення 05.09.2022).

Muradian A.O., Demydiukov O.V. FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF SEA PORTS IN THE CONDITIONS OF DIGITAL TRANSFORMATION: FOREIGN EXPERIENCE

The need to change approaches to the development of modern seaports was noted. It is proved that the trend of the global transport market is digitalization and intellectualization. It was noted that the world's ports, the industry leaders, are undergoing digital transformations, as a result of which innovative technologies are being introduced in managing the work of port operators, all participants in the global supply chain are being integrated, the efficiency of port traffic management and throughput during reloading and dispatch of goods is increasing, and an additional level of security is being created. A study of the development of the industry made it possible to state that more than half of the world's container ports are concentrated in Asia, mainly in China, whose infrastructure facilities play a significant role in world maritime trade and shipping and occupy first places in the ranking. It was noted that in many ports of the world, digitalization processes are technologically and technically being implemented. It has been established that the transformation processes have significantly modernized the concept of development of the world's largest ports. Today it is based on technological innovations, which leads to a change in the management paradigm. The world practices of introducing digital technologies are analyzed. Among the ports of the world, characterized by significant digital transformations, there are such as: Rotterdam, Qingdao, Singapore, Busan, Xiamen, Shanghai, Antwerp and others. Particular attention is paid to blockchain technology, which allows you to track cargo in real time and manage logistics activities in supply chains, ensuring the security of data exchange between the parties, contributing to the development of maritime transportation and optimization of maritime, including port, logistics. Difficulties faced by seaports in the implementation of such projects and issues that need to be addressed are noted. The digital solutions and technologies used in the seaports of the world and the implementation of which is of interest to the domestic industry are summarized. This will lead to an increase in the efficiency of their activities and competitiveness within the international transport system.

Key words: *seaport, cargo transshipment, managing the work of port operators, digitalization, digital technologies, maritime transport, logistics operations, development, automation.*

УДК 656.01
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/41

Петренко О.І.
Державний університет інфраструктури та технологій

ПРИНЦИПИ ЕРГОНОМІЧНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕВЕЗЕННЯ НА ТРАНСПОРТІ

У статті досліджуються принципи ергономічної організації технологічних процесів перевезення на транспорті, які спрямовані на збереження здоров'я працівника та забезпечення якомога комфортних умов роботи. Доведено, що підвищення ефективності технологічних процесів забезпечується за умов дотримання принципів ергономіки на всіх ланках та побудові діяльності з урахуванням ергономічних вимог до техніки й організації праці. Здійснено аналіз теоретичного базису ергономічного забезпечення організації перевезень та відзначено, що такі процеси виходять з антропоцентричної концепції та передбачають застосування системного підходу до функціональної діяльності людини, що дозволяє узгодити внутрішні (психічний стан, процеси, емоції) і зовнішні (транспортний засіб, рух) аспекти. Методологічним базисом для такого узгодження виступає організмічний підхід. Встановлено, що технологічні процеси перевезень відбуваються при безпосередній взаємодії транспортних засобів і людини в умовах середовища руху, утворюючи систему «людина – техніка – середовище». Охарактеризовано принципи, дотримання яких уможливлює підвищення ефективності виконання операцій. Акцентовано увагу на тому, що організація технологічних процесів перевезення з використанням принципів ергономіки спрямована на підвищення ефективності системи «людина – машина – дорожній рух – природне середовище». Запропоновано модель ергономічної організації технологічних процесів перевезення. Акцентовано увагу на її комплексності. Доведено, що найважливішими складовими при цьому виступають: проектування ергономічного робочого місця (з врахуванням антропометричних, біомеханічних та психофізіологічних властивостей людини, психічних особливостей, оперативного простору для технологічних операцій); місць для пасажирів; формування системи заходів, спрямованих на безпечність праці та дорожнього руху; забезпечення умов для розвитку особистості в процесі роботи. Це спрямовано на досягнення певних ефектів (соціального, технічного, економічного та естетичного), збереження здоров'я працівника та забезпечення якомога безпечних умов праці та руху на дорозі.

Ключові слова: *ергономіка; принципи ергономіки; система; технологічні процеси; перевезення; транспорт.*

Постановка проблеми. Транспорт є однією з найважливіших галузей національної економіки, яка, здійснюючи вантажні та пасажирські перевезення, забезпечує зв'язки між підприємствами, регіонами та країнами, виступає активним учасником глобальних інтеграційних процесів.

Слід констатувати, що галузь охоплює значний соціальний сегмент працюючих. Але діяльність, яка пов'язана з процесами перевезення та виконанням більшості технологічних операцій, характеризується потенційними небезпеками для життя і здоров'я, що обумовлено ризиками на дорозі, наявністю великої кількості одноманітних стереотипних рухів з додаванням значних фізичних зусиль, травмонебезпечними позами тулуба при виконанні функціональної діяльності тощо.

Так, за даними Державної служби України з питань праці спостерігається зростання динаміки кількості травматичних та смертельних випадків, а також професійних захворювань у галузі транспорту та логістики. За даними 2021 року – 395 випадків (майже 6% від загальної кількості), що на 51 більше, ніж у минулому році; 26,4% випадків сталися через психофізичні, техногенні, природні, та технічні причини [1].

Зазначимо, що технологічні процеси перевезень відбуваються при безпосередній взаємодії транспортних засобів і водія в умовах середовища руху, утворюючи систему «людина – техніка – середовище». Підвищення їх ефективності можна забезпечити за умов дотримання певних ергономічних принципів на всіх ланках та побудові діяльності з урахуванням ергономічних вимог до техніки й організації праці, що дозволить узгодити показники фізичного середовища на транспорті з психофізіологічними можливостями й особливостями людини, оптимізувати інтенсивність людської праці при виконанні технологічних операцій, підвищити ефективність та якість, мінімізувати фізичні і моральні непродуктивні витрати, а також створити необхідні умови для збереження здоров'я

і розвитку особистості. Це обумовлює актуальність даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми забезпечення високої працездатності і безпеки робітників у різних галузях; вивчення антропометричних, психофізіологічних, сенсомоторних характеристик людини з метою оптимальної організації технологічних процесів задля мінімізації негативного впливу на фізичний і психологічний стан працівників знаходяться в полі зору таких науковців, як: В. Брусенцов [2], А. Буров [3], Д. Аль Мадани [4], М. Моради [5], Д. Паркер [6], П. Сукапто [7], С. Субраманиар [8] тощо.

Дослідженню специфіки умов праці та питанням зменшення імовірності ризику виникнення професійних захворювань під час виконання технологічних операцій у транспортній галузі присвячено праці таких авторів, як: Є. Гаврилов [9; 10], Ю. Гао [11], М. Дмитриченко [9; 10], М. Кристопчук [12] та інших.

В ряді робіт [13] акцентується увага на різних методах оцінювання ергономічних ризиків, що виступають підґрунтям для інженерних рішень, спрямованих на підвищення рівня безпеки і комфорту праці.

На здорові та безпечні умови праці як «важливий аспект сталості і конкурентоспроможності економіки», «передумову існування здорової та продуктивної робочої сили» звертається увага у документах Європейського Союзу та профільних міжнародних організацій [14; 15].

Результати досліджень дозволили констатувати, що сьогодні відсутні єдині підходи до організації технологічних процесів перевезення на транспорті. Крім того, складність таких операцій, доцільність врахування сучасних вимог ергономіки та втілення новітніх ергономічних принципів обумовлює необхідність додаткової уваги до цього питання.

Постановка завдання. Метою статті є визначення принципів ергономічної організації технологічних процесів перевезення на транспорті, спрямованих на збереження здоров'я працівника та забезпечення якомога комфортних умов роботи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Беручи до уваги, що головною метою ергономіки є підвищення ефективності і якості діяльності працівника в системі «людина – машина – навколишнє середовище» з одночасним збереженням його здоров'я та створенням комфортних умов для більш комфортного перебуванні на робочому місці [2, с. 21], в ракурсі організації технологічних процесів перевезень цю науку представляється доцільним розглядати як комплексну системну оптимізацію умов праці та відповідних операцій у системі «людина – машина – дорожній рух – природне середовище».

В цьому контексті представляє інтерес дослідження Гаврилова Е.В. та Дмитриченка М.Ф., які визначають ергономічне забезпечення організації дорожнього руху як «частину системи організаційних заходів», спрямованих на «…розв'язання всього комплексу питань, пов'язаних із системною оптимізацією діяльності водіїв у транспортному потоці» [9, с. 339].

Спираючись на дослідження [2; 9 с. 341; 10 с. 35], акцентуємо увагу на тому, що ергономічне забезпечення організації перевезень виходить з антропоцентричної концепції, згідно з якою «створення технічних засобів є процесом матеріалізації в них перетворених людських функцій».

Виходячи з цього, технологічні процеси перевезень, які базуються на принципах ергономіки, передбачають застосування системного підходу до функціональної діяльності людини, що дозволяє узгодити внутрішні (психічний стан, процеси, емоції) і зовнішні (транспортний засіб, дорога) аспекти.

При цьому методологічним базисом для такого узгодження і цілісної побудови виступає холістичний (організмічний) підхід, який ґрунтується на використанні досягнень еволюції живих організмів для побудови людино-машинних систем. Відповідно до нього технічні засоби є нібито штучним продовженням організму людини, що збільшує його можливості та ідеї якого уможливлюють використання природної поведінки працівника як об'єктивної основи для створення та розуміння основних закономірностей та правил руху транспортних засобів.

Слід відзначити, що в процесі виконання функціональних обов'язків, взаємодія працівника з природним середовищем здійснюється на основі ряду принципів, які визначають систему закономірностей, а їх дотримання уможливлює підвищення ефективності виконання операцій (за умов застосування технічних засобів за призначенням) (табл. 1).

Необхідно акцентувати увагу на тому, що організація технологічних процесів перевезення транспортними засобами з використанням принципів ергономіки спрямована на підвищення ефективності системи «людина– машина – дорожній рух – природне середовище» у заданих умовах і з певною якістю.

Таблиця 1

Принципи взаємодії працівника та природного середовища

№	Назва принципу	Основні характеристики
1	Найменшої взаємодії	працівник за будь-яких дорожніх умов намагається при мінімізації своїх дій забезпечити максимальну ефективність взаємодії. Принцип виявляється в намаганнях людини звільнити свій організм від перевантажень
2	Функціонального гомеостазісу	працівник при розв'язанні завдань, спрямованих на досягнення поставленої мети, зберігає певну сукупність стабільних у визначених межах функціональних поводжень. У вузькому сенсі функціональний гомеостазіс означає, що в процесі організації технологічних операцій, працівник підтримує істотні змінні свого руху у припустимих межах
3	Сумісності	взаємодія працівника з середовищем руху допускає цілеспрямовані дії усіх учасників руху (оскільки діяльність людини соціально нормована)
4	Максимізації взаємної інформації	людина намагається забезпечити максимум взаємної інформації між стимулами і реакціями
5	Активності	технічні засоби не повинні обмежувати можливості людини щодо ефективного виконання поставлених задач, уможливлювати виконання функціональної діяльності та технологічних процесів різними способами і по різних схемах функціонування. Відображає здатність людини до більшої різноманітності дій (ніж найпростіші алгоритми типу «стимул-реакція»), не лише реагуючи на сигнали, а й прагнучі взаємодіяти з середовищем

Джерело: складено за даними [9, с. 339] та доповнено

Зниження ефективності цієї системи призводить до ускладнення виконання функціональної діяльності, зменшення її продуктивності та якості послуг на фоні одночасного зростання матеріальних, фінансових і технічних витрат на її функціонування.

Відзначимо, що значна роль у забезпеченні ефективної роботи такої системи належить людині (працівникові), а точніше таким його характеристикам, як:

– працездатність – визначається станом фізіологічних та психічних функцій і характеризує здатність виконувати певну діяльність з необхідною якістю протягом відповідного інтервалу часу;

– надійність – здатність безвідмовно виконувати діяльність протягом певного інтервалу часу за заданих умов.

Виконання співробітниками в процесі транспортування своїх функціональних обов'язків здійснюється в складних умовах праці, потребує пристосовування до зовнішніх умов, що пов'язано з витрачанням певної психічної і фізичної енергії.

Тому, ціль ергономічної організації технологічних процесів перевезення на транспорті – зменшити ці витрати, створити сприятливі умови для оптимізації моделі поведінки людини за рахунок організації ергономічного робочого місця (вдосконалення параметрів рухомого складу, технічних засобів), організації руху.

Модель ергономічної організації технологічних процесів перевезення на транспорті представлена на рис. 1.

Відзначимо, що облаштуванню ергономічного робочого місця передує вивчення організації праці. Серед основних аспектів дослідження слід виокремити такі:

– вивчення переліку прийомів, операцій, які необхідно здійснити протягом певного часу;

– аналіз умов роботи (ступінь тяжкості, темп, монотонність, становище працюючого і спосіб фактичного виконання кожного елемента операції технологічного процесу перевезень);

– визначення технічних засобів, обладнання, інструменту, додаткових пристроїв, необхідних для виконання функціональної діяльності.

Слід, акцентувати увагу на тому, що організація робочого місця з врахуванням принципів ергономіки – є одним з найважливіших факторів, що формує оптимальне співвідношення елементів комплексної системи «людина – машина – середовище» та здійснюється з врахуванням антропометричних, біомеханічних та психофізіологічних властивостей людини та оперативного простору для вільного здійснення необхідних технологічних операцій.

Зазначимо, що робоче місце характеризується певними геометричними розмірами, які обумовлюють його положення щодо кабіни, а також впливають на розміщення органів керування. Умовою забезпечення відповідності робочого місця ергономічним вимогам є встановлення фізіологічно – оптимальної робочої пози (типу посадки), яка залежить від типу транспортного засобу.

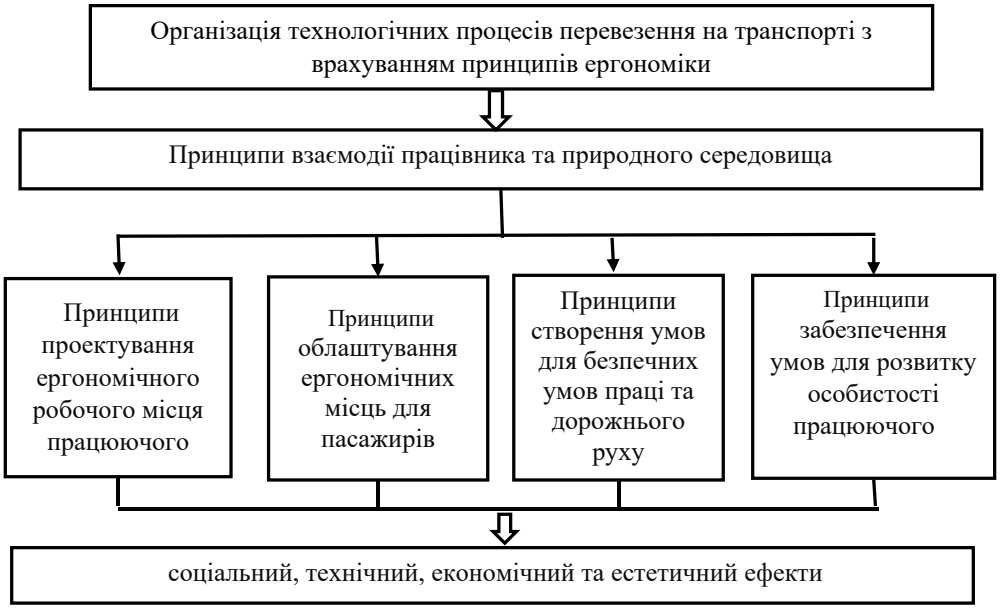


Рис. 1. Модель організації технологічних процесів перевезення на транспорті з врахуванням принципів ергономіки

Джерело: запропоновано автором

При цьому серед основних принципів, які необхідно врахувати, при організації робочого місця вважаємо доцільним звернути на такі [16, с. 67]:

– мінімізація кількості і траєкторії робочих рухів, а також кількості операцій при виконанні певної функції;

– уникнення розташування органів керування, що використовуються послідовно, на різних висотах;

– розміщення найважливіших органів керування і контролю за роботою обладнання в оптимальних зонах огляду, враховуючи величину кута зору;

– створення комфортних кліматичних умов;

– розміщення органів керування таким чином, щоб за можливістю звести робочі рухи до руху передпліччя, кисті, пальців рук, допускаючи рухи плечового суглоба тільки у виключному випадку. При цьому найбільш важливі і часто використовувані – в оптимальному робочому просторі, що обмежується радіусом дуги в ліктьовому суглобі – 340 мм;

– розміщення аварійних і відповідальних органів керування в оптимальній зоні досяжності рук;

– розташування другорядних органів керування та індикаторів в зоні максимальної досяжності руки (радіус дуги в плечовому суглобі – 550 мм);

– розміщення органів керування з мінімально доступними інтервалами. При цьому розташування індикаторів і органів керування здійснюється в однаковому порядку (наприклад, якщо індикатори розташовуються в горизонтальному порядку, той і відповідний органи керування також).

Облаштування ергономічних місць для пасажирів передбачає забезпечення зручного розміщення людей на сидіннях, зручного входу-виходу, комфортного клімату в салоні транспортного засобу.

Ще одним важливим моментом ергономіки при організації технологічних процесів перевезення на транспорті є безпека праці та дорожнього руху. З цією метою представляється доцільним формування системи заходів, безпосередньо спрямованих на забезпечення здорових і безпечних умов праці та руху на дорозі.

Функціональна діяльність водія характеризується складністю, а її неправильна організація та несвоєчасність виконання є одними з причин небезпечних помилок, що призводять до аварійності на дорогах та травм, які несуть загрозу життю та здоров'ю учасників руху.

Тому, при проектуванні робочого місця, наряду з технічними аспектами доцільно врахування людського чинника, особливості діяльності працівника у системі «людина» – «машина» – «середовище». Це досягається на основі таких принципів: врахування можливості психічних процесів людини в сфері прийому, переробки інформації і прийняття правильного рішення у конкретних умовах функціонування системи; психічні влас-

тивості й особливості водія, що проявляються у схильності до більш чи менш ризикованої поведінки; здатність людини працювати у стані втоми, емоційного стресу, психічної напруженості.

Звертаючи увагу на принципи ергономічної організації технологічних процесів перевезення на транспорті вважаємо доцільним відзначити необхідність забезпечення умов для розвитку особистості працівників у процесі виконання виробничої діяльності, що досягається на основі таких принципів: гармонічне поєднання фізичної та розумової праці; підвищення інтелектуального потенціалу співробітників, використання в галузі сучасних цифрових технологій та пристроїв; підвищення рівня професійної підготовки з врахуванням сучасних світових тенденцій у транспортній галузі.

Висновки. Технологічні процеси перевезень відбуваються при безпосередній взаємодії транспортних засобів і людини в умовах середовища руху, утворюючи відповідну систему, та здійснюються на основі принципів, дотримання яких уможливлює підвищення ефективності виконання операцій.

Організація технологічних процесів перевезення з використанням принципів ергономіки спрямована на підвищення ефективності системи «людина – машина – дорожній рух – природне середовище» та здійснюється на основі комплексної моделі, основними складовими якої виступають наступні принципи: проектування ергономічного робочого місця; облаштування ергономічних місць для пасажирів; формування системи заходів, спрямованих на безпечність праці та дорожнього руху; забезпечення умов для розвитку особистості людини в процесі роботи. Це спрямовано на досягнення певних ефектів (соціального, технічного, економічного та естетичного), збереження здоров'я працівника та забезпечення якомога безпечних умов праці та руху на дорозі.

Але практична реалізація такого підходу при організації технологічних процесів перевезення на транспорті потребує більш докладного аналізу стосовно впливу елементів робочого місця на стан здоров'я та працездатність водія з врахуванням сучасних тенденцій екологізації та цифровізації в транспортній галузі, що складає перспективи подальших досліджень.

Список літератури:

1. Державна служба України з питань праці. URL: https://dsp.gov.ua/stan-vyrobnychoho-travmatyzmu/ (дата звернення: 25.08.2022).

2. Брусенцов В.Г., Брусенцов О.В., Бугайченко І.І., Кисельова С.О. *Основи ергономіки:* Навч. посібник. Харків : УкрДАЗТ, 2011. 141 с.

3. Буров А.Ю. Эргономика на рубеже третьего тысячелетия. *Эргономика в Украине: человек-техника-среда*. 2000. С. 4–10.

4. Al Madani D., Dababneh A. (Rapid Entire Body Assessment: A Literature Review. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. No 9(1). P. 107-118. DOI: 10.3844/ajeassp.2016.107.118

5. Moradi M., Poursadeghiyan M., Khammar A., Hami M., Darsanj A., Yarmohammadi H. REBA method for the ergonomic risk assessment of auto mechanics postural stress caused by working conditions in Kermanshah (Iran). *Annals of Tropical Medicine and Public Health*. 2017. No 10(3). P. 589-594. DOI: 10.4103/ATMPH.ATMPH_107_17

6. Bejan A., Brosseau L.M., Parker D.L. Exposure assessment in auto collision repair shops. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene.* 2011. No 8. P. 401-408. DOI: 10.1080/15459624.2011.585117

7. Sukapto P., Cynthia F., Standiklaus S. Application of the REBA method to osh systems to increase work productivity (a case study at pt. eksonindo mpi, Bandung, Indonesia). *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019. No 10 (3). P. 3088–3098.

8. Subramanian S., Raju N., Srinivasan P., Jeganathan K., Jayaraman S. Low back pain assessment using surface electromyography among industry workers during the repetitive bending tasks. *International Journal of Human Factors and Ergonomics.* 2018. No 5(4). P. 277–292. DOI: 10.1504/IJHFE.2018.096112

9. Системологія на транспорті. Організація дорожнього руху / [авт. кол.: Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф., Доля В.К. та ін.] ; під ред. М.Ф. Дмитриченка. К. : Знання України, 2007. 452 с. (5 кн. / Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф., Доля В.К. та ін.; кн. 4).

10. Системологія на транспорті. Ергономіка / [авт. кол.: Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф., Доля В.К. та ін.] ; під ред. М.Ф. Дмитриченка. К.: Знання України, 2008. 256 с. (5 кн. /Гаврилов Е.В., Дмитриченко М.Ф., Доля В.К. та ін.; кн. 5).

11. Gao Y., Rasouli S., Timmermans H., Wang Y. Trip stage satisfaction of public transport users: A reference-based model incorporating trip attributes, perceived service quality, psychological disposition and difference tolerance. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2018. Vol. 118. P. 759–775. doi: 10.1016/j.tra.2018.10.029

12. Krystopchuk M. Je. Change of drivers functional condition while moving along highways of different technical categories. *Transport technologies*. 2020.Vol. 1. No 1. P. 22–32. doi: 10.23939/ tt2020.01.022

13. Ansari N.A., Sheikh M.J. Evaluation of work Posture by RULA and REBA: A Case Study. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2014. No 11(4). P. 18-23. DOI: 10.9790/1684-11431823

14. International Ergonomic Association URL: https://iea.cc (дата звернення: 25.08.2022).

15. Рамкова стратегія ЄС із безпеки та здоров'я на роботі на 2021–2027. URL: https://europa.eu/european-union/law/treaties_en3 (дата звернення: 25.08.2022).

16. Конспект лекцій з дисципліни «Основи ергономіки» для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» («Колісні та гусеничні транспортні засоби»). Частина 1 – змістовий модуль 1. Виникнення і розвиток дисципліни ергономіки. Антропометрія і машина. Загальна компоновка автомобіля; укл.: О.М. Артюх, О.В. Дударенко, А.Ю. Сосик, А.В. Щербина. Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. 82 с.

Petrenko O.I. PRINCIPLES OF ERGONOMIC ORGANIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF TRANSPORTATION BY TRANSPORT

The article explores the principles of ergonomic organization of technological processes of transportation in transport, aimed at maintaining the health of the employee and providing comfortable working conditions. It has been proved that the increase in the efficiency of technological processes is ensured by observing the principles of ergonomics at all levels and building activities taking into account ergonomic requirements for technology and labor organization. The analysis of the theoretical basis of ergonomic support for the organization of transportation was carried out and it was noted that such processes proceed from the anthropocentric concept and provide for the application of a systematic approach to the functional activity of a person, which makes it possible to coordinate internal (mental state, processes, emotions) and external (vehicle, movement) aspects. The methodological basis for such coordination is the organismic approach. It has been established that the technological processes of transportation occur with the direct interaction of vehicles and people in the conditions of the traffic environment, forming the system "man – technology – environment". The principles are characterized, the observance of which makes it possible to increase the efficiency of operations. Attention is focused on the fact that the organization of technological processes of transportation using the principles of ergonomics is aimed at improving the efficiency of the system "man – machine – traffic – natural environment". A model of ergonomic organization of technological processes of transportation is proposed. Attention is focused on its complexity. It has been proven that the most important components are: designing an ergonomic workplace (taking into account anthropometric, biomechanical and psychophysiological properties of a person, mental characteristics, operational space for technological operations); seats for passengers; formation of a system of measures aimed at labor and road safety; providing conditions for personal development in the work process. This is aimed at achieving certain effects (social, technical, economic and aesthetic), maintaining the health of the employee and ensuring safe working conditions and traffic on the road.

Key words: *ergonomics; principles of ergonomics; system; technological processes; transportation; transport.*

УДК 629.3.014.7+629.3.022.4
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/42

Petrov L.M.
Odesa Military academy

Kishianus I.V.
Odesa Military academy

Petryk Yu.M.
Odesa Military academy

STUDY OF THE FORCE LOAD OF A CAR WHEEL WHEN IT RUNS OVER AN OBSTACLE

The operational properties of the car system determine the car system's performance of its production functions (that is, the properties that determine the average speed of movement, fuel consumption, traffic safety, the ability to drive on and off various roads, and the like).

Qualified manufacturers define the main operational properties of the automotive system as dynamism, fuel economy, controllability, stability, smoothness of movement, passability, capacity, strength, reliability, durability, adaptability of the car to maintenance and repair, adaptability to loading and unloading operations.

The main characteristic of the automobile system from the point of view of accident-free operation is its dynamism, which is characterized by maximum speeds of straight-line movement in various road conditions, as well as the ability to quickly change the speed of movement and encounter an obstacle without an accident. The dynamics of the automobile system includes traction and braking dynamics. Traction dynamics is determined by the maximum speeds and accelerations of movement, and braking dynamics is determined by the ability to quickly reduce the speed of movement.

The article examines the dynamics of the movement of the car wheel of the car system and the interaction of the wheel drive of the truck with the obstacle of the supporting surface, which allows the process of moving the truck to be subordinated to the process of rolling directly through the resistance of the obstacle of the supporting surface. For this purpose, a physico-mathematical model of the movement of a car wheel through an obstacle of the support surface was proposed, which also corresponds to the movement of the wheel drive of a truck.

When developing a mathematical model, a theorem was used that describes the occurrence of a kinetic moment when a car wheel hits an obstacle on a support surface. Calculations and graphical dependencies were performed in the Excel environment. The results of these calculations showed the zone of the most effective operation of the wheel drive rolling with the help of rotary motion.

Key words: *car wheel, barrier, support surface, car, resistance, movement, rolling.*

Formulation of the problem. In world practice, the movement of car wheels through an obstacle of a support surface has not been solved in a justified way, and therefore the substantiation of the physical parameters of overcoming an obstacle with a car wheel is necessary.

Analysis of recent research and publications. New powerful trucks play a major role in increasing efficiency in the transportation of large volumes of cargo. New trucks must have increased energy density and work at higher speeds. For this, it is necessary to work out the constructive development of new technological solutions, as well as to substantiate the main parameters that are related to the rolling of the wheel drive of the car in adverse conditions.

When the undercarriage of a truck interacts with the ground, it deforms. The deformation remains in the form of a rut, as well as in the momentary deformation of the tire under the influence of solid fractions of the supporting surface. The possibility of movement, carrying out transportation and technological operations in conditions of weakly bearing supporting surfaces has a great impact on the development of the economy and infrastructure in these regions where the car is operated. Only a vehicle with a small pressure of the engines on the ground can move on a support base with a low bearing capacity.

The efficiency of truck operation in difficult road conditions is largely determined by their passability. The problem of the passage of trucks on supporting surfaces with low bearing capacity is solved mainly

by improving the design of the engines. In general, leading global companies that produce trucks make the following requirements for engines:

– maximum efficiency (increasing traffic flow and safety);

– versatility (possibility of use in a wide range of operating conditions);

– high traction and traction qualities;

– minimal traffic losses;

– rational interaction with the supporting surface from the point of view of preserving its ecology;

– qualitative indicators of manageability and stability;

– good elastic and shock-absorbing properties;

– good self-cleaning;

– high indicators of strength and reliability, sufficient wear resistance and durability;

– ease of use (simplicity and speed of installation, disassembly and repair of engines);

– light weight and low cost.

These requirements are met by pneumatic tires that complement the wheel drive of a truck. Pneumatic tires are one of the simplest and most effective means of increasing the passability of wheeled vehicles. By varying the main tire parameters (size, shape, number of layers, cord, material, internal pressure, pattern and depth of the tread) within wide limits, it is possible to change the coefficients of adhesion and rolling resistance, as well as the contact plane between the wheel drive and the support surface and, accordingly, the pressure on it.

Use of wheel drives allows you to provide trucks with high speeds and economical indicators.

The development of pneumatic wheel drives in the direction of increasing patency was the creation of highly elastic ultra-low pressure tires on the basis of existing wide-profile tires. Such ultra-low-pressure tires have a thin-walled rubber cord shell with a frame that is structurally composed of, as a rule, six of two layers of cord, thanks to which its high elasticity.

When rolling a wheel with a similar tire, the stress in the contact zone of this tire with the supporting surface is distributed very evenly both along the length and across the width of the contact with the supporting surface, reducing the ultimate load on the soil protrusions and preventing its destruction. When interacting with the soil, such a tire does not destroy its surface and acquires the ability (to flow around) unevenness of the road, and the protrusions and depressions of the tread repeat the profile of the road surface, perform the role of soil grips, increasing adhesion to the supporting surface [2, p. 46].

Highlighting previously unresolved parts of the overall problem. An assessment of the dynamics of complex cases of a car wheel encountering a moving obstacle is impossible without taking into account the processes that arise as a result of the load forces of the wheel drive. At the same time, for many automotive systems, the action of such a power load is not something a side phenomenon from which, if possible, they are freed, and a process that can and should be managed. Management is impossible without the development of an adequate mathematical model that reflects the main laws and characteristics of the collision process, which must be used.

Setting objectives. To develop a mathematical model of the rolling of the wheel drive of a truck using the equations of the influence of variable parameters on this process, for which calculations and graphical dependencies should be performed in the “Excel” environment. The results of these calculations should show the zone of the most effective rolling of the wheel drive with the help of the traction force compensator.

Presentation of the main research material. Road conditions are characterized by the parameters of the area in which the car is operated, the parameters of the support surface on which it moves, the stability of the state of the support surface, the intensity and organization of traffic. Some parameters of road conditions (those that determine the quality of the supporting surface) can be used in the design of cars and included in their operational characteristics, as well as in the development of individual units and components of the car.

When developing the structure, it is necessary to take into account the geometric parameters of the profile of the support surface, that is, the angles of ascents or descents and its physical and mechanical characteristics.

Consider the movement of a car wheel when it meets a moving obstacle (Fig. 1).

As a result of the collision of a car wheel with road damage, the rolling energy of the car wheel is transformed into the energy of its rolling over the barrier.

Let’s assume that the impact of a car wheel with an obstacle is inelastic and we neglect the road resistance. Also, let’s take it as a hypothesis that when a car wheel hits when crossing an obstacle, a momentary center of rotation appears, so-called

Calculation method. Angular speed of rotation of a car wheel when it moves over an obstacle.

To find the angular velocity, let’s turn to the theorem that describes the occurrence of a kinetic moment when a car wheel hits an obstacle [1, p. 335–353]:

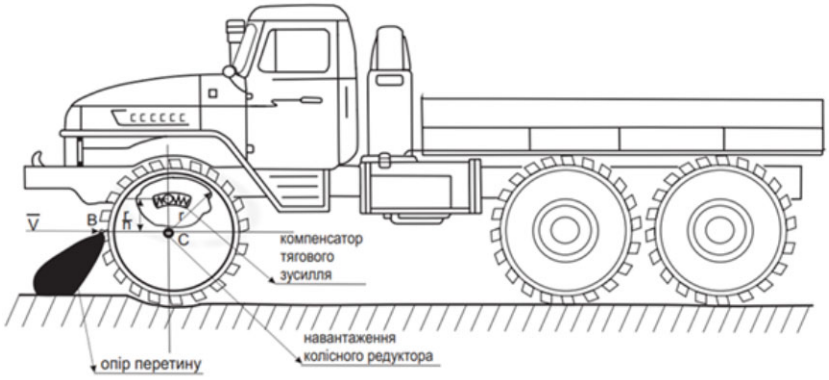


Figure 1. Scheme of the meeting of a car wheel with an obstacle

$$L_a - L_O = \sum M[S] \quad (1)$$

According to this theorem, during the impact of a car wheel relative to the instantaneous axis of rotation, the kinetic moment of the whole system "car wheel-obstacle" changes. At the suggestion of L. M. Petrov, we are introducing an innovative device "traction force compensator" into the automobile system – the wheel drive at the O point of the wheel drive disk.

The "car wheel-obstacle" system, which is loaded with a shock pulse (Fig. 2).

The equation of moments during the impact of a car wheel with an obstacle takes the form

$$L_a - L_O = \sum M[S_O] \quad (2)$$

Let's assume that during the impact the obstacle acquired a speed of V, then the kinetic moment relative to the O axis of the considered system takes the form:

$$L_O = \frac{P}{g} \cdot V \cdot \frac{r}{2} \quad (3)$$

After a car wheel collides with an obstacle, the car wheel will rotate with an angular velocity ω and the obstacle will move together with the car wheel (the impact is not elastic).

So

$$L_\Sigma = L_1 + L_2 \quad (4)$$

Since the axes of rotation are parallel, we determine the moment of inertia of a car wheel using the formula:

$$I_1 = \frac{Q}{g} \cdot \frac{r^2}{2} + \frac{Q}{g}\left(\frac{r}{2}\right)^2 \quad (5)$$

and the moment of inertia of the obstacle is determined by the formula:

$$I_2 = \frac{P}{g}(OB)^2 \quad (6)$$

Let's assume that point O is at a distance of r/2 from point C, then formula (4) takes the form presented in (7).

Substituting (5) and (6) into formula (4), we obtain the total kinetic moment of inertia of the system:

$$L_\Sigma = \frac{r^2}{4 \cdot g}(5 \cdot P + 3 \cdot Q) \cdot \omega \quad (7)$$

After substituting formula (3) into formula (7), the mathematical dependence for determining the angle speed of rotation of the "car wheel-obstacle" system takes the form:

$$\omega = \frac{2 \cdot P \cdot V}{(5 \cdot P + 3 \cdot Q)}$$

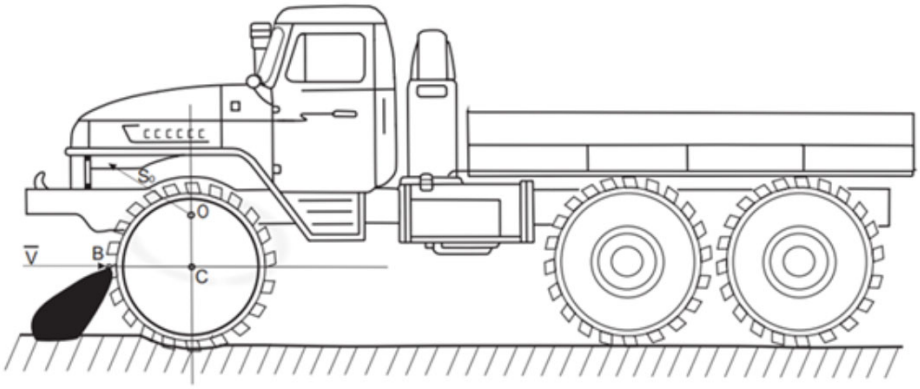


Figure 2. Loading of the "vehicle system-obstacle" with a shock pulse

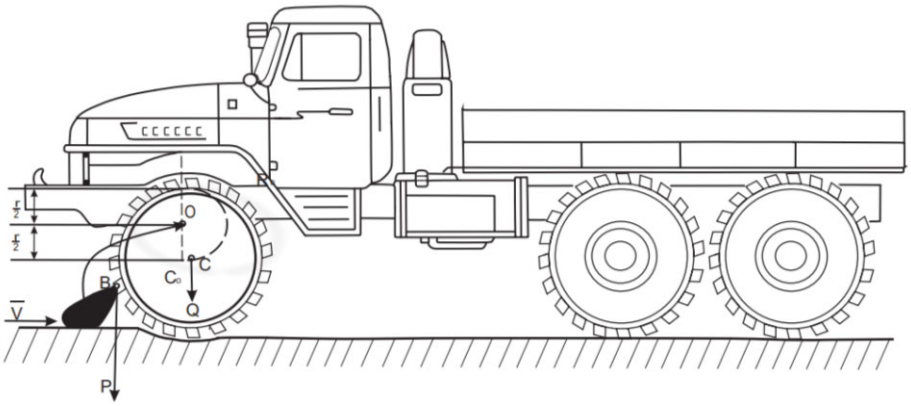


Figure 3. Diagram of the power load of a wheeled motor when rolling it over an obstacle

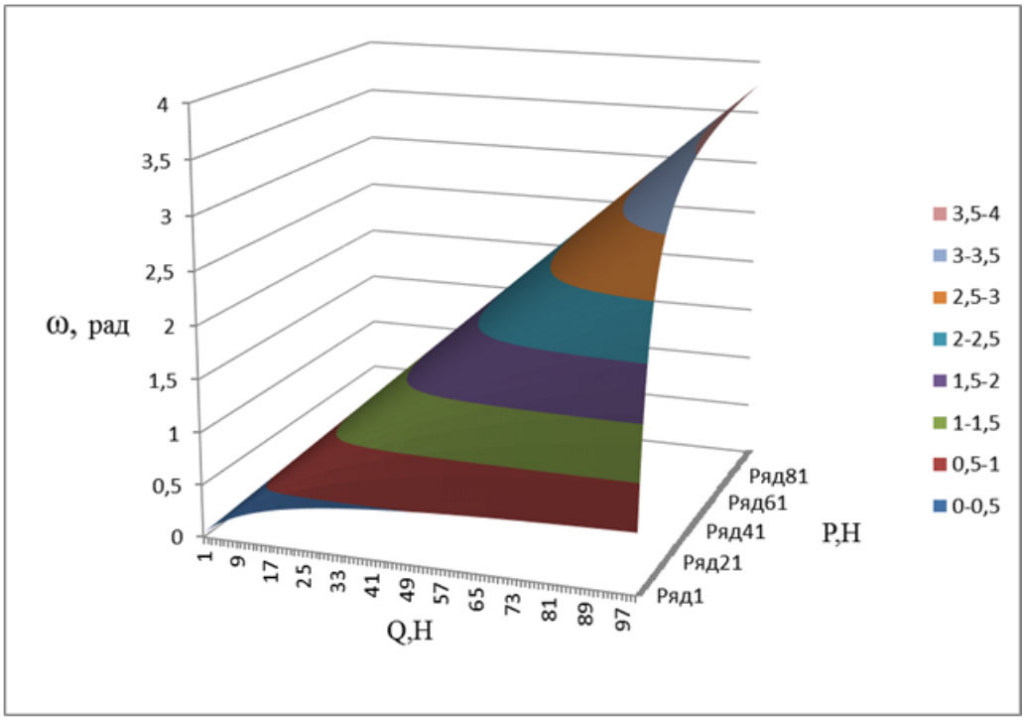


Figure 4. Dependence of the angular speed of rotation of the "Car wheel-obstacle" system on the weight of the car wheel Q and the collision force P of the car wheel with the barrier

The scheme of the power load of the wheeled motor when it rolls over the barrier is presented (Fig. 3).

Dependence of the angular speed of rotation of the "Car wheel-obstacle" system on the weight of the car wheel Q and the collision force P of the car wheel with the barrier (Fig. 4).

Conclusions and prospects for further research. According to the calculations, it can be concluded that the speed of rolling of a car wheel through an obstacle is more affected by the impact force than the weight of the car wheels The use of the innovative device "traction compensator" on the drive wheel effort" can significantly improve the dynamics of its rolling and reduce dynamic loads on automotive system as a whole.

Bibliography:

1. Айзенберг Т.Б., Воронков И.М. Осецкий В.М. Руководство к решению задач по теоретической механике. Издательство «Высшая школа». 1968. 420 с.

2. Бернацкий В. В. Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы. Москва : МГТУ «МАМИ», 2005. 48 с.

Петров Л.М., Кішянус І.В., Петрик Ю.М. ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ АВТОМОБІЛЬНОГО КОЛЕСА ПРИ ПЕРЕКОЧУВАННЯ ЇМ ЧЕРЕЗ ПЕРЕПОНУ

Експлуатаційні властивості автомобільної системи визначають виконання автомобільною системою своїх виробничих функцій (тобто властивості, що визначають середні швидкості руху, витрати палива, безпеку руху, можливість руху по різноманітних дорогах і поза ними та тому подібне). Основними експлуатаційними властивостями автомобільної системи кваліфіковані виробники визначають як то динамічність, паливна економічність, керованість, стійкість, плавність ходу, прохідність, місткість, міцність, надійність, довговічність, пристосованість автомобіля до технічного обслуговування і ремонту, пристосованість до вантажно-розвантажувальних робіт. Основною характеристикою автомобільної системи з точки зору безаварійної експлуатації є її динамічність, яка характеризується максимальними швидкостями прямолінійного руху в різноманітних дорожніх умовах, а також спроможністю швидкої зміни швидкості руху та безаварійну зустріч з перепоною. Динамічність автомобільної системи включає тягову і гальмівну динаміки. Тягова динаміка визначається максимальними швидкостями і прискореннями руху, а гальмівна динаміка – спроможністю швидкого зменшення швидкості руху.

У статті розглянуто динаміка руху автомобільного колеса автомобільної системи та взаємодії колісного рушія вантажного автомобіля з перепоною опорної поверхні, що дозволяє процес переміщення вантажного автомобіля підпорядкувати процесу перекочування безпосередньо через опір перепони опорної поверхні. З цією метою була запропонована фізико-математична модель руху автомобільного колеса через перепону опорної поверхні, що також відповідає руху колісного рушія вантажного автомобіля. При розробці математичної моделі використано теорему, яка описує виникнення кінетичного моменту під час удару автомобільного колеса у перепону опорної поверхні. Розрахунки та графічні залежності виконувались у середовищі «Excel». Результати по цим розрахункам показали зону найбільш ефективної роботи коченню колісного рушія за допомогою обертального руху.

Ключові слова: *автомобільне колесо, перепона, опорна поверхня, автомобіль, опір, рух, перекочування.*

УДК 656.614
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/43

Ярута А.М.
Харківський автотранспортний фаховий коледж

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ КОНТЕЙНЕРНИХ ВАНТАЖОПЕРЕВЕЗЕНЬ В ПОРТАХ СВІТУ: ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ

У статті досліджуються технологічні аспекти розвитку контейнерних вантажоперевезень в портах світу, встановлюються пов'язані з цими процесами проблеми та визначаються основні перспективи в цій сфері. Доведено, що процеси контейнеризації сприяють зростанню пропускної спроможності портів, підвищенню їх конкурентоспроможності та ефективності роботи галузі в цілому. Проаналізовано світові тенденції розвитку технології контейнеризації та сучасний стан глобального ринку морських контейнерних перевезень. Акцентовано увагу на ролі портів азіатських країн у морській торгівлі та судноплавстві, що пояснюється розташуванням в цьому регіоні найкрупніших портів світу (Шанхай, Сінгапур, Шеньчжень та інших).Зазначено, шо основні контейнерні перевезення здійснюються між портами Європи, Азії й США, де сконцентрована світова торгівля. Досліджено основні тенденції розвитку судноплавних ліній та відзначено тренди до їх укрупнення. За результатами аналізу встановлено тенденції до підвищення конкуренції між портами в сфері обслуговування лінійного судноплавства та визначено проблеми, з якими стикаються ці об'єкти інфраструктури. Основну увагу зосереджено на технологічному аспекті. Встановлено, що основні з них пов'язані з недостатнім розвитком портів, відповідної інфраструктури, нестачею технологічного оснащення, обладнання тощо. Серед основних виокремлено: неможливість приймання контейнеровози місткістю 18000-20000 TEU; ненадійність розкладу, що проявляється у порушенні графіків обслуговування; затримки доступу до портів, перевантаженість портових терміналів внаслідок нестачі причалів або кранів тощо. Спираючись на напрацювання лідерів галузі та запроваджені ними технологічні рішення, виокремлено ті, які, за умов належної адаптації, можуть скласти підґрунтя при формуванні перспективних напрямів розвитку портів – учасників логістичних ланцюгів глобальної транспортної системи, в тому числі і вітчизняних. Це дозволить підвищити ефективність технологічних операцій, пропускну спроможність, конкурентоспроможність морських портів та галузі в цілому.

Ключові слова: *контейнер, морські контейнерні перевезення, технологія контейнеризації, транспортні послуги, морський транспорт, транспортна галузь, морський порт.*

Постановка проблеми. Глобалізація, яка виступає однією з основних тенденцій сучасного світового розвитку, сприяла зростанню темпів міжнародної торгівлі, що, в свою чергу, вплинуло на підвищення ролі транспортної системи та значущості морських перевезень в цих процесах.

Так, понад 80% світової торгівлі і 70% доданої вартості здійснюється цим видом транспорту [1].

Однією з тенденцій розвитку вантажних перевезень у трансконтинентальному середовищі є їх контейнеризація, яка здійснюється прискореними темпами, демонструючи щорічне зростання на рівні 8–10% та сприяє збільшенню пропускної спроможності портів, підвищенню їх конкурентоспроможності та ефективності роботи галузі в цілому.

Серед основних факторів-стимулів для таких процесів слід відзначити: розвиток глобальних ланцюгів поставок та їх інтеграція; зростання світових транспортних потоків та питомої ваги мультимодальних перевезень; підвищення вимог до організації логістичних операцій та конкуренція в галузі.

Однак, такі процеси зумовлюють зміни в організації та технології перевезень генеральних вантажів, включаючи трансформації у сфері лінійного судноплавства.

На перспективність розвитку контейнерних перевезень як у світі, так і в Україні, справедливо звертається увага і в ряді досліджень [2; 3, с. 5]. Але це потребує пошуку ефективних технічних, технологічних і організаційних рішень.

Слід зауважити, що світові лідери портової галузі мають певні напрацювання в сфері контейнеризації та вдосконалення пов'язаних з цим технологічних процесів, що дозволяє залучати та переробляти додаткові обсяги контейнерних вантажопотоків, сприяє підвищенню конкуренто-

спроможності галузі та країн в цілому на світовому ринку транспортних послуг.

Отже, актуалізується потреба у дослідженні сучасних проблем розвитку контейнерних вантажоперевезень в портах світу та технологічних новацій, які запроваджуються в діяльність світовими лідерами галузі і представляють інтерес для розвитку вітчизняних морських портів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та практичні аспекти розвитку вантажних морських перевезень, в тому числі їх технологічна складова, знаходяться в полі зору як зарубіжних, так і вітчизняних науковців.

Так, в роботах [3; 4] приділено увагу формуванню технологічних схем перевезення вантажів морським транспортом, досліджено специфіку доставки різних вантажів.

Автори ряду досліджень акцентуються на різних технологічних рішеннях, спрямованих на розвиток мультимодальних перевезень [5]; розглядають питання, пов'язані зі світовим фрахтовим ринком, підкреслюючи роль контейнеризації в них [6; 7]; досліджують проблеми, які мають місце в глобальних ланцюгах поставок та пов'язані з транспортуванням вантажних потоків контейнерними суднами і переробкою в портах світу [8; 9]; пропонують різні підходи до підвищення ефективності таких процесів та технологій [10; 11].

Слід констатувати, що на значущості контейнеризації та необхідності її розвитку в Україні акцентовано увагу на рівні держави [12]. А окремим технологічним аспектам розвитку контейнерних вантажних перевезень морськими суднами приділяється увага в документах міжнародних організацій. Серед них: Міжнародна організація портів і гаваней (*International Ports and Harbors Association – IAPH*) [13]; Конференція ООН з торгівлі та розвитку (*United Nations Conference on Trade and Development – UNCTAD*) [1].

Але, зважаючи на динамічність інноваційних процесів на ринку логістичних послуг, зростання конкуренції, технологічні аспекти розвитку морських контейнерних перевезень потребують подальших досліджень, що дозволить розглянути проблему під різними кутами, з врахуванням досвіду лідерів галузі, підвищити ефективність транзитного потенціалу України та конкурентоспроможність вітчизняних морських портів

Постановка завдання. Метою статті є дослідження технологічних аспектів розвитку контейнерних вантажоперевезень в портах світу, встановлення пов'язаних з цими процесами проблем та визначення основних перспектив в цій сфері.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як свідчать результати досліджень, світові тенденції розвитку технології контейнеризації позитивно позначилися і на роботі портів (рис.1), вплинувши на збільшення їх пропускної здатності на 5–5,5 %, і оптимістичним прогнозом подальшого зростання до 978 млн TEU у 2025 р.

Однак, карантинні обмеження внаслідок пандемії COVID-19 посилили невизначеність у глобальних ланцюгах постачань (через нестабільність ринку судноплавства і морської торгівлі), спричинили збій в них, призупинення технологічних операцій і, навіть, закриття портів, що призвело до заторів, збільшення часу обороту контейнерів, негативно позначившись на функціонуванні галузі, скоротивши пропускну можливість таких об'єктів у 2020 р. на 3,4 %.

Зазначимо, що значну роль у морській торгівлі та судноплавстві відіграють порти азіатських країн, які забезпечують 64% світового обсягу морських контейнерних перевезень та знаходяться на перших дев'яти сходинках рейтингу найкрупніших портів. При цьому основні з них знаходяться в Китаї: Шанхай, Сінгапур, *Нінбо-Чжоушань та інші* (табл. 1).

Необхідно акцентувати увагу на тому, що позитивні тенденції, які намітились в світовій економіці у 2021 р., позначились і на технологічних процесах лідерів портової галузі, зростанні їх пропускної спроможності (окрім порту Гонконг).

Зазначимо, що у 2021 р. світовий флот торгових контейнерних суден мав потужність дедвейту

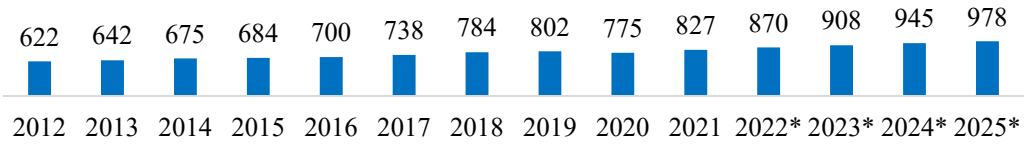


Рис. 1. Пропускна здатність контейнерних портів світу в динаміці (млн TEU)

* прогноз

Джерело: побудовано за даними [14; 15]

Таблиця 1

Вантажообіг найкрупніших контейнерних портів світу

№	Порт	Вантажообіг, млн TEU			Темп приросту (2021 до 2020), %
		2019	2020	2021	
1	Шанхай (Shanghai), КНР	43,3	43,5	47,0	8,1
2	Сінгапур (Singapore)	37,2	36,9	37,5	1,6
3	*Нінбо-Чжоушань (*Ningbo-Zhoushan*), КНР*	27,5	28,7	31,1	8,4
4	*Шеньчжень (*Shenzhen*), КНР*	25,8	26,5	28,8	8,7
5	Гуанчжоу (Guangzhou Harbor), КНР	23,2	23,2	24,2	4,3
6	Циндао (Qingdao), КНР	18,3	22,0	23,7	7,7
7	Пусан (Busan), Республіка Корея	22,0	21,8	22,8	4,6
8	*Тяньцзинь (*Tianjin*), КНР*	17,3	18,4	20,3	10,3
9	Гонконг (Hong Kong), КНР	21,0	18,0	17,8	-1,2
10	Роттердам (Rotterdam), Нідерланди	14,4	14,3	15,3	7,0

Джерело: побудовано та розраховано за даними [1; 16]

близько 282 млн т. (5360 контейнеровозів) [18], демонструючи тенденцію зростання вантажопідйомності.

В свою чергу, збільшення розмірів суден вплинуло на структуру контейнерного флоту та сприяло зростанню ефективності транспортування, але, одночасно, змусило термінальних операторів розширювати потужності і модернізувати операції, підвищило вимоги до портової інфраструктури.

Слід вказати, що сьогодні приймати та обробляти контейнеровози місткістю 18000-20000 TEU здатна лише невелика кількість портів. Серед них: Циндао, Пусан, *Нінбо-Чжоушань,* Шанхай, Гамбург, Антверпен, Роттердам, Сінгапур, Гданськ та інші.

Експерти зазначають [9, с.109; 11, с.463], що обмеженнями для суден виступають охват і висота кранів, а також осадка терміналів. Така ситуація спричинила підвищення попиту на контейнеровози меншої потужності, які дозволяють знижувати витрати на паливо. Отже, на зміну контейнеровозам класу E прийшли нові – класу Triple E, які є повільнішими, але більш екологічними та економічними. Крім того, зменшується кількість суден, які будуються з власним перевантажувальним обладнанням на борту, що є позитивним для портів через відсутність альтернатив для їх техніки на контейнерному терміналі в процесах перевантаження.

Дослідження судноплавних ліній дозволило виокремити певні тренди щодо їх укрупнення. Топ-10 світових операторів контейнерних перевезень (за кількістю суден), які забезпечують 82,3% світового ринку, очолює APM-Maersk (Данія) (рис. 2), друге посіла Mediterranean Shg Co (Швейцарія), третє – CMA CGM Group (Франція).

Слід констатувати, що основні контейнерні перевезення здійснюються між портами Європи, Азії й США, де сконцентрована світова торгівля.

Серед основних маршрутів виділяються такі: Азія й Далекий Схід – Тихоокеанське узбережжя США/Канади; Азія – Європа (без портів Середземного моря); Азія – Середземномор'я; Азія – східне (Атлантичне) узбережжя Північної Америки; Азія – субконтинент (Індія, Пакистан, Бангладеш); Європа – Середземномор'я; – Східна Азія – Північно-Східна Азія; Східна Азія – Пів-

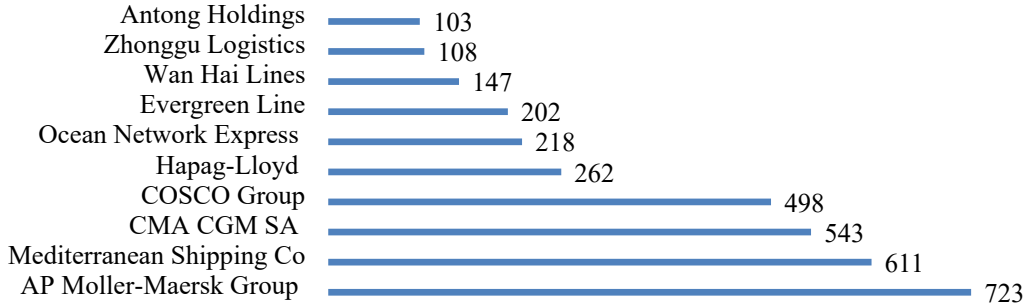


Рис. 2. ТОП-10 світових операторів контейнеровозів (станом на липень 2021 р.), кількість суден

Джерело: побудовано за даними [14]

денно-Східна Азія; Європа – Північна Америка (Атлантичне узбережжя); Далекий Схід – Середній Схід [4, с.53].

При проектуванні мереж враховується попит вантажовідправників (потреби частоти, прямої доступності та часу транзиту). Проте, значною проблемою при формуванні складних мереж лінійного обслуговування виступає ненадійність розкладу, що проявляється у порушенні графіків обслуговування через низку причин (погодні умови, затримки доступу до портів, перевантаженість портових терміналів порту внаслідок нестачі причалів або кранів тощо).

При цьому, через значну інтеграцію лінійних служб, затримка в одному каскаді портів протягом усього лінійного обслуговування, позначається на діяльності інших портів, призводячи до порушення відповідних графіків навіть там, де спочатку затримки біли відсутніми.

Так, дослідники відзначають, що, наприклад, в Азії та Європі згідно з графіком працюють лише 49,1% суден; на глобальному рівні своєчасно здійснюються лише 45,8% викликів з порту; 19,8% запізнюються на один день, а 25,2% – на два дні і більше. 10,2% викликів з порту надходять за день до або раніше [1; 13].

Аналіз ситуації на світовому ринку морських контейнерних перевезень дозволив встановити підвищення конкуренції між портами в сфері обслуговування лінійного судноплавства. Але, разом з тим, зростання контейнерного сегменту викрило ряд проблем, пов'язаних з розвитком портів, відповідної інфраструктури та технологій.

Зазначимо, що світові лідери галузі мають певні напрацювання та технологічні рішення, які, за умов адаптації, можуть скласти підґрунтя при формуванні пріоритетних напрямів розвитку портів – учасників логістичних ланцюгів глобальної транспортної системи, в тому числі і вітчизняних. А саме:

– оптимізація графіків заходів та обробки суден задля мінімізації простоїв, оптимізації часу перебування у портах;

– оптимізація процесу постановки суден до причалу і термінів перевантажувальних робіт; розвиток контейнерних терміналів (технологічне переоснащення, днопоглиблювальні роботи);

– автоматизація обробки контейнерів в терміналах із застосуванням сучасних логістичних технологій. Наприклад, автоматизованої систем обробки контейнерів, яка працює у режимі реального часу, та, базуючись на модульних програмних технологіях, працює з використанням технологій штрих кодів, радіопередачі даних, системи позиціонування перевантажувальної техніки, що дозволяє підвищити ефективність операцій в порту;

– розповсюдження ініціативи добровільного зниження швидкості суден, що долають трансатлантичні переходи (vessel speed reduction program – VSR), яка полягає в тому, що суднам рекомендовано з метою зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище не перевищувати 12 вузлів на підходах до 40-ка мильної берегової зони (при гарантіях порту щодо постановки судна до причалу в межах узгодженого з судновласником графіку);

– розвиток порту як логістичного центру, який, наряду з базовими, пропонує широкий спектр логістичних послуг. При цьому більшість портових операцій (митне оформлення, консолідація, огляд санітарними службами) здійснюються в припортовій зоні, де функціонує цей центр у прямій взаємодії з портом. На території порту здійснюється обслуговування готових вантажних місць, що дозволяє оптимізувати використання його території та прискорити оформлення вантажів;

– запровадження інтелектуальних портових технологій, що дозволять підвищити рівень сервісу, безпеки та пришвидшити обслуговування в портах. Серед основних з них: роботизовані та дистанційно керовані вантажно-розвантажувальні системи; інтернет речей; штучний інтелект; хмарні комп'ютерні сервіси; безпілотні транспортні засоби та обладнання; технологія блокчейн (Blockchain);

– запровадження сучасних технологій контейнерного обігу операторами контейнерних ліній, що дозволить уникнути дисбалансу тари для організації транспортування, знизити ризики простою тари в портах, оптимізувати витрати на транспортування (наприклад, технолоії Round Trip).

Висновки. Однією з тенденцій розвитку вантажних перевезень у трансконтинентальному середовищі є їх контейнеризація, яка здійснюється прискореними темпами.

Результати аналізу ситуації на світовому ринку морських контейнерних перевезень та технологічних аспектів питання дозволили встановити підвищення конкуренції між портами в сфері обслуговування лінійного судноплавства, але, разом з тим, викрили ряд проблем, пов'язаних з розвитком портів, відповідної інфраструктури та технологій.

Спираючись на напрацювання лідерів галузі та запроваджені ними технологічні рішення, виокремлено ті, які, за умов адаптації, можуть скласти підґрунтя при формуванні пріоритетних напрямів розвитку портів – учасників логістичних ланцюгів глобальної транспортної системи, в тому числі і вітчизняних. Однак, слід звернути увагу, що запровадження цих заходів потребує більш докладного технічного опрацювання та формування механізмів реалізації за кожними з них, що складає перспективи подальших досліджень.

Список літератури:

1. Review of Maritime Transport 2021. URL: https://unctad.org/en/ PublicationsLibrary/rmt2019_en.pdf (дата звернення: 20.12.2021).

2. Chuprina E., Zahorodnia Y., Petrenko O., Britchenko I, Goretskyi O. Specific characteristics of seaports development in the context of digitalization: international experience and conclusions. *International Journal of Agricultural Extension.* Special Issue 01 Issues of Legal Regulation in Agrarian and Tourism Space. URL: https://esciencepress.net/journals/ index.php/IJAE/article/view/3879 DOI: 10.33687/ijae.010.00.3879. (дата звернення: 19.09.2022).

3. Brouer B. D., Karsten C. V., Pisinger D. Optimization in liner shipping. *A Quarterly Journal of Operations Research*. 2017. № 15(1). P. 1–35. doi: 10.1007/s10288-017-0342-6

4. Організація транспортного процесу та управління роботою флоту на міжнародному ринку транспортних послуг в умовах глобалізації міжнародного судноплавства: монографія / [авт.кол. : Шибаєв О.Г., Савельєва І.В., Кириллова О.В. та ін.]. Одеса: КУПРІЄНКО СВ, 2015. 171 с.

5. Прокудін Г.С., Чупайленко А.А., Дудник О.С., Прокудін О.Г., Омаров Д.М. Модель організації мультимодальних вантажних перевезень у міжнародному сполученні. *Вісник Національного транспортного університету.* 2016. № 1 (34). С. 397–406.

6. Слободян В.В. Актуальні проблеми розвитку контейнерних перевезень в Україні. *Приазовський економічний вісник.* 2019. Вип. 5(16). С. 29–36. doi: 10.32840/2522-4263/2019-5-5

7. Окороков А.М. Аналіз перспектив розвитку ринку контейнерних перевезень в Україні. Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. Серія «Транспортні системи та технології перевезень». 2015. Вип. 10. С. 98–104. URL: http:// tstt.diit.edu.ua/article/viewFile/57075/pdf_70

8. Підлісний П. І., Паткевич Н. О., Цвєтов Ю. В. Роль контейнеризації змішаних вантажних перевезень у розвитку світової торгівлі. *Економічний форум.* 2016. № 3. С. 67–81.

9. De Langen P.W., van der Lugt L.M. Institutional reforms of port authorities in the Netherlands; the establishment of port development companies. *Research in Transportation Business & Management.* March 2017. Vol. 22. Pp. 108–113.

10. Котенко А.М., Крашенінін О.С., Шапатіна О.О. Удосконалення процесу комбінованих перевезень вантажів. *Східно-Європейський журнал передових технологій.* 2014. № 4/3(70). С. 4–8

11. Kibik O., Khaiminova I., Kotlubay V., Redina I., Belous E. Development potential of Ukrainian maritime enterprises. *International Journal of Engineering & Technology.* 2018. № 7(4.3). P. 461-466.

12. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: Розпорядження КМУ від 30.05.2018 р. № 430-р URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-р#Text (дата звернення 07.05.2022).

13. Global ports survey on the implementation of electronic data exchange to conform with the IMO Convention on Facilitation of International Maritime Traffic. URL: https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/IAPH-FAL-Survey-Report-Jan-2021.pdf (дата звернення: 20.09.2022).

14. Statista. Офіційний сайт. URL: https://www.statista.com/ (дата звернення 20.09.2022).

15. 15. Containerized Trade Outlook by GTAS Forecasting – March 2022. URL: https://ihsmarkit.com/research-analysis/containerized-trade-outlook-by-gtasforecasting-march-2022.html/ (дата звернення 20.09.2022).

16. Hafen Hamburg. Top 20 Containerhäfen. URL: https://www.hafen-hamburg.de/en/statistics/ (дата звернення 20.09.2022).

17. The world's leading container ship operators as of April 30, 2022, based on TEU capacity. URL: https://www.statista.com/statistics/198214/total-teus-ofworldwide-leading-container-ship-operators-in-2011/ (дата звернення 20.09.2022).

Yaruta A.M. CURRENT PROBLEMS AND PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT OF CONTAINER FREIGHT TRANSPORTATION IN WORLD PORTS: TECHNOLOGICAL ASPECT

The article analyzes the technological aspects of the development of container cargo transportation in the ports of the world, identifies the problems associated with these processes, and determines the main prospects in this area. It has been proven that containerization processes contribute to the growth of port throughput,

increase their competitiveness and the efficiency of the industry as a whole. The world trends in the development of containerization technology and the current state of the global maritime container transportation market are analyzed. Attention is focused on the role of the ports of Asian countries in maritime trade and shipping, which is explained by the location in this region of the world's largest ports (Shanghai, Singapore, Shenzhen, etc.). It was noted that the main container transportation is carried out between the ports of Europe, Asia and the USA, where world trade is concentrated. The main trends in the development of shipping lines have been studied and trends towards their enlargement have been noted. Based on the results of the analysis, an increase in competition between ports in the field of liner shipping services was noted and the problems faced by these infrastructure facilities were identified. The main focus is on the technological aspect. It has been established that the main ones are related to the development of ports, the corresponding infrastructure, the lack of technological equipment, equipment, etc. Namely: the impossibility of receiving container ships with a capacity of 18,000-20,000 TEU; unreliability of the schedule, which manifests itself in the violation of service schedules; delay in access to ports, congestion of port terminals due to lack of berths or cranes, etc. Based on the achievements of industry leaders and the technological solutions they have implemented, those that, with proper adaptation, can be taken as a basis for the formation of promising areas for the development of ports – participants in the logistics chains of the global transport system, including domestic ones, are identified. This will improve the efficiency of technological operations, throughput, competitiveness of seaports and the industry as a whole.

Key words: *container, maritime container transportation, containerization technology, transport services, maritime transport, transport industry, seaport.*

БУДІВНИЦТВО

УДК 625.7/8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/44

Арінушкіна Н.С.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Грищенко Т.М.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СПОСОБІВ РЕГЕНЕРАЦІЇ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ

Дорожня галузь на даному етапі розвитку знаходиться в досить важкій ситуації, оскільки транспортно-експлуатаційний стан переважної більшості автомобільних доріг є незадовільним. В статті проведений аналіз основних способів ремонту автомобільних доріг та акцентована увага на сучасні технології гарячого та холодного ресайклінгу асфальтобетону.

Присутність пластичних деформацій, що проявляються на асфальтобетонних покриттях у вигляді колій та напливів, руйнувань у вигляді лущення, що спричиняє зменшення товщини шару покриття, а також сіток тріщин та інших дефектів вказують на перспективність застосування в Україні технології холодного ресайклінгу асфальтобетонних покриттів.

Одна з найважливіших наукових проблем удосконалення технології ремонтних робіт – вивчення особливостей процесів структуроутворення матеріалів і розробка на цій основі методів їх спрямованого регулювання технологічними впливами.

Незалежно від способу виконання ремонтних робіт технологічні впливи можна розділити на три групи: механічні, фізичні та хімічні.

Найважливішою особливістю процесів формування структури матеріалів при ремонті дорожніх одягів є комплексний характер технологічних впливів. Тому теоретичною основою наукових досліджень з удосконалення технології ремонтів автомобільних доріг на основі спрямованого регулювання процесів структуроутворення може служити фізико-хімічна механіка дисперсних систем.

Існуючі способи ремонтів дорожніх одягів за характером перебігу технологічних процесів і обумовлених ними особливостей структуроутворення матеріалів можна умовно розділити на дві великі групи; нарощування шарів та регенерація.

Важливим показником нової технології є продуктивність або швидкість ремонту покриття.

По ресурсозбереженню метод холодного ресайклінгу не має собі рівних, бо не передбачає використання великої кількості нових матеріалів, а відповідно мінімізує транспортні витрати. Цей метод дозволяє ефективно використовувати матеріали старого дорожнього одягу. Усунення тріщин у старих шарах при холодному ресайклінгу виключає їх відображення у покритті. Проведення дорожньобудівельних робіт без розігрівання старого матеріалу завдає мінімальної шкоди навколишньому середовищу [1, 2].

Ключові слова: *способи регенерації, автомобільна дорога, асфальтобетонне покриття, фрезерування, регенерація, технологія гарячого та холодного ресайклінгу асфальтобетону.*

Постановка проблеми. Збільшення обсягів ремонту дорожніх покриттів, викликає необхідність удосконалення технологій ремонту, що застосовуються. Способи ремонту доріг можна умовно розділити на дві великі групи: нарощування шарів та регенерація.

У наші дні значного поширення набувають нові технології ремонту, які передбачають обробку або переробку матеріалу дорожнього одягу, що ремонтується, які передбачають використання додаткових органічних та мінеральних матеріалів в порівняно невеликих обсягах. Згідно нової технології існуючий матеріал дорожньої конструкції, використовується більш ефективно. Економічні розрахунки свідчать, що застосування регенерованого асфальтобетону може дати значну економію грошових та матеріальних коштів, а також стати додатковим джерелом покриття дефіциту у мате-

ріаліах, що особливо актуально для України [1, 2].

Аналіз останніх досліджень. Питанням удосконалення технології ремонту асфальтобетонних покриттів, дослідженням причин, утворенням та механізмам розвитку дефектів, а також формуванням структури асфальтобетону під час ремонту, присвячені роботи провідних науковців дорожньої галузі. Ці дослідження свідчать, що умови роботи дорожнього одягу з асфальтобетонним покриттям значно визначаються: фізико-хімічними процесами, що протікають в асфальтобетоні, механічними – внаслідок впливу динамічних навантажень та погодно-кліматичними факторми. Внаслідок комплексного впливу перерахованих факторів відбуваються якісні зміни характеристик дорожнього покриття в процесі експлуатації. Досвід експлуатації дорожніх одягів, відремонтованих за способом нарощування шарів, свідчить про те, що однією з основних причин передчасного повторного руйнування є незадовільне міжшарове зчеплення на межі нового влаштованого матеріалу з ремонтованою поверхнею [3, 4, 5, 6].

Методи ремонту покриттів, що ґрунтуються на використанні нових матеріалів, майже повністю виключають використання старого асфальтобетону.

Найбільш ефективним методом поліпшення транспортно-експлуатаційного стану автомобільних доріг є регенерація асфальтобетонних покриттів.

Мета роботи. Технології регенерації шарів дорожнього одягу з бітумомінеральних сумішей поділяються на два основні види: гарячі та холодні. Вибір того чи іншого способу регенерації залежить від стану конструктивних шарів дорожнього одягу.

Результати досліджень. У процесі експлуатації під дією атмосферних факторів і транспортних навантажень в асфальтобетоні відбувається інтенсивне старіння бітуму, розпадаються мінеральні матеріали та накопичуються втомні пошкодження. У результаті на покритті утворюються викришування, тріщини, вибоїни, хвилі, напливи, колії. За значного погіршення експлуатаційного стану покриттів у них зберігається до 60-90 % корисної маси асфальтобетону.

Під регенерацією розуміють відновлення початкових властивостей асфальтобетонних сумішей.

Способи регенерації асфальтобетонних шарів дорожніх одягів, умовно поділяють на чотири групи: просочення покриття складом, що омолоджує; вирівнювання при нагріванні; фрезерування та розламування матеріалу покриття з видаленням та подальшою його переробкою та укладанням. Першу групу способів застосовують у профілактичних цілях, другу – головним чином для усунення нерівностей і поверхневих дефектів, а третю і четверту – переважно для відновлення міцності окремих шарів покриття і дорожнього одягу в цілому.

Регенерація асфальтобетонних покриттів просочуванням «омолоджувальними» сумішами – профілактичний захід, за допомогою якого відновлюється якість існуючого бітуму. Для просочення застосовують матеріали, основу яких становлять масла, що містять велику кількість ароматичних сполук. Вуглецевий склад просочувального матеріалу підбирають для відновлення кількості легких фракцій бітуму, втрачених ним у процесі старіння. Просочення підвищує пластичність асфальтобетону, сповільнює появу на покритті тріщин і викришування, збільшує термін його служби.

За кордоном у якості «омолоджувальних» сумішей найбільш поширені рідини на основі катіонних емульсій. В Україні для цього застосовують різні відходи промислового виробництва до складу яких входять масла [2].

Регенерацію старого асфальтобетонного покриття виконують двома основними способами: з повторним застосуванням старого асфальтобетону, який пройшов регенерацію в заводських умовах, та з повторним застосуванням старого асфальтобетону, який пройшов регенерацію безпосередньо на місці будівництва.

Вибір того або іншого способу залежить від якості старого асфальтобетону та економічної доцільності.

Переробка старого асфальтобетону на заводі трудомісткий та енергоємний процес, який потребує будівництва спеціальних цехів, використання спеціального обладнання для регенерації старого асфальтобетону та великих транспортних витрат щодо переміщення фрезерованого матеріалу і зворотнього транспортування.

Регенерацію асфальтобетону в заводських умовах виконують, коли необхідно усунути дефекти не тільки верхнього але і нижнього шару покриття. Цей спосіб застосовується при незадовільній якості матеріалу покриття та при необхідності видалення великої кількості матеріалу внаслідок значних руйнувань покриття підвищеної товщини. Однією з основних операцій цього способу є видалення дефектного шару покриття гарячим або холодним фрезеруванням.

Попередньо фрезерований асфальтобетон поступає на АБЗ, де зберігається в штабелях до його переробки. Переробку старого асфальтобетону

виконують в спеціальних змішувачах. Найбільш трудомісткою операцією є нагрівання знятого матеріалу без погіршення властивостей старого бітуму та без утворення великої кількості диму.

У випадку холодного або гарячого фрезерування покриття необхідне додаткове подрібнення та просіювання матеріалу для отримання асфальтового грануляту.

Процес виготовлення регенерованої асфальтобетонної суміші виконується по заданій програмі. Готова суміш з температурою 140–160 °С вивантажується в накопичувальний бункер або в кузов автомобілів-самоскидів та транспортується до місця укладання, та влаштовується за традиційною технологією.

Відновлення асфальтобетонного покриття безпосередньо на дорозі виконується за допомогою спеціального агрегату або набору агрегатів, які забезпечують переробку та укладання суміші.

Існуючі способи регенерації асфальтобетонних шарів на дорозі ділять на дві групи:

– з попереднім розігріванням асфальтобетону;

– без попереднього розігрівання асфальтобетону.

Регенерація асфальтобетону на дорозі з попереднім розігріванням включає п′ять наступних технологій [3,5,7].

Метод з додаванням пластифікатору. Вирівнювання під час нагрівання з пластифікацією полягає в тому, що в розпушену нагріту суміш у процесі перемішування вводять пластифікатор, з метою уповільнення появи відбитих тріщин, для відновлення властивостей застарілого бітуму, поліпшення ущільнення старого розпушеного асфальтобетону та збільшення терміну служби відремонтованого покриття. Пластифікатор застосовується також у вигляді емульсій різних типів.

Основними технологічними операціями даного методу є: розпушування асфальтобетону, введення пластифікатору, розподіл суміші по ширині покриття, планування та ущільнення;

Метод без додавання нової суміші. Регенерацію асфальтобетонних покриттів без додавання нової суміші виконують на ділянках з пластичними деформаціями, що виникли через застосування в асфальтобетоні недостатньо в’язкого бітуму. У процесі нагрівання під дією кисню та температури, бітум окислюється і його в’язкість підвищується, що поліпшує зсувостійкість асфальтобетону.

Покриття розігрівають за допомогою блоку пальників інфрачервоного випромінювання до температури 100–160 °С на поверхні, та температури 50–60 °С на глибині 3 см. Покриття розпушують на глибину 3–4 см, перерозподіляють суміш по ширині покриття, планують і ущільнюють його. Після регенерації без додавання нової суміші необхідне влаштування поверхневої обробки;

Метод з додаванням нової суміші, без перемішування зі старою. Спосіб термоукладання передбачає відновлення покриття з додаванням нової суміші, яка укладається на розпушену суміш старого покриття. При термоукладанні відновлюється рівність і шорсткість покриття та виправляється поперечний профіль. Укладання нової суміші ведеться в єдиному технологічному процесі однією машиною: розігрівання та розпушування асфальтобетону, попереднє ущільнення, додавання нової суміші, розрівнювання та ущільнення.

Даний спосіб застосовується тільки при відсутності деформацій у шарах дорожнього одягу що розташовані нижче.

Загальна товщина покриття повинна бути не менше 80 мм, а товщина шару що регенерується на 10 мм більше максимальної глибини розпушування. Виконання робіт допускається при температурі повітря не нижче плюс 5 °С. Ці роботи виконує машина Репейвер фірми Віртген (ФРГ);

Метод «ремікс» – розпушена стара асфальтобетонна суміш перемішується з новою. Цим способом також усуваються ті ж дефекти і руйнування дорожнього покриття. За допомогою даного способу, поліпшуються фізико-механічні властивості старої асфальтобетонної суміші. Для вибору нового складу суміші з урахуванням властивостей старого асфальтобетону з покриття відбирають керни, досліджують суміш та проектують новий склад з урахуванням існуючих матеріалів і в’яжучих.

Послідовність технологічних операцій: розігрівання, розпушування старої суміші з додаванням нової та змішування. Весь процес протікає в єдиному технологічному циклі на місці проведення робіт з допомогою машин фірми Віртген (нагрівальна установка та Реміксер).

Перемішування нової суміші з розігрітим покриттям дає змогу отримати однорідну суміш, в якій рівномірно розподілені частинки старого асфальтобетону та нової суміші. Регенерація покриття з додаванням та перемішуванням нової суміші забезпечує вищу якість ремонту.

Метод «ремікс-плюс» − під час процесу термозмішування влаштовується додатковий шар з нової суміші. Розподільний шнек, який заванта-

жується транспортером, укладає на реміксований матеріал шар нової суміші. Ущільнення виконується одночасно.

Останнім часом в Україні знаходить поширення технологія холодного фрезерування старих асфальтобетонних покриттів та застосування асфальтобетонного грануляту як матеріалу для влаштування нижніх шарів дорожнього одягу на дорогах з низькою інтенсивністю руху, або як компонент гарячих асфальтобетонних сумішей [6, 8, 9, 10].

Ця технологія забезпечує «омонолічування» старих розтрісканих бітумомінеральних шарів, і вирішує проблему утворення відбитих тріщин і руйнувань безпосередньо на дорозі.

Згідно з закордонним досвідом, проведення всіх робіт безпосередньо на дорозі, без розігрівання старого асфальтобетонного покриття, дозволяє знизити витрати на підсилення дорожнього одягу в 1,2–1,5 рази, у порівнянні з традиційною технологією. Введення в рецикльований асфальтобетонний гранулят в'яжучого забезпечує зростання міцності. Вид в'яжучого впливає на міцність покриття. Додавання емульсії знижує тертя між гранулами при ущільненні суміші, зменшується показник залишкової пористості та водонасичення і зростає міцність бетону з рециклькованого асфальтобетонного грануляту.

При використанні цементу, спостерігається збільшення показника залишкової пористості та істотно зростає міцність за рахунок часткового заповнення порожнин цементним каменем, когезія якого вище за когезію асфальтобетонного розчину, який входить до складу грануляту. Як і для цементного бетону, з часом міцність покриття з такого матеріалу зростає [11].

У випадку одночасного використання для зміцнення рециклькованого асфальтобетонного грануляту мінерального (цемент) та органічного в'яжучого (бітумна емульсія), баланс коагуляційно-кристалізаційних зв'язків переміщується на користь перших. При додаванні цементу зберігається міцність матеріалу та прискорюється формування його структури за рахунок зв'язування частини води. За своєю структурою бетон із рециклькованого асфальтобетонного грануляту близький до великоуламкових грунтів, укріплених комплексним в'яжучим.

Регенерація асфальтобетону на дорозі без попереднього розігрівання може виконуватися наступними методами [4]:

1) Метод ремонту асфальтобетону на дорозі холодним способом полягає в холодному фрезеруванні дефектного шару покриття, навантаженні видаленого матеріалу в пересувний змішувач, перемішуванні завантажених матеріалів та укладанні нового шару із регенерованого матеріалу.

Цей метод застосовується при відновленні ділянок з великою і однорідною товщиною покриття, де ефективність фрезерування на велику глибину забезпечує економічність методу.

2) Ресайклінг − з додаванням в'яжучого. В залежності від товщини шарів дорожнього одягу, подрібнення матеріалу виконують на всю товщину, якщо вона менше 50 мм або пошарово, якщо більше 50 мм. Холодний ресайклінг може виконуватися з додаванням бітумної емульсії та цементу одночасно. При проведенні робіт пошарово валик із подрібненого матеріалу відсувають і ті ж самі операції виконують з нижче розташованими шарами. Матеріал верхніх шарів в зворотньому порядку повертають із валиків в корито, розрівнюють та ущільнюють.

3) Рециклювання − з додаванням нових матеріалів. Виконується холодне фрезерування покриття, а при необхідності частково і основи, підгрунтовка основи, додавання щебеню, чорного щебеню, відфрезерованого матеріалу, органічного або мінерального в'яжучого (цементу, бітумної емульсії або комплексного в'яжучого), а також регенеруючих добавок, перемішування компонентів, розподілення та ущільнення суміші. Щільність шару після ущільнення повинна бути максимальною. При ущільненні товстих шарів -ущільнення виконується спочатку вібраційними котками, потім котками на пневматичних шинах, а на заключній стадії –гладковальцевими котками. При ущільненні тонких шарів – спочатку застосовують котки на пневматичних шинах, після чого ущільнення здійснюється гладковальцевими котками з вимкненим вібратором. Усі операції повинні виконуватися на дорозі, в суху погоду при температурі повітря не нижче плюс 10 °С.

Після ущільнення необхідно влаштовувати захисний шар, який виключатиме вплив погодних факторів та транспортного потоку.

Для реалізації технології рециклювання шарів дорожнього одягу безпосередньо на дорозі з використанням бітумної емульсії або спіненого бітуму розроблена велика кількість різноманітних машин – від механізмів укріплення грунтів до комплекту, який виконує фрезерування, подрібнення, перемішування і укладання з попереднім ущільненням рециклькованого матеріалу. Комплект може складатися з декількох машин, які працюють на певній відстані одна від одної або представляють собою одну машину, що виконує

всі операції. Існує велика кількість можливих комбінацій машин, що відрізняються за вартістю і характером робіт, які вони можуть виконувати, потужністю та якістю готової продукції.

Висновки. За допомогою холодного рециклювання покриттів на дорозі можливе: повторне використання старих матеріалів існуючих покриттів, забезпечення однорідності покриття, зниження обсягу відходів та зменшення видобутку матеріалів з кар'єрів, відновлення окремих смуг дороги з значними руйнуваннями покриття, зниження незручностей, пов'язаних з роботою транспорту, зниження витрат на відновлення зношених покриттів, відсутність необхідності після рециклювання підсипання укріплених узбіч.

Незважаючи на те що при рециклюванні на дорозі спостерігається підвищена неоднорідність, у порівнянні з новими сумішами, можливе утворення поздовжніх тріщин, більш тривалий час відновлення в порівнянні з улаштуванням захисних шарів перекриття з асфальтобетонної суміші, метод холодного ресайклінгу може бути успішно застосований для переведення перехідних дорожніх одягів у полегшені, а полегшених – у капітальні. Для покращення властивостей регенерованої суміші особливу увагу необхідно приділити обгрунтуванню призначення в'яжучого.

Перевагою технології холодного ресайклінгу можно вважати використання новітньої техніки з допомогою якої існує можливість підвищити швидкість та якість виконання робіт. У екологічному відношенні дана технологія є більш привабливою, так як має менший негативний вплив на навколишнє середовище.

За даною технологією зменшується дальність переміщення матеріалів, вартість робіт. В теперішній час вона може бути надзвичайно актуальною в Україні.

Список літератури:

1. Стороженко М. С. Формирование и повышение технического уровня городских автомобильных дорог. Киев : УМК ВО, 1989. 92 с.

2. Прусенко Є.Д. Постійні пристрої на автомобільному транспорті: навч. посіб. Київ: ІСДО, 1994. 216 с.

3. Савенко В.Я., Ілляш С.І., Терещенко Т.А. Класифікація технологій гарячого ресайклінгу дорожнього асфальтобетону методами «in place». Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 105. 2019. С. 13–22.

4. Справочная енциклопедия дорожника. Том 2. Ремонт и содержание автомобильных дорог / Под ред. проф. А.П. Васильева, Москва : 2004. 1129 с.

5. Дорожні покриття. Рециклювання дорожніх одягів: посібник з гарячого рециклювання асфальтобетону зі старих покриттів на заводі. Ч. 3 / за заг. ред. В.К. Жданюка і Д. Сибільського. Харків : ХНАДУ, 2006. 52 с.

6. Дорожні покриття. Рециклювання дорожніх одягів: посіб. з холодного рециклювання дорожніх одягів із використанням бітумної емульсії або спіненого бітуму. Ч. 2 / за заг. ред. В.К. Жданюка і Д. Сибільського. Харків : ХНАДУ, 2006. 76 с.

7. Терещенко, Т.А. Шляхи розвитку технологій гарячого ресайклінгу дорожнього асфальтобетону. *Автошляховик України*. 2014. № 2. С. 42–48.

8. Ільченко В.В. Відновлення дорожніх одягів із застосуванням технології холодного фрезування. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава: ПолтНТУ, 2006. Вип. 18. С. 135–138.

9. ДСТУ 8978:2020. Настанова з улаштування шарів дорожнього одягу за технологією холодного ресайклінгу. [Чинний від 2021-01-05]. Київ, 2020. 17 с.

10. Сасько М.Ф., Копинець І.В. Переваги і недоліки застосування технології холодного ресайклінгу. *Автошляховик України*. 2011. № 1. С. 33–39.

11. Дорожні покриття. Рециклювання дорожніх одягів: посібник з холодного рециклювання дорожніх одягів безпосередньо на дорозі із використанням цементу. Ч. 1 / за заг. ред. В.К. Жданюка і Д. Сибільського. Харків : ХНАДУ, 2004. 105 с.

Arinushkina N.S., Grishchenko T.M. ANALYSIS OF MODERN METHODS OF REGENERATION ROAD PAVEMENT

The road industry at this stage of development is in a very difficult situation, as the transport and operational condition of the vast majority of roads is unsatisfactory. The article analyzes the main ways of repairing roads and focuses on modern technologies of hot and cold recycling of asphalt concrete.

The presence of plastic deformations on asphalt pavements in the form of tracks and inflows, destruction in the form of peeling, which reduces the thickness of the coating layer, as well as cracks and other defects indicate the prospects of cold recycling technology in Ukraine asphalt pavements.

One of the most important scientific problems of improving the technology of repair work is the study of the peculiarities of the processes of structure formation of materials and the development on this basis of methods of their directed regulation by technological influences.

Regardless of the method of repair work, technological impacts can be divided into three groups: mechanical, physical and chemical.

The most important feature of the processes of forming the structure of materials in the repair of pavement is the complex nature of technological influences. Therefore, the theoretical and chemical mechanics of dispersed systems can serve as a theoretical basis for scientific research to improve the technology of road repairs on the basis of targeted regulation of structural processes.

Existing methods of repairing pavements by the nature of the technological processes and the resulting features of the structure of materials can be divided into two major groups; layer building and regeneration.

An important indicator of new technology is the performance or speed of repair of the coating.

In terms of resource conservation, the method of cold recycling has no equal, because it does not involve the use of a large number of new materials, and thus minimizes transport costs. This method allows you to effectively use the materials of old pavement. Elimination of cracks in the old layers during cold recycling eliminates their reflection in the coating. Carrying out road construction works without heating the old material causes minimal damage to the environment.

Key words: *methods of regeneration, highway, asphalt pavement, milling, regeneration, technology of hot and cold recycling of asphalt concrete.*

УДК 624.137.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/45

Єсакова С.В.
Харківський національний університет будівництва та архітектури

Чепурний Д.О.
Харківський національний університет будівництва та архітектури

РОЗРАХУНОК ГОРИЗОНТАЛЬНО НАВАНТАЖЕНИХ ПАЛЬ, ЗАТИСНУТИХ У РОСТВЕРК, З УРАХУВАННЯМ ТРИВАЛОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ

У зв'язку з будівництвом будівель та споруд у стиснених умовах міст, а також складними інженерно-геологічними умовами, відбувається суттєве зростання використання пальових фундаментів та пальових огороджувальних конструкцій котлованів. Крім того, пальові опори є найпоширенішою конструкцією мостів, спортивних, торгових та інших споруд.

Особливість роботи паль у зазначених умовах полягає в тому, що, крім вертикальних навантажень, на палі передаються найчастіше значні поперечні навантаження, що суттєво ускладнюють роботу системи «паля-ґрунт». Вперше «Посібник із проектування пальових фундаментів» (далі «Керівництво») [6], що містить вказівки з врахуванням горизонтальних та моментних навантажень, з'явився в 1980 році.

Потім було видано СНиП 2.02.03-85 [7], а у 2011 році з'явився ДБН В.2.1.10-2009 Зміна № 1 [3], у яких, як і раніше, рекомендована розрахункова модель основи з жорсткістю, що лінійно зростає за глибиною. Однак, за ці роки накопичилися нові експериментально-теоретичний дослідження, що дозволяють істотно скоригувати положення чинних норм, а крім того, у ряді випадків отримувати економніші або надійніші споруди.

Повзучість Вінклерової основи призводить до нерівномірної зміни контактної напруги фундаментів і горизонтально навантажених паль, а також до нерівномірного зростання деформацій конструкцій у часі. Нормативна методика не враховує впливу тривалості поперечного навантаження паль на зміну їх напружено-деформованого стану в часі.

Ключові слова: *горизонтально навантажені палі, деформування, ростверк, горизонтальний тиск, напружено-деформований стан.*

Постановка проблеми. В даний час розроблено велику кількість методів, що дозволяють визначати горизонтальні переміщення палі, розподіл згинальних моментів та поперечних сил за її довжиною. Більшість методів ідеалізує ґрунтове середовище у вигляді тієї чи іншої моделі, хоча є й група суто емпіричних методів. Головну роль роботі системи «горизонтально навантажена паля-ґрунт» у стадії експлуатації грає прийнята модель ґрунтової основи, оскільки жорсткісні характеристики самої палі зазвичай можуть при горизонтальних переміщеннях голови палі, що допускаються, визначатися за законами опору матеріалів.

Необхідно виявити модель ґрунтового середовища, що більш достовірно описує її взаємодію з поперечно навантаженою палею, і розробити методику розрахунку системи «паля-грунт» з врахуванням впливу навантаження у часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільшого поширення набув метод, розроблений К.С. Завр'євим та Г.С. Шпіро [4], включений до «Керівництва» [6], СНиП 2.02.03-85 [7] і використовуваний рядом авторів. У запропонованому методі розглянуто основу з лінійно зростаючим коефіцієнтом постелі за можливих граничних умов, введено поняття умовної ширини палі, що дозволило враховувати просторову роботу ґрунту; розроблені таблиці значень коефіцієнта пропорційності K в залежності від характеристик ґрунту та виду паль, розроблена методика розрахунку пальових ростверків при впливі горизонтальних та моментних навантажень.

В основу методу покладено рішення тонких підпірних стінок І.В. Урбана [8], який, використовуючи рівняння методу початкових параметрів, отримав формули для визначення переміщень, кутів повороту, згинальних моментів та поперечних сил при трикутній епюрі коефіцієнта постелі.

Для обліку просторової роботи палі у роботі К.С. Завр'єва та Г.С. Шпіро [4] введена умовна ширина палі, рівна:

для $d \le 1$ м

$$b_p = k_ф \cdot (1.5 \cdot d + 0.5);$$

для $d > 1$ м

$$b_p = k \cdot k_ф \cdot (d + 1).$$

де $k_ф$ – коефіцієнт, що враховує форму поперечного перерізу палі;

k – коефіцієнт, що враховує взаємний вплив паль;

d – ширина поперечного перерізу палі, м.

Основний розрахунковий ґрунтовий параметр – коефіцієнт пропорційності K, дорівнює тангенсу кута нахилу епюри коефіцієнта постелі Тобто коефіцієнт постелі на глибині z дорівнює $C_z = K \cdot z$ і визначається за результатами випробувань натурних паль на горизонтальне навантаження. Методика розрахунку передбачає, що палі та ґрунт ідеально пружні тіла, і тому залежність між навантаженням та переміщеннями виявляється лінійною. При невеликих (до 1 см) переміщення голови палі розрахунки за зазначеною методикою дають хороше наближення до експериментальних даних; проте при переміщеннях, що перевищують 1 см, виходить інша картина, так як теоретична залежність «навантаження – переміщення» лежатиме вище експериментальної.

Н.Х. Арутюнян [1], С.С. В'ялов [2], І.Є. Прокопович [5], розглядаючи вирішення плоскої задачі при дії поверхневих сил, дійшли дуже важливого висновку про те, що вплив фактору часу безпосередньо позначається лише на величині переміщень, що наростають. Напружений стан при $\mu_t = \text{const}$ зберігається відповідним пружно-миттєвим рішенням і змінюється тільки при зміні в часі зовнішнього навантаження.

Масштабні дослідження повзучості ґрунту та циклічного завантаження горизонтально навантажених паль у ґрунтах різного типу. E. Conte, A. Troncone, M. Vena [10], Spyros Giannakos, Nikos Gerolymos, George Gazetas [11], Alam Singh, Shamsher Prakash [9] підтверджують виникнення пластичних деформацій розрахунком у програмах із використанням кінцево-елементної моделі.

Формулювання цілей статті. Для розрахунку конструкцій, що контактують з основою яка має реологічні властивості: повзучість основи призводить до зниження її жорсткості під навантаженням, викликаючи перерозподіл контактних напруг, і, як наслідок, зміну напруженого стану основи в часі.

Існуючі нормативні дані про величини коефіцієнта пропорційності K отримані в основному при дії короткочасного статичного навантаження. Наприклад, у ДБН [3] дано коефіцієнти пропорційності, визначені як січені до кривої «навантаження-переміщення» в точці, де переміщення голови палі дорівнює $y_0 = 1$ см.

Нормативна методика не враховує впливу тривалості поперечного навантаження паль на зміну їх напружено-деформованого стану в часі. Це потребує проведення подальших досліджень.

Основний матеріал. Повзучість Вінклерової основи призводить до нерівномірної зміни контактної напруги фундаментів і горизонтально навантажених паль, а також до нерівномірного зростання деформацій конструкцій у часі.

У початковий момент навантаження конструкції зв'язок між контактним тиском і осадкою деякої точки підошви фундаменту V_0 описується елементарною лінійною залежністю типу закону Гука

$$V_0 = \frac{\sigma_0}{C_0},$$

де σ_0 – контактна напруга, тс / м ^{2};

C_0 – коефіцієнт постелі, тс/м ^{3}.

При тривалому навантаженні фундаментів (паль) на основі, що має реологічні властивості, зв'язок V_t величин C_t і σ_t істотно ускладнюється та описується інтегральними рівняннями низки теорій пружно-повзучого тіла (старіння, спадковості та ін.), що враховують закони зміни контактних напружень та властивостей матеріалів у часі.

Що стосується загальноприйнятої моделі основи з лінійно зростаючим пружно-миттєвим коефіцієнтом постелі $C_0{}^z$, представимо закон деформування ґрунту при тривалому завантаженні, використовуючи передумови теорії «старіння» у вигляді [1]

$$y_t{}^z = \frac{\sigma_t{}^z}{C_0{}^z \cdot b_p} + \frac{(\sigma_0{}^z + \sigma_t{}^z)}{2 \cdot C_0^z \cdot b_p} \varphi_t, \qquad (1)$$

де

$$C_0{}^z = K \cdot z; \qquad (2)$$

φ_t – характеристика повзучості основи;

b_p – розрахункова ширина палі, м;

K – пружно-миттєвий коефіцієнт пропорційності, тс / м ^{4};

$\sigma_0{}^z$, $\sigma_t{}^z$ – навантаження від палі на одиницю довжини основи в довільний момент часу $\tau = (0, t)$, тс/м^2.

Представимо вихідне диференціальне рівняння вигину палі при тривалому навантаженні у такому вигляді

$$EI \cdot \frac{\partial^4 y_t^z}{\partial z^4} + \sigma_t{}^z = 0, \qquad (3)$$

потім з (1) знайдемо $\sigma_t{}^z$:

$$\sigma_t{}^z = \frac{2 \cdot C_0{}^z \cdot b_p \cdot y_t{}^z - \sigma_0{}^z \cdot \varphi_t}{2 + \varphi_t}. \qquad (4)$$

Підставивши (4) в (3), отримаємо вихідне рівняння вигину палі

$$\frac{\partial^4 y_t^z}{\partial z^4} + \frac{2\cdot K\cdot b_p}{(2+\varphi_t)\cdot EI}\cdot z\cdot {y_t}^z = \frac{\varphi_t\cdot b_p}{(2+\varphi_t)\cdot EI}\cdot {\sigma_0}^z \quad (5)$$

Здійснивши заміну змінної, після низки перетворень знайдемо

$$\frac{\partial^4 y_t^{\overline{z}}}{\partial \overline{z}^4} + \overline{z_t}\cdot {y_t}^{\overline{z}} = \frac{\varphi_t\cdot\beta_t}{2\cdot K\cdot b_p}\cdot {\sigma_0}^{\overline{z}} \quad (6)$$

де

$$\beta_t = \sqrt[5]{\frac{2\cdot K\cdot b_p}{(2+\varphi_t)\cdot EI}};\ \overline{z_t} = \beta_t\cdot z.$$

Пружно-миттєве рішення для паль, затиснених у ростверк, відповідно до «Керівництва» [6], може бути отримано із загального випадку завантаження палі на рівні поверхні силою Q_0 і моментом M^0 при рівності нулю кута повороту φ^0 на початку координат.

Однак, в даному випадку, рішення $t=0$ можна спростити.

Використовуючи рішення І.В. Урбана [8], при $\varphi^0=0$ отримаємо в пружній стадії

$$\left.\begin{aligned} y^z &= y^0\cdot A_1^z + \frac{M^0}{\beta_0^2\cdot EI}\cdot C_1^z + \frac{Q^0}{\beta_0^3\cdot EI}\cdot D_1^z;\\ -\frac{\varphi^z}{\beta_0} &= y^0\cdot A_2^z + \frac{M^0}{\beta_0^2\cdot EI}\cdot C_2^z + \frac{Q^0}{\beta_0^3\cdot EI}\cdot D_2^z;\\ \frac{M^z}{\beta_0^2\cdot EI} &= y^0\cdot A_3^z + \frac{M^0}{\beta_0^2\cdot EI}\cdot C_3^z + \frac{Q^0}{\beta_0^3\cdot EI}\cdot D_3^z;\\ \frac{Q^z}{\beta_0^3\cdot EI} &= y^0\cdot A_4^z + \frac{M^0}{\beta_0^2\cdot EI}\cdot C_4^z + \frac{Q^0}{\beta_0^3\cdot EI}\cdot D_4^z. \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Приймаючи для нижнього кінця палі умову $Q^H = 0$; $M^H = 0$, із двох нижніх рівнянь (7) отримуємо

$$\left.\begin{aligned} M^0 &= -\frac{Q^0}{\beta_0}\cdot V^H;\\ y^0 &= \frac{Q^0}{\beta_0^3\cdot EI}\cdot T^H, \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

де V^H, T^H – нові функції, що залежать від довжини палі H.

$$\left.\begin{aligned} V_0^H &= \frac{A_3^H\cdot D_4^H - A_4^H\cdot D_3^H}{A_3^H\cdot C_4^H - A_4^H\cdot C_3^H};\\ T_0^H &= \frac{C_3^H\cdot D_4^H - C_4^H\cdot D_3^H}{A_3^H\cdot C_4^H - A_4^H\cdot C_3^H}. \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

Таким чином, з (9) маємо можливість знайти $M^{\max 0}$ і $y^{\max 0}$, а $\varphi^0 = 0$ і $Q^{\max 0}$ задані як початкові параметри.

Далі із системи (7) та (8) знайдемо величини деформацій та зусиль у пружній стадії

$$\left.\begin{aligned} y^z &= \frac{Q^0}{\beta_0^3\cdot EI}\cdot (A_1^z\cdot T_0^H - C_1^z\cdot V_0^H + D_1^z);\\ -\varphi^z &= \frac{Q^0}{\beta_0^2\cdot EI}\cdot (A_2^z\cdot T_0^H - C_2^z\cdot V_0^H + D_2^z);\\ M^z &= \frac{Q^0}{\beta_0}\cdot (A_3^z\cdot T_0^H - C_3^z\cdot V_0^H + D_3^z);\\ Q^z &= Q^0\cdot (A_4^z\cdot T_0^H - C_4^z\cdot V_0^H + D_4^z). \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Тоді розподіл контактних напруг у пружній стадії, відповідно до закономірності (2) та рішення (10), визначається залежністю

$${\sigma_0}^z = \beta_0\cdot\overline{z}\cdot Q^0\cdot (A_1^z\cdot T^H - C_1^z\cdot V^H + D_1^z), \quad (11)$$

де

$$\beta_0 = \sqrt[5]{\frac{K\cdot b_p}{EI}},\ \overline{z} = \beta_0\cdot z.$$

Відповідно до виразу (11) вихідне диференціальне рівняння (6) отримає такий вигляд

$$\frac{\partial^4 y(\overline{z},t)}{\partial \overline{z}^4} + \overline{z_t}{y_t}^x = \frac{\phi_t}{2K\cdot b_p}\beta_0\beta_t\cdot\overline{z}\cdot Q_0(A_1^z\cdot T^H - C_1^z\cdot V^H + D_1^z). \quad (12)$$

Рішенням цього рівняння є сума окремого рішення «*u*» та загального рішення «*s*».

Окреме рішення шукаємо у вигляді

$$u = r_1\cdot A_1^0 + r_2\cdot C_1^0 + r_3\cdot D_1^0. \quad (13)$$

Диференціюючи (13), отримуємо

$$\frac{\partial^4 u}{\partial z^4} = r_1\cdot (A_1^0)^{IV} + r_2\cdot (C_1^0)^{IV} + r_3\cdot (D_1^0)^{IV}. \quad (14)$$

Використовуючи функції І.В. Урбана [8], можна показати, що існує співвідношення:

$$\frac{\partial^4 u}{\partial z^4} = -\beta_0\cdot z\cdot (r_1\cdot A_1^0 + r_2\cdot C_1^0 + r_3\cdot D_1^0), \quad (15)$$

а з використанням окремого рішення (13), рівняння (12) набуває наступної форми

$$\begin{aligned} &(\beta_t - \beta_0)(r_1\cdot A_1^0 + r_2\cdot C_1^0 + r_3\cdot D_1^0) = \\ &= \frac{\phi_t}{2K\cdot b_p}\beta_0^2\cdot\beta_t\cdot Q_0(A_1^0\cdot T^H - C_1^0\cdot V^H + D_1^0). \end{aligned} \quad (16)$$

Прирівнюючи коефіцієнти при функціях початкового навантаження A_1^0, C_1^0 і D_1^0 знайдемо значення коефіцієнтів r_i, а потім і окреме рішення

$$u = \frac{\phi_t}{2\cdot K\cdot b_p}\cdot\frac{\beta_0^2\cdot\beta_t}{(\beta_t-\beta_0)}\cdot Q_0\cdot (A_1^0\cdot T^H - C_1^0\cdot V^H + D_1^0). \quad (17)$$

Далі представимо загальне рішення однорідного рівняння (12) (без правої частини) у вигляді

$$s = N_1\cdot A_1^t + N_2\cdot C_1^t + N_3\cdot D_1^t. \quad (18)$$

На підставі (17) та (18) запишемо рівняння (6)

$$\begin{aligned} y(\overline{z},t) &= N_1A_1^t + N_2C_1^t + N_3D_1^t + \\ &+ \frac{\phi_t\cdot\beta_0^2\cdot\beta_t}{2K\cdot b_p(\beta_t-\beta_0)}\cdot Q^0\cdot (A_1^0T^H - C_1^0V^H + D_1^0). \end{aligned} \quad (19)$$

Довільні постійні отримаємо, використовуючи граничні умови

при $z = 0$: $y'(0,t) = 0; y'''(0,t) = \frac{Q^0}{EI}$;

при $z = H$: $y'^{(H,t)} = 0; y'''(H,t) = 0$.

При цьому врахуємо, що:

$A_2 = A_1'; A_3 = A_2'; A_4 = A_3'; B_2 = B_1'; \ldots; D_4 = D_3'$.

Відомо, що функції І.В. Урабана при $z = 0$ дорівнюють нулю, крім чотирьох, які дорівнюють одиниці:

$$A_1(0) = B_2(0) = C_3(0) = D_4(0) = 1.$$

Далі, диференціюючи рівняння (19) та використовуючи граничні умови, отримаємо систему рівнянь для визначення N_i.

За відсутності повороту на місці затискання палі в ростверк умова $y'(0,t) = 0$ задовольняється автоматично.

З умови $y'''(0,t) = \frac{Q^0}{EI}$ знаходимо

$$\beta_t^3 \cdot N_3 + \frac{\varphi_t \cdot \beta_0^5 \cdot \beta_t}{2 \cdot K \cdot b_p \cdot (\beta_t - \beta_0)} \cdot Q^0 = \frac{Q^0}{EI},$$

звідси

$$N_3 = \frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot \left[1 + \frac{\varphi_t \cdot \beta_t}{2 \cdot (\beta_0 - \beta_t)}\right]. \quad (20)$$

Далі, використовуючи умови роботи нижнього кінця палі, отримаємо з (19) систему рівнянь із двома невідомими N_1 та N_2

$$\left.\begin{aligned} N_1 \cdot A_{3_t}^H + N_2 \cdot C_{3_t}^H = \frac{\varphi_t}{2 \cdot \beta_0 \cdot \beta_t \cdot (\beta_0 - \beta_t) \cdot EI} \cdot Q^0 \cdot \left(A_{3_0}^H \cdot T_0^H - \right. \\ \left. - C_{3_0}^H \cdot V_0^H + D_{3_0}^H\right) - N_3 \cdot D_{3_t}^H; \\ N_1 \cdot A_{4_t}^H + N_2 \cdot C_{4_t}^H = \frac{\varphi_t}{2 \cdot \beta_t^2 \cdot (\beta_0 - \beta_t) \cdot EI} \cdot Q^0 \cdot \left(A_{4_0}^H \cdot T_0^H - \right. \\ \left. - C_{4_0}^H \cdot V_0^H + D_{4_0}^H\right) - N_3 \cdot D_{4_t}^H. \end{aligned}\right\} \quad (21)$$

Звернемо увагу на те, що відповідно до рішення (10), при $z = H$ функції, що стоять у дужках системи рівнянь (21), звертаються в нуль, а система спрощується до вигляду

$$\left.\begin{aligned} N_1 \cdot A_{3_t}^H + N_2 \cdot C_{3_t}^H = -N_3 \cdot D_{3_t}^H; \\ N_1 \cdot A_{4_t}^H + N_2 \cdot C_{4_t}^H = -N_3 \cdot D_{4_t}^H. \end{aligned}\right\} \quad (22)$$

Це дозволяє, з урахуванням (20), знайти довільні постійні N_1 та N_2

$$\left.\begin{aligned} N_1 = \frac{\left(D_{4_t}^H \cdot C_{3_t}^H - D_{3_t}^H \cdot C_{4_t}^H\right)}{\left(A_{3_t}^H \cdot C_{4_t}^H - A_{4_t}^H \cdot C_{3_t}^H\right)} \cdot \frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)}\right]; \\ N_2 = \frac{\left(D_{3_t}^H \cdot A_{4_t}^H - D_{4_t}^H \cdot A_{3_t}^H\right)}{\left(A_{3_t}^H \cdot C_{4_t}^H - A_{4_t}^H \cdot C_{3_t}^H\right)} \cdot \frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)}\right], \end{aligned}\right\} \quad (23)$$

де

$$\lambda = \frac{\beta_0}{\beta_t} = \sqrt[5]{1 + \frac{\varphi_t}{2}}.$$

Відповідно до отриманого вище рішення (9), (10), вирази для довільних постійних (20) спростяться і будуть мати такий вигляд

$$\left.\begin{aligned} N_1 = \frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot T_t^H \cdot \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)}\right]; \\ N_2 = -\frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot V_t^H \cdot \left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)}\right], \end{aligned}\right\} \quad (24)$$

де функції T_t^H та V_t^H визначаються за формулою (9) при $\beta = \beta_t$;

Використовуючи отримані перетворення, запишемо рішення рівняння (19) у вигляді:

$$y(z,t) = \frac{Q^0}{\beta_t^3 \cdot EI} \cdot \left\{\left[1 + \frac{\varphi_t \cdot \beta_t}{2 \cdot (\beta_0 - \beta_t)}\right] \cdot \right.$$
$$\left. \cdot \left(A_{1_t}^z \cdot T_t^H - C_{1_t}^z \cdot V_t^H + D_{1_t}^z\right) \cdot \lambda^3 - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot \right. \quad (25)$$
$$\left. \left(A_{1_0}^z \cdot T_0^H - C_{1_0}^z \cdot V_0^H + D_{1_0}^z\right)\right\}.$$

З (25) можна отримати максимальні переміщення за $z = 0$.

$$y(0,t) = \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot \left\{\left[1 + \frac{\phi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)}\right] \cdot \lambda^3 \cdot T_t^H - \frac{\phi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot T_0^H\right. . \quad (26)$$

Враховуючи, що значення функцій T_0^H і T_t^H відрізняються незначною мірою, можемо наближено записати через $T_{cp} = \frac{T_0^H + T_t^H}{2}$:

$$y(0,t) \approx \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot T_{cp}^H \cdot \left[\lambda^3 + \frac{\varphi_t}{2} \cdot (\lambda^2 + \lambda + 1)\right], \quad (27)$$

тобто, рішення з урахуванням лінійної повзучості основи виходить шляхом множення результату пружно-миттєвого рішення на коефіцієнт, що враховує реологічні властивості основи.

Взявши послідовно похідні вирази (25), неважко отримати значення неважко отримати значення $\varphi(z,t)$ і $M(z,t), Q(z,t)$.

$$\left.\begin{aligned} -\varphi(z,t) = \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot \left\{\left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)}\right] \cdot \left(A_{2_t}^z \cdot T_t^H - C_{2_t}^z \cdot V_t^H + D_{2_t}^z\right) \cdot \lambda^2 - \right. \\ \left. - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot \left(A_{2_0}^z \cdot T_0^H - C_{2_0}^z \cdot V_0^H + D_{2_0}^z\right)\right\}; \\ M(z,t) = \frac{Q^0}{\beta_0} \cdot \left\{\left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)}\right] \cdot \left(A_{3_t}^z \cdot T_t^H - C_{3_t}^z \cdot V_t^H + D_{3_t}^z\right) \cdot \lambda - \right. \\ \left. - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot \left(A_{3_0}^z \cdot T_0^H - C_{3_0}^z \cdot V_0^H + D_{3_0}^z\right)\right\}; \\ Q(z,t) = \frac{Q^0}{\beta_0} \cdot \left\{\left[1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)}\right] \cdot \left(A_{4_t}^z \cdot T_t^H - C_{4_t}^z \cdot V_t^H + D_{4_t}^z\right) - \right. \\ \left. - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot \left(A_{4_0}^z \cdot T_0^H - C_{4_0}^z \cdot V_0^H + D_{4_0}^z\right)\right\}. \end{aligned}\right\} \quad (28)$$

Встановимо зміни в часі згинального моменту в місці затиснення палі в ростверк. Якщо врахувати, що величини V_0^H і V_t^H практично рівні, то взявши їхнє середнє значення V_{cp}^H, нескладно отримати (29)

$$-M(0,t) \approx \frac{Q^0}{\beta_0} \cdot V_{cp}^H \cdot \left(\lambda + \frac{\varphi_t}{2}\right). \quad (29)$$

Більш точно отримаємо з (29)

$$-M(0,t) = \frac{Q^0}{\beta_0} \cdot \left[\left(1 + \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)}\right) \cdot \lambda \cdot V_t^H - \frac{\varphi_t}{2 \cdot (\lambda - 1)} \cdot V_0^H\right] \quad (30)$$

Що ж до величин $\varphi(0,t)$ і $Q(0,t)$, то неважко з рішення (28) зауважити, що вони не схильні до впливу повзучості підстави, тобто

$$\left.\begin{aligned} \varphi(0,t) = 0; \\ Q(0,t) = Q^0. \end{aligned}\right\}$$

Крім того, якщо використовувати одержане вище спрощення при $T^H = V^H = S^H$, то суттєво спроститься і рішення з урахуванням повзучості основи

$$\left.\begin{aligned}
y\,(z,t) &= \frac{Q^0}{\beta_0^3\cdot EI}\cdot\left\{\left[1+\frac{\varphi_t}{2\cdot(\lambda-1)}\right]\cdot\left(R_{1_t}^z\cdot S^H+D_{1_t}^z\right)\cdot\lambda^3-\right.\\
&\left.-\frac{\varphi_t}{2\cdot(\lambda-1)}\cdot\left(R_{1_0}^z\cdot S^H+D_{1_0}^z\right)\right\};\\
-\varphi\,(z,t) &= \frac{Q^0}{\beta_0^2\cdot EI}\cdot\left\{\left[1+\frac{\varphi_t}{2\cdot(\lambda-1)}\right]\cdot\left(R_{2_t}^z\cdot S^H+D_{2_t}^z\right)\cdot\lambda^2-\right.\\
&\left.-\frac{\varphi_t}{2\cdot(\lambda-1)}\cdot\left(R_{2_0}^z\cdot S^H+D_{2_0}^z\right)\right\};\\
M(z,t) &= \frac{Q^0}{\beta_0\cdot EI}\cdot\left\{\left[1+\frac{\varphi_t}{2\cdot(\lambda-1)}\right]\cdot\left(R_{3_t}^z\cdot S^H+D_{3_t}^z\right)\cdot\lambda-\right.\\
&\left.-\frac{\varphi_t}{2\cdot(\lambda-1)}\cdot\left(R_{3_0}^z\cdot S^H+D_{3_0}^z\right)\right\};\\
Q(z,t) &= Q^0\cdot\left\{\left[1+\frac{\varphi_t}{2\cdot(\lambda-1)}\right]\cdot\left(R_{4_t}^z\cdot S^H+D_{4_t}^z\right)-\right.\\
&\left.-\frac{\varphi_t}{2\cdot(\lambda-1)}\cdot\left(R_{4_0}^z\cdot S^H+D_{4_0}^z\right)\right\}.
\end{aligned}\right\}\quad(31)$$

Приклад розрахунку.

Оцінимо вплив повзучості основи на величини згинальних моментів, поперечних сил, горизонтальних переміщень та кутів повороту в перерізах палі, защемленої в ростверк, завантаженої горизонтальною силою у поверхні ґрунту $Q^0 = 10$, за наступних умов:

$EI = 6.2 \cdot 10^3$ тс · м^2; $b = 0.4$ м; $H = 6$м; розрахункова ширина палі $b_p = 1.1$ м. Ґрунт характеризується коефіцієнтом пропорційності: $K = 700$ тс/м^4.

Розглянемо рішення за кількох значеннях показники повзучості: $\phi_t = 0 \div 3$.

1. Обчислюємо коефіцієнти деформації пружно-миттєвого та тривалого завантаження

$$\beta_0 = \sqrt[5]{\frac{K\cdot b_p}{EI}} = \sqrt[5]{\frac{700\cdot 1.1}{6.2\cdot 10^3}} = \sqrt[5]{0.1242} = 0.6589\ м^{-1}.$$

Підставляючи

$$\beta_t = \sqrt[5]{\frac{2\cdot K\cdot b_p}{(2+\phi_t)\cdot EI}}$$

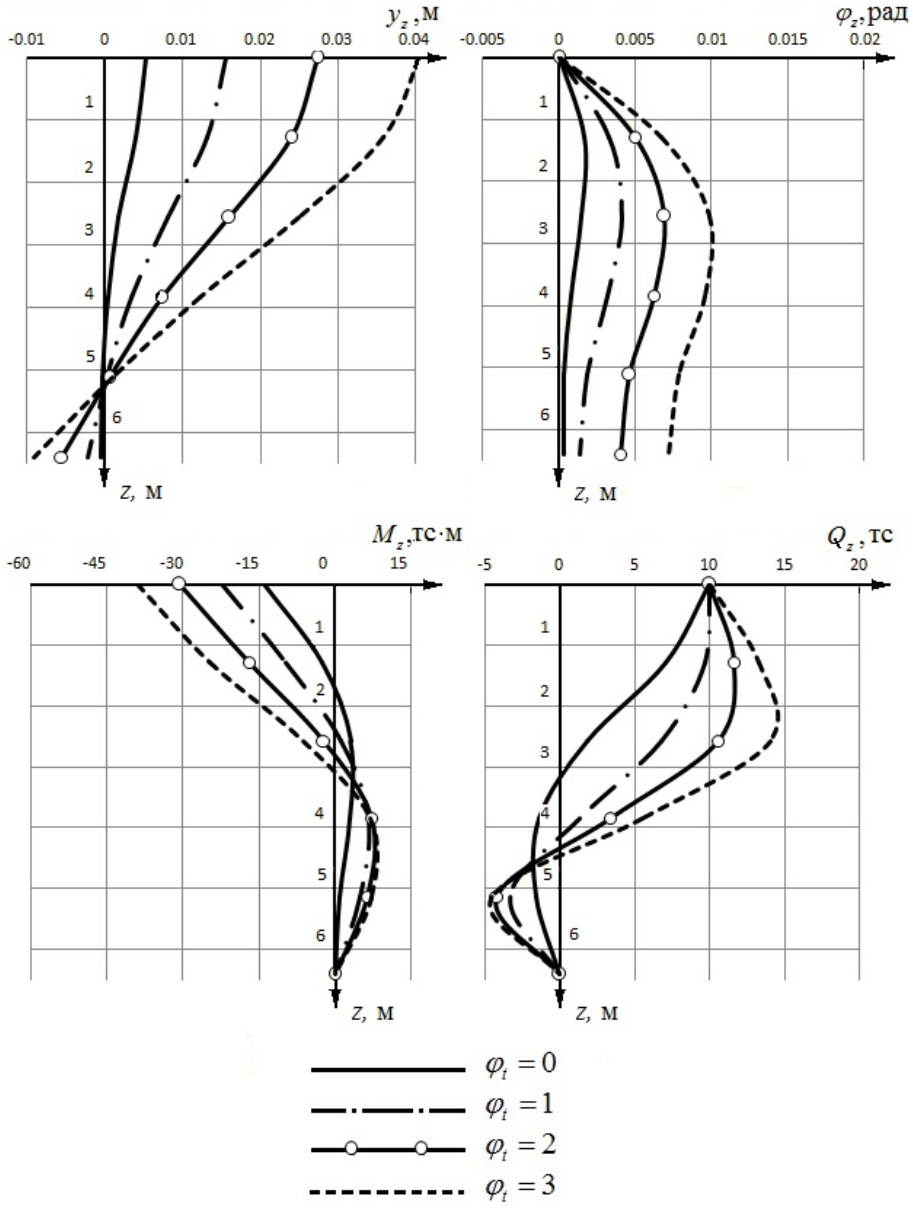


Рис. 1. Епюри y_z, φ_z, M_z і Q_z. **Приклад розрахунку**

характеристики повзучості $\phi_t = 0;\ 1;\ 2;\ 3$, відповідно визначимо

$$\beta_t = 0.6589;\ 0.6076;\ 0.6736;\ 0.5486;$$

а із співвідношення $\lambda = \frac{\beta_0}{\beta_t}$ відповідно отримаємо: 1; 1.09; 1.15; 1.2.

2. Пружно-миттєве переміщення голови палі.

За (19) та (18) при $H_0 = \beta_0 \cdot H \approx 4$:

$$T_0^H = \frac{C_3^H \cdot D_4^H - C_4^H \cdot D_3^H}{A_3^H \cdot C_4^H - A_4^H \cdot C_3^H} = 0.9396;$$

$$V_0^H = \frac{A_3^H \cdot D_4^H - A_4^H \cdot D_3^H}{A_3^H \cdot C_4^H - A_4^H \cdot C_3^H} = 0.9260;$$

$$y^0 = \frac{Q^0}{\beta_0^3 \cdot EI} \cdot T^H = \frac{10}{0.6589^3 \cdot 6.2 \cdot 10^3} \cdot 0.9396 = 0.5298 \cdot 10^{-2}\ \text{м};$$

$$M^0 = -\frac{Q^0}{\beta_0} \cdot V^H = -\frac{10}{0.6589} \cdot 0.9260 = -14.053\ \text{тс} \cdot \text{м}.$$

3. Тривале навантаження (докладний розрахунок наведемо лише за характеристиці повзучості $\varphi_t = 3$). Цікавить порівняти результати точного і наближеного рішень.

а) Величину прогину отримаємо з (26), при $H_t = \beta_t \cdot H = 3.5$:

$$T_t^H = \frac{62.81396}{64.7687} = 0.97282;$$

$$V_t^H = \frac{60.4747}{64.7687} = 0.9337;$$

$$y(0,t) = \frac{10}{0.6589^3 \cdot 6.2 \cdot 10^3} \cdot \left\{\left[1 + \frac{3}{2 \cdot 0.2}\right] \cdot 1.2^3 \cdot 0.96981 - \frac{\varphi_t}{2 \cdot 0.2} \cdot 0.9396\right\} = 0.04056\ \text{м}.$$

За наближеною формулою (27) отримаємо близьке значення

$$y(0,t) = \frac{10}{0.6589^3 \cdot 6.2 \cdot 10^3} \cdot 0.9547 \cdot \left[1.2^3 + \frac{3}{2} \cdot (1.2^2 + 1.2 + 1)\right] = 0.0387\ \textit{м}.$$

б) Величину згинального моменту отримаємо з (31)

$$-M(0,t) = \frac{10}{0.6589} \cdot \left[\left(1 + \frac{3}{2 \cdot 0.2}\right) \cdot 1.2 \cdot 0.9337 - \frac{3}{2 \cdot 0.2} \cdot 0.926\right] = 39.0997\ \text{тс} \cdot \textit{м}.$$

Графіки отриманих значень y_z, φ_z, M_z і Q_z залежно від z при $\varphi_t = 0 \div 3$ представлені на рис. 1.

Висновки

1. При обліку повзучості ґрунтового масиву переміщення y_0 зростають, при $\varphi_t = 3$ в 4 рази;

2. Зі зростанням φ_t максимальний згинальний момент в місці затискання палі в ростверк зростає, при $\varphi_t = 3$ приблизно в 2.5 рази.

3. Аналізуючи отримані результати рішення з урахуванням повзучості ґрунтів основи можна дійти висновку у тому, що запропонований метод розрахунку дозволяє врахувати і специфічну роботу паль, і оцінити зміну напружено-деформованого стану аналізованої конструкції у часі.

Список літератури:

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.: Гостехиздат, 1952. 324 с.
2. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
3. ДБН В.2.1-10-2009. Зміна № 1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 57 с.
4. Завриев К.С. Расчет фундаментов мостов глубокого заложения М. : Транспорт, 1970. 214 с.
5. Прокопович И.Е. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояния сооружения. М.: Госстройиздат, 1963. 260 с.
6. Руководство по проектированию свайных фундаментов. НИИОСП им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1980. 151 с.
7. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты / НИИОСП, Фундаментпроект, Донецкий и Харьковский ПромстройНИИпроект и др. М. : Госстрой СССР, 1986. 45 с.
8. Урбан И.В. Расчет тонких стенок с учетом упругих свойств грунта и стенки. Труды МИИТ. 1939. Вып. 55. С. 17–26.
9. Alam Singh. Model pile group subjected to cyclic lateral load. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Soils and Foundations. June 1971. Vol. 11, No. 2. P. 51 – 60.
10. Conte E. Nonlinear three-dimensionsl analysis of reinforced piles subjected to horizontal loading. Computers and Geotechnics. 2013. № 49. P. 123–133.
11. Spyros Giannakos. Cyclic lateral response of piles in dry sand: Finite element modeling and validation. Computers and Geotechnics. 2012. № 44. P. 116–131.

Yesakova S.V., Chepurnyi D.O. CALCULATION OF HORIZONTALLY LOADED PILES PRESSED INTO THE GROUND, TAKING INTO ACCOUNT THE DURATION OF DEFORMATION

In connection with the expanded volume of construction of buildings and structures in the compressed conditions of cities, as well as difficult engineering and geological conditions, there is a significant increase in the use of pile foundations and pile enclosure structures of pits. In addition, pile supports are the most common construction of bridges, sports, shopping and other structures.

The peculiarity of the operation of piles in the specified conditions is that, in addition to vertical loads, significant lateral loads are often transmitted to the piles, which significantly complicate the operation of the "pile-soil" system. For the first time, the "Pile Foundation Design Guide" (hereinafter "Guide") [6], which contains instructions taking into account horizontal and moment loads, appeared in 1980.

Then SNiP 2.02.03-85 [7] was issued, and in 2011 DBN V.2.1.10-2009 Change No. 1 [3] appeared, which, as before, recommended the calculation model of the foundation with stiffness, which increases linearly with depth. However, over the years, new experimental and theoretical research has been accumulated, which allows to significantly adjust the provisions of the current norms, and in addition, in some cases, to obtain more economical or reliable structures.

The creep of the Winkler foundation leads to an uneven change in the contact stress of the foundations and horizontally loaded piles, as well as to an uneven increase in deformations of structures over time. The normative method does not take into account the influence of the duration of the transverse loading of the piles on the change in their stress-strain state over time.

Key words: *horizontally loaded piles, deformation, grid, horizontal pressure, stress-strain state.*

УДК 691(075)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/46

Коверніченко Л.М.
Криворізький національний університет

Щерба В.В.
Державне підприємство «Державний інститут по проектуванню підприємств гірничорудної промисловості «Кривбаспроект»

Сизий Б.С.
ВСП «Криворізький фаховий коледж Національного авіаційного університету»

ВИБІР ЗАПОВНЮВАЧИВ ДЛЯ БЕТОНУ

Будівельні матеріали досліджують різноманітними методами. При дослідженні якісних показників компонентів, нових складів, технологічних удосконалень і т. П. Може бути застосована єдина методична основа. Вона полягає в тому, що досліджувані явища і характеристики порівнюють у відповідних умовах.

Досліджено що, часто ці порівняння проводять при рівних, а не відповідних умовах, наприклад при рівній міцності, рівному фазовому складі, однакових технологічних операціях, що дорівнює витраті компонента і т.п. Доведено що, таке порівняння правомірно тільки в окремому випадку. Не можна, наприклад, без урахування структурних особливостей робити висновки про ідентичність якості двох матеріалів, що володіють однаковою міцністю або іншими однаковими властивостями.

Визначено що, метод вирішення такого завдання з позицій загальної теорії, полягає в тому, що порівнюються властивості в'яжучих речовин при їх оптимальних структурах. І тому якщо серед порівнюваних речовин було знайдено в'яжуче з найкращими показниками якості, то по закону обов'язкової відповідності властивостей воно буде найкращим і у виробі при прийнятих технологічних умовах і режимах. Отримані відомості про показники властивостей служать, крім того, вихідними даними при подальшому проектуванні оптимального складу, повністю задовольняє заданим технічним вимогам.

Порівняння методичних основ теорії полягають також в тому, що за допомогою методу проектування видається необмежена кількість оптимальних складів. Однак, на заключній стадії проектування з багатьох оптимальних вибирають тільки один або кілька раціональних складів, які найбільш повно відповідають конкретним технологічним умовам, заданим показниками якості та економічної ефективності. Порівняння оптимальних складів між собою при виборі раціонального роблять за розрахунковими формулами і графіками-номограмами, що дозволяє без великих експериментальним досліджень порівнювати між собою основні характеристики при оптимальних структурах.

Ключові слова: *будівельні матеріали, характеристика, порівняння, вибір, структури.*

Постановка проблеми. Будівельні матеріали досліджують різноманітними методами. При дослідженні якісних показників компонентів, нових складів, технологічних удосконалень і т. п. Може бути застосована єдина методична основа. Вона полягає в тому, що досліджувані явища і характеристики порівнюють у відповідних умовах. Часто ці порівняння робляють при рівних, а не відповідних умовах, наприклад при рівній міцності, рівному фазовому складі, однакових технологічних операціях, що дорівнює витраті компонента і т.п. Тим часом таке порівняння правомірно тільки в окремому випадку. Не можна, наприклад, без урахування структурних особливостей робити висновки про ідентичність якості двох матеріалів, що володіють однаковою міцністю або іншими однаковими властивостями.

Нерідко, наприклад, при вирішенні деяких практичних завдань в області важких цементних бетонів якісні показники порівнюють при однаковому водоцементному відношенні. Таке порівняння не враховує можливої відмінності в структурі бетонів, оскільки при однаковому водо-цементному відношенні структури можуть бути порфіровими і контактними, з надлишком або недоліком в'яжучої частини, високопористі і щільні, і т.д. [1, с.112; 2, с.14].

До однієї з поширених технологічних завдань відносять вибір найкращого різновиду в'яжучого для матеріалу, виготовленого за прийнятою технологією. Найпоширеніший спосіб вирішення цього завдання полягає в паралельному виго-

товленні виробу на основі різних в'яжучих, але з дотриманням однакових умов і складів [4, с. 56; 5, с. 53]. Після випробування відповідних зразків порівнюють отримані результати і за якісними показниками виносять рішення про перевагу того чи іншого в'яжучого. Робота ця пов'язана з випробуванням великої кількості зразків, навіть якщо останнє розраховане з використанням методу математичного планування експерименту. Отримувані середні статистичні дані потребують подальших уточнень, так як вони охоплюють широку область оптимальних і неоптимальних структур.

Виклад основного матеріалу. Метод вирішення такого завдання з позицій загальної теорії, полягає в тому, що порівнюються властивості в'яжучих речовин при їх оптимальних структурах. І тому якщо серед порівнюваних речовин було знайдено в'яжуче з найкращими показниками якості, то по закону обов'язкової відповідності властивостей воно буде найкращим і у виробі при прийнятих технологічних умовах і режимах. Отримані відомості про показники властивостей служать, крім того, вихідними даними при подальшому проектуванні оптимального складу, який повністю задовольняє заданим технічним вимогам. Якщо в ході вивчення виявиться, що в'яжуча речовина має властивості, показники яких гірше необхідних, наприклад міцність в'яжучого оптимальної структури нижче необхідної міцності, то цей метод вирішення допомагає встановити неспроможність спроб створення на його основі заповнювача необхідної якості. Буде потрібно проведення додаткових досліджень щодо підвищення якості вихідної в'яжучої речовини [6, с. 27].

З цією метою вишукують доступні і прямі методи поліпшення властивостей в'яжучого введенням додаткових речовин, зміною режиму тверднення (що має знайти повне відображення у майбутній технології виробництва); попередньою обробкою в'яжучого або його окремих інгредієнтів і т.п.; вишукують методи опосередкованого впливу на якісні показники в'яжучого при виготовленні за рахунок застосування активних наповнювачів, здатних компенсувати і підняти недостатній показник в'яжучої частини (наприклад, межа міцності при розтягуванні за рахунок введення армуючого заповнювача).

Будівельні матеріали досліджують різноманітними методами, які володіють тією здатністю, що при дослідженні якісних показників компонентів, нових складів, технологічних удосконалень і т.п. може бути застосована єдина методична основа. Вона полягає в тому, що досліджувані явища і характеристики порівнюють у відповідних умовах. Більш часто ці порівняння поки виробляють при рівних, а не відповідних умовах технологічних операціях, що дорівнює витраті компонента і т.п. Таке порівняння правомірно тільки в окремому випадку. Не можна, наприклад, без урахування структурних особливостей робити висновки про ідентичність якості двох матеріалів, що володіють однаковою міцністю або іншими однаковими властивостями. При вирішенні деяких практичних завдань в області важких цементних бетонів якісні показники порівнюють при однаковому водоцементному відношенні. Таке порівняння не враховує можливої відмінності в структурі бетонів, оскільки при однакових водоцементних відношеннях структури можуть бути порфіровими і контактними, з надлишком або недоліком в'яжучої частини, високопористі і щільні і т.д.

Будучи гетерогенною полідисперсною системою, окремі компоненти твердої фази по-різному відносяться до різних рідин. Будь-які рідини здатні їх розчиняти з різним ступенем інтенсивності. Вода розчиняє мінеральні солі і рухливі фракції гумінових кислот. Розчинення супроводжується зміною первісної щільності розчинника. Якщо, за рідину узята вода, то перехідні в розчин іони гідратизуються.

Показники набрякання цементного каменю у воді, звичайно, тим більше, чим менше водоцементний фактор. Через декілька років набрякання звичайно припиняється. Цементний камінь, який на тривалий час поміщено у воду, набрякає. Припускають, що останнє обумовлено посиленням процесів гідратації й розвитком осмотичного тиску в гелевидних масах. Вони викликають не тільки набрякання, але і розірвання гелевих оболонок, окремі частинки яких, розміщаючись між стичними зернами цементу, розсовують їх.

Перша умова, що визначає успішність аналізу, – явище змочування рідиною всієї поверхні часток. Неповне змочування веде до завищення шуканого показника об'єму узятого для аналізу навішення за рахунок порожнеч на границі зіткнення фаз, заповнених повітрям. Цьому сприяє нерівна поверхня часток. Фізична сутність змочування розкривається в молекулярній взаємодії рідини з поверхнею твердого тіла на границі зіткнення трьох фаз. У процесі змочування повітря витісняється і рідина входить у безпосередній контакт із поверхнею твердої фази. Вологу, що утримується в бетоні, звичайно класифікують по розміру енергії її зв'язку з його складовими.

Узагалі, розрізняють три великі групи зв'язку вологи з матеріалом: хімічну, фізико-хімічну, фізико-механічну. При необхідності розрахунку вологісних полів бетону хімічне зв'язування води варто враховувати як розподілене по обсязі тіла внутрішнє стікання вологи. При звичайних температурах ця волога не може брати участь у процесах вологообміну із зовнішнім середовищем. Вона може бути віддалена в результаті хімічного впливу або прожарювання.

Процеси, зв'язані зі збільшенням утримання вологи або її видалення з бетону, неминуче супроводжуються накопиченням або витратою енергії, що залежить від відновлення або порушення форм зв'язку води з бетоном.

При обмиванні бетону прісною (із малою тимчасовою жорсткістю) водою або фільтрації такої води через нього спостерігається його руйнація, яка отримала назву – корозія 1-го виду. Цей вид корозії обумовлено розчинністю окремих компонентів цементного каменю. Корозія бетону 1-го виду спостерігається в бетоні різноманітних споруджень: конструкції гідротехнічних споруджень, стіни шлюзів, бетонні труби й лотки для відведення поверхневих вод, тунельні оздоблення й ін.

Неповне змочування веде до завищення шуканого показника об'єму узятого для аналізу навішення за рахунок порожнеч на границі зіткнення фаз, заповнених повітрям. Цьому сприяє нерівна поверхня часток.

Фізична сутність змочування розкривається в молекулярній взаємодії рідини з поверхнею твердого тіла на границі зіткнення трьох фаз. У процесі змочування повітря витісняється і рідина входить у безпосередній контакт із поверхнею твердої фази.

Вологу, що утримується в бетоні, звичайно класифікують по розміру енергії її зв'язку з його складовими. Узагалі, розрізняють три великі групи зв'язку вологи з матеріалом: хімічну, фізико-хімічну, фізико-механічну.

Хімічний зв'язок води в бетоні в результаті хімічних реакцій гідратації цементу здійснюється в точних кількісних стехіометричних співвідношеннях. Кількість хімічно зв'язаної води залежить від мінералогічного складу в'яжучого.

При необхідності розрахунку вологісних полів бетону хімічне зв'язування води варто враховувати як розподілене по обсязі тіла внутрішнє стікання вологи. При звичайних температурах ця волога не може брати участь у процесах вологообміну із зовнішнім середовищем. Вона може бути віддалена в результаті хімічного впливу або прожарювання. Фізико-хімічно (адсорбційно) зв'язана вода присутня на гідратних оболонках кристалів. Причина виникнення цього зв'язку – наявність силових полів атомно-молекулярної природи. Найбільше міцно зв'язаний мономолекулярний прошарок води. Наступні прошарки утримуються із силою, що слабшає. Такий полі молекулярний прошарок адсорбційної води складає приблизно декілька сотих діаметрів водяних молекул. Адсорбційно-зв'язана вода володіє певними властивостями, що відрізняють її від звичайної води. Так, унаслідок підвищеної щільності, ця вода має властивості пружного тіла і виконує розклинюючу дію. Адсорбційний зв'язок води в бетоні відноситься до числа зв'язків середньої інтенсивності, що можуть бути зруйновані десорбцією й випаром, проте для цього потрібно визначений час.

Фізико-механічний зв'язок у бетоні виникає завдяки капілярним силам (у мікрокапілярах) і здійснюється чисто механічно (у макрокапілярах). Ця вода легко віддалиться випаром або штучним створенням тиску більше капілярного (наприклад, вакуумуванням).

Фізичні деформації набрякання називають іноді власними деформаціями на відміну від тих, що виникають у тілі цементного каменя або бетону під дією зовнішніх сил. Аналізовані тут процеси набрякання не варто змішувати зі збільшенням його обсягу, що викликається гідратацією окису кальцію або магнію, а також утворенням еттрингіту.

Процеси, зв'язані зі збільшенням утримання вологи або її видалення з бетону, неминуче супроводжуються накопиченням або витратою енергії, що залежить від відновлення або порушення форм зв'язку води з бетоном.

При обмиванні бетону прісною (із малою тимчасовою жорсткістю) водою або фільтрації такої води через нього спостерігається його руйнація, яка отримала назву – корозія 1-го виду. Цей вид корозії обумовлено розчинністю окремих компонентів цементного каменю. Корозія бетону 1-го виду спостерігається в бетоні різноманітних споруджень: конструкції гідротехнічних споруджень, стіни шлюзів, бетонні труби й лотки для відведення поверхневих вод, тунельні оздоблення й ін.

Вапно у твердій фазі, гідросилікати, гідроалюмінати, гідроферити визначають міцність кристалізаційних контактів у цементному камені. Тому вилуджування вапна – розчинення $Ca(OH)_2$, що знаходиться у твердій фазі, розкладання інших з'єднань з утворенням гелю, що не володіє в'яжучими властивостями, знижує міц-

ність цементного каменю в бетоні і, як наслідок, самого бетону.

Метод оцінки в'яжучої речовини як мікродисперсний, зручний не тільки тому, що одержувані характеристики можуть бути використані в якості розрахункових, при визначенні тих же характеристик на його основі, а й тому, що вони фіксують гранично можливі значення показників якості.

Вибір і порівняння наповнювачів здійснюють шляхом аналізу експериментальних даних, отриманих при випробуванні з одним і тим же в'яжучим, але при різних заповнювачах. Щоб виключити зайві невідомі, нерідко порівняння здійснюють при однорідному в'яжучому, наприклад з одним і тим же фазовим ставленням (водоцементним, бітумомінеральним і т.д.). До застосування рекомендують ті наповнювачі, які забезпечують при прийнятих умовах кращі показники властивостей. З позицій загальної теорії такий метод оцінки якості наповнювачів потребує низки уточнень. По-перше, необхідно поліпшити заповнювач за допомогою різних можливих прийомів – фракціонірування, промивання, подрібнення, складання щільної суміші, распушки, просушування і т.п. Порівняння якості наповнювачів доцільно проводити в станах їх повної підготовленості і з урахуванням економічних витрат на підготовку. По-друге, необхідно оцінити якість підготовленого заповнювача за допомогою прийнятої в'яжучої речовини. З цією метою виготовляють два склади при довільних фазових співвідношеннях в'яжучого, але обов'язково з отриманням оптимальних структур.

Після їх випробування, властивостей (міцності та ін.) визначають показник ступеня n в рівнянні виду $y=a/x^n$. Ознакою більш високої якості заповнювача є знижена величина показника ступеня. По-третє, необхідно спробувати додатково активізувати прийнятий заповнювач і спонукати до зниження структурного показника ступеня n за допомогою добавок, прогріву і т.п. По-четверте, доцільно спробувати збільшити вміст дрібної фракції в заповнювачі в міру збільшення фазового відношення в'яжучого. Цим заходом іноді досягається зниження показника ступеня n без додаткових засобів активації заповнювача, наприклад шляхом збільшення вмісту піску в щебені при збільшенні водоцементного відношення в цементному бетоні.

Висновки. Методичні основи теорії полягають в тому, що за допомогою методу проектування видається необмежена кількість оптимальних складів. Однак, на заключній стадії проектування з багатьох оптимальних вибирають тільки один, або кілька раціональних складів, які найбільш повно відповідають конкретним технологічним умовам, заданим показниками якості та економічної ефективності. Порівняння оптимальних складів між собою при виборі раціонального здійснюють за розрахунковими формулами і графіками-номограмами, що дозволяє без великих експериментальним досліджень порівнювати між собою основні характеристики при оптимальних структурах. У цьому порівнянні різних складів, які відповідають необхідним технічним вимогам, можна виходити з зміни щільності суміші, різних методів активації наповнювачів, різних способів технологічної обробки суміші і моноліту на окремих стадіях її виготовлення і т.д. При цьому не потрібно великих затрат часу на лабораторні досліди особливо, якщо були визначені допоміжні характеристики в'яжучої речовини при оптимальній його структурі, функціональні показники ступеня в рівняннях міцності, деформативності і ін. До виявлення раціональних оптимальних складів залучаються економічні розрахунки варіантів. При відпрацюванні нової технології важливо переконатися в повноті дослідження потенційних можливостей кожної операції. Останнє проявляється в швидкості протікання процесів структуроутворення. Практично ефективність впровадження удосконалень в технології контролюється за швидкістю, характером і розмірами зміни показників властивостей оптимальних структур, а при необхідності-також в'яжучої речовини, наповнювачів і суміші за допомогою стандартних і нестандартних методів. При порівняннях величини колишніх і нових показників при оптимальних структурах важливо орієнтуватися на створення їх експериментальних значень. Загальна теорія виступає тут як методична основа для порівняльного вивчення ступеня оптимальності технологій, особливо поки не існує критеріїв оптимізації технології.

Таким чином, пошук нових шляхів вдосконалення технології спирається на закони оптимальних структур і їх якісні показники, так само як оптимальна структура завжди повністю залежить від технологічних параметрів.

Список літератури:

1. Коверніченко Л.М. Заповнювачі для бетону і взаємодія їх з водою/Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Випуск 8, Луцьк, 2017. С. 103–110.

2. Kovernichenko L, Shishkin A. Regulation of the influence of the structure of inorganic binders on their properaties//Technology audit and production reserves. 2018. № 3/1(41).

3. Штарк Иохен, Вихт Бернд. Долговечность бетона / Пер. с нем. А. Тулаганова. Под ред. П. Кривенко, Техн. ред. Е. Кавалеровой. Киев: Оранта, 2004. 301 с.

4. Fredericks J. C., Saunders N. R., Broadfoot J. T. Recent developments in positive displacement shotcrete equipment. Shotcreting, Publication Sp-14 ACI.

5. Ir O. K., Maltiple laxer shotcrete tunnel lining. Shotcreting, Publication Sp-14 ACI.

6. Reading T. J. Shotcrete as a construction material. Stfpiereiihg, Publication SP-14, ACI.

Kovernichenko L.M., Shcherba V.V., Syzyi B.S. CHOICE OF FILLERS FOR CONCRETE

Building materials are examined by various methods. When studying the quality indicators of components, new compositions, technological improvements, etc., a single methodological basis can be applied. It consists in the fact that the studied phenomena and characteristics are compared in the appropriate conditions. It has been found that these comparisons are often carried out under equal and not corresponding conditions, for example, with equal strength, equal phase composition, the same technological operations, which is equal to the consumption of the component, etc. It has been proven that such a comparison is legitimate only in a separate case. Not it is possible, for example, without taking into account structural features, to draw conclusions about the identity of the quality of two materials with the same strength or other identical properties.

It was determined that the method of solving such a problem from the standpoint of general theory consists in comparing the properties of binders with their optimal structures. And therefore, if a binder with the best quality indicators was found among the compared substances, then according to the law of mandatory correspondence of properties, it will be the best in the product under the accepted technological conditions and regimes. In addition, the obtained information on property indicators serve as initial data for the further design of an optimal composition that fully meets the specified technical requirements.

Comparisons of the methodological foundations of the theory are also based on the fact that an unlimited number of optimal compositions is issued with the help of the design method. However, at the final stage of design, only one or several rational compositions are chosen from many optimal ones, which most fully correspond to specific technological conditions, given by indicators of quality and economic efficiency. Comparison of optimal compositions with each other when choosing a rational one is done according to calculation formulas and nomogram graphs, which allows you to compare the main characteristics of optimal structures without extensive experimental research.

Key words: *building materials, characteristics, comparison, choice, structures.*

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 004.85
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/47

Переверзєв О.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Трапезон К.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНИХ АЛГОРИТМІВ ВІДСТЕЖЕННЯ РУХУ ОБ'ЄКТІВ В ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ БЕЗПЕКИ

З розвитком технологій в області комп'ютерного зору алгоритми виявлення рухомих об'єктів все частіше використовуються в різних областях науки і техніки, серед яких можна виділити інтерактивне відео, комп'ютерні ігри та симулятори, військові прилади трекінгу, роботизовані системи, тощо. Разом з тим, якщо розглядати в якості рухомого об'єкту людину або кілька людей, то в цьому випадку задача відео спостереження доволі ускладнюється, адже тут необхідно враховувати вимоги до швидкості оброблення зображень об'єктів і до точності розпізнавання останніх на основі підходів ідентифікації унікальних ознак. В роботі розглянуто два програмні алгоритми відстеження об'єктів, на підставі яких можна сформулювати вимоги при створенні електронних систем безпеки. Зокрема, знайдено, що при відстеженні об'єктів в режимі реального часу необхідно враховувати кольорові характеристики зображення, і шум зображення. Також на точність алгоритму впливають різкість зображення та форма об'єкту відстеження. Порівняння двох розглянутих алгоритмів відстеження об'єктів дозволяє стверджувати, що алгоритм CAMShift є простішим, але його стабільність роботи безпосередньо залежить від кольорових характеристик зображення. Насамперед це стосується таких параметрів, як колір, освітлення та шум зображення. Разом з тим, алгоритм на основі побудови оптичного потоку передбачає процедуру вибору та перетворення кольорової схеми зображення і побудова маски зображення для відслідковування особливих крапок при цьому може бути ускладнена, особливо, коли в схемі залучені такі параметри як відтінок, насиченість та яскравість пікселів зображення. Алгоритм CAMShift таких обмежень немає, оскільки в даному випадку вже використовується в основі алгоритму кольорова схема HSV і побудова гістограми області зображення проводиться для кадру після застосування маски та нормалізації значень.

Ключові слова: *система безпеки, зображення, колір, ознака, об'єкт, гістограма, маска, точність.*

Постановка проблеми. В теперішній час, враховуючи стрімкий розвиток інформаційних технологій у світі, використання комп'ютерного обладнання, де для створення зображень, використовуються алгоритми виявлення рухомих об'єктів в реальному часі, вже не є чимось абсолютно новим [1, с. 2383; 2, с. 72558]. Так, подібні алгоритми на сьогодні дуже поширені в різних областях науки і техніки, серед яких варто виділити інтерактивне відео, комп'ютерні ігри та симулятори, військові прилади трекінгу, роботизовані системи, тощо. Разом з тим, якщо розглядати в якості рухомого об'єкту людину або декілька людей в натовпі, то в цьому випадку задача відео спостереження доволі ускладнюється, адже тут висуваються окремі вимоги до швидкості оброблення зображень об'єктів і до точності розпізнавання останніх на основі підходів ідентифікації унікальних ознак. Відео спостереження за об'єктами визначається, як проблема визначення точного місцезнаходження рухомого об'єкта протягом певного часу на відео або на основі аналізу зображень з камери в реальному часі.

З розвитком технологій в області комп'ютерного зору різними авторами були запропоновані різні підходи до вирішення проблеми відстеження людей у реальному часі. Наприклад, у роботах [3, с. 1963; 4, с. 1675] розглядається лазерний далекомір для відстеження людини з метою ідентифікації її ознак – нога людини та окремі рухи

людини. Однак вимірювання цим методом має обмеження у випадку великої відстані між ногою людини та датчиком. Системи з декількома камерами [5, с. 43905; 6, с. 291] також призначені для відстеження людей, але ці підходи обробляються лише в невеликій зоні, де встановлено камери. Система ручних камер для спортсменів розглянута в [6, с. 296], щоб синтезувати стробоскопічне зображення рухомої цілі. Проте в цій реалізації, обчислювальна швидкість і точність не можуть бути оптимальними у випадку складних середовищ.

Насправді, можна виділити декілька проблем, з якими можна зіткнутись під час роботи над алгоритмами відстеження об'єктів. Оклюзія об'єктів у відео є однією з найпоширеніших проблем при аналізі зображень. В системах відео спостереження це стосується ситуації, коли на об'єкт впливає фон або передній план, у якому алгоритм відстеження втрачає відстеження самого об'єкта. Іншими словами, алгоритм заплутується, коли кілька об'єктів наближаються до камери. Це призводить до проблеми, коли спочатку ідентифікований об'єкт знову (помилково) відстежується, як новий об'єкт. Регулювання та контроль чутливості системи до оклюзії дозволяє користувачу визначити, яка особливість об'єкта саме заплутає мережу.

Вплив фону при відстеженні моделей об'єктів може спричинити додаткові проблеми при функціонуванні систем безпеки. Теоретично, чим щільніше фон, тим важче виділити ознаки, за якими можна виявити і відстежити об'єкт. Густозаселений фон створює надлишкову інформацію і це можна вважати за певний шум, який впливає на швидкість та точність відслідковування рухомих об'єктів.

Алгоритм відстеження не є алгоритмом окремого завдання, як це можна описати при класифікації зображень і виявленні об'єктів. Це насправді багатофункціональний алгоритм, який вирішує задачі виявлення об'єктів, їх локалізацію, класифікацію, а також відстеження за ознаками. Такими чином, на основі розглянутих проблем, які виникають при відстеженні рухомих об'єктів, виникає потреба в описі та аналізі методу відстеження, який б за основними особливостями дозволив б нівелювати зазначені обмеження.

Метою статті є розгляд програмних алгоритмів відслідковування рухомих об'єктів в електронних систем безпеки, їх порівняння та як результат знаходження слабких місць при їх подальшій технічній реалізації.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

– розглянути особливості алгоритму CAMShift та побудувати програмний алгоритм його реалізації в системах відслідковування об'єктів. Додатково необхідно визначити критерії, які впливають на стабільність та точність роботи цього алгоритму;

– визначити поняття особливих крапок зображення при використанні алгоритму Optical flow. Побудувати програмний алгоритм реалізації обчислення оптичного потоку з використанням бібліотеки OpenCV та програмного модуля Pyramid Lucas & Kanade із вдосконаленим алгоритмом Shi-Tomasi.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відеоспостереження широко використовується для моніторингу дорожнього руху, а також реалізовано в безпілотних автомобілях та в системах безпеки. За визначенням, відеоспостереження об'єктів – це процес отримання початкового набору характерних ознак об'єктів, створення унікального ідентифікатора для кожної ознаки і подальше слідкування за змінами в ознаках у відео послідовності. Реалізація цього процесу можна розглянути на основі алгоритмічних методів та підходів відеоспостереження об'єктів.

Алгоритм CAMShift (Continuously Adaptive Mean Shift – безперервний адаптивний зсув середнього) є удосконаленою версією класичного алгоритму зсуву середнього [8, с. 357]. Тобто, для області пошуку, де знаходиться об'єкт, формується набір крапок на основі кольорового розподілу пікселів в цій області. Далі розраховується умовний центр цієї області і якщо розташування даного умовного центру співпадає з геометричним центром області, то це означає що сам об'єкт не рухається. Якщо ж не співпадає, то це є сигнал до того, щоб перемістити контури області аналізу і це переміщення вказує на напрям руху об'єкту. Алгоритм CAMShift дозволяє адаптувати розміри області пошуку під розміри об'єкту. Разом з тим, алгоритм Camshift слідує за контурами об'єкта спостереження на основі зворотної проекції гістограми, щоб знайти, які пікселі найкраще відповідають кольору об'єкта, захопленого в початковій досліджуваній області. Для реалізації цього алгоритму використаємо дві бібліотеки мови об'єктно-орієнтованого програмування python – NumPy та OpenCV. За алгоритмом, після підключення бібліотек потрібно перевірити, чи коректно камера системи безпеки записує кадри з об'єктом відстеження. Після цього, встановлюється початок області пошуку – пара-

метр-область roi, який є просто областю екрана, на якій зображено об'єкт, що відстежується:

```
# set up initial coordinates for the tracking window
x, y = 0, 0
# Set up initial size of the tracking window
height, width = 25, 25
track_window = (x,y,width,height)
# set up region of interest (roi)
roi = frame[y:y + height, x:x + width]
```

Змінні x та y є координатами в рамці, яка формується у формі контуру області пошуку і подальшого відстеження об'єкту. У цьому прикладі використовуються початкові координати (0, 0), оскільки їх легко знайти, коли камера починає процес "трансляції" зображення, де є об'єкт. Висота та ширина вказують на розмір roi. Дуже важливо, щоб розмір roi хоча б приблизно відповідав розміру об'єкта, який відстежується.

Змінна track_window зберігає позицію та розмір roi. Незалежно від того, що камера «бачить» у цій області roi, все одно буде зв'язок з діапазоном кольорів, який вона відстежує. Наприклад, якщо червона кулька є в цій початковій області roi, то алгоритм знатиме, що слід відстежувати червоний об'єкт. Через це за даним алгоритмом кадр, який аналізується, має бути в певному визначеному кольоровому просторі. За алгоритмом передбачається використання кольорової системи HSV (hue, saturation, value). Наступним кроком алгоритму CAMShift є створення «маски», за якою відбувається пошук пікселів, які належать об'єкту. Причому, розмір маски враховує контури рамки, яка обмежує область пошуку.

```
# apply mask
hsv_frame = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)
mask = cv2.inRange(hsv_frame, np.array((0, 20, 20)), np.array((180, 250, 250)))
hist_frame = cv2.calcHist([hsv_frame], [0], mask, [180], [0,180])
cv2.normalize(hist_frame, hist_frame, 0, 255, cv2.NORM_MINMAX)
```

Гістограма області зображення обчислюється для кадру після застосування маски та нормалізації значень. Ця інформація використовуються для обчислення кольорів, які алгоритм відстежуватиме в майбутньому.

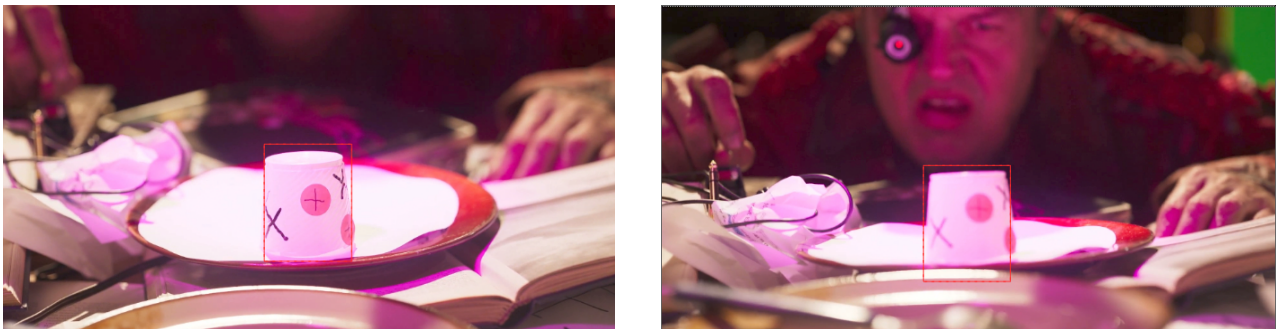
Після запису початкових значень необхідно встановити критерії завершення алгоритму CAMShift. Згадуючи, що середній зсув є ітераційним алгоритмом, який безперервно зсуває крапки, необхідно встановити певний критерій, щоб зупинити його повторення та повернути остаточний набір значень. Встановимо умови, що алгоритм, наприклад, зупиняється якщо або об'єкт не рухається, або пройшло 15 ітерацій:

```
# Setup the termination criteria: 15 iteration 1 pxl movement
term_crit = (cv2.TERM_CRITERIA_EPS | cv2.TERM_CRITERIA_COUNT, 15, 1)
```

На рисунку 1 показано результат роботи алгоритму CAMShift.

З аналізу отриманих результатів на рисунку 1а та 1б, можна відмітити, що на стабільність цього алгоритму впливають колір, освітлення та шум. Тобто, на рисунку 1, б можна помітити, що область відстеження є менш точною, оскільки різкість кадру зменшується. Особливо це проявляється за нижніми рамками області відстеження.

Optical flow – це алгоритм, який використовується для відстеження видимого руху об'єктів у відео. Для відстеження об'єктів використовується поняття особлив их крапок (feature points)



а) **б)**

Рис. 1. Результат роботи алгоритму CAMShift: а) початковий кадр відслідковування об'єкту; б) кінцевий кадр відслідковування об'єкту

зображення [8, с. 365]. Так для набору особливих крапок розраховуються вектори зміщень, або по-іншому вектори руху (motion vectors). Особливі крапки [9, с. 2] повинні мати характерні особливості:

– виразність – тобто крапка в області має виділятись на фоні в своєму околі;

– інваріантність – крапка, її визначення не повинно залежати від афінних перетворень;

– стабільність – визначення особливої крапки має бути стійким до шуму та помилок;

– унікальність – крапка має визначатись глобальною унікальністю, задля покращення помітності при повторі паттернів зображення;

– точність – виявлені крапки повинні точно визначатись, як в оригінальному зображенні, так і у випадку коли зображення проходить крізь процедуру масштабування.

На основі алгоритму Optical flow передбачається розрахунок вектора руху (рис. 2, б) для пікселя, як різниці зміщення об'єкта між двома сусідніми зображеннями. Алгоритм оптичного потоку можна використовувати для відстеження об'єктів, стабілізації та стиснення відео.

Функції оптичного потоку відстежують піксель у послідовних кадрах. Це дозволяє згенерувати шлях руху цього пікселя. Разом з тим, функціонування алгоритму передбачає використання двох припущень – інтенсивність пікселів не змінюється швидко між послідовними кадрами та групи пікселів рухаються разом. Існує багато різних реалізацій розрахунку оптичного потоку і серед них, найбільш поширеним є метод Лукаса-Канаде [10, с. 124]. За цим методом обирається область (вікно) квадратної форми розмірами $n \times n$ пікселів, де центральна крапка, її положення фіксується. Вважається, що всі крапки в області рухаються однаково. Для кожної цієї області проводиться пошук на кращу відповідність у попередньому кадрі на основі розрахунку помилки за значеннями збігу освітленості пікселів. Як тільки аналогічна область знайдена за критерієм мінімуму похибки розходження, шлях між центральною крапкою даної області та попередньої крапки вважається вектором руху. Таким самим чином проводиться аналіз інших областей зображення. Бібліотека OpenCV (Open Source Computer Vision Library) в програмі pyCharm має реалізацію Pyramid Lucas & Kanade із вдосконаленим алгоритмом Shi-Tomasi для обчислення оптичного потоку.

Метод Лукаса-Канаде через бібліотеку OpenCV передбачає, що спочатку необхідно визначити функцію, на основі якою відбудеться запуск відслідковування з використанням оптичного потоку. Крім цього, потрібно провести ініціалізацію об'єкта зображення:

```
def lucas_kanade_method(video_path):
  # Read the video
  cap = cv2.VideoCapture(video_path)
```

Після цього, треба задати параметри для детектора на основі алгоритму Shi-Tomasi та алгоритму оптичного потоку:

```
  # Parameters for ShiTomasi corner detection
     feature_params  =  dict(maxCorners=100,
qualityLevel=0.2, minDistance=5, blockSize=10)
  # Parameters for Lucas Kanade optical flow
  lk_params = dict(
    winSize=(10, 10),
    maxLevel=2,
     criteria=(cv2.TERM_CRITERIA_EPS | cv2.
TERM_CRITERIA_COUNT, 10, 0.03),
```

Відмітимо, що для роботи детектора на основі кутового визначення областей (алгоритм Shi-Tomasi) потрібно задати параметри відслідковування (ознаки особливих крапок), а саме: гра-

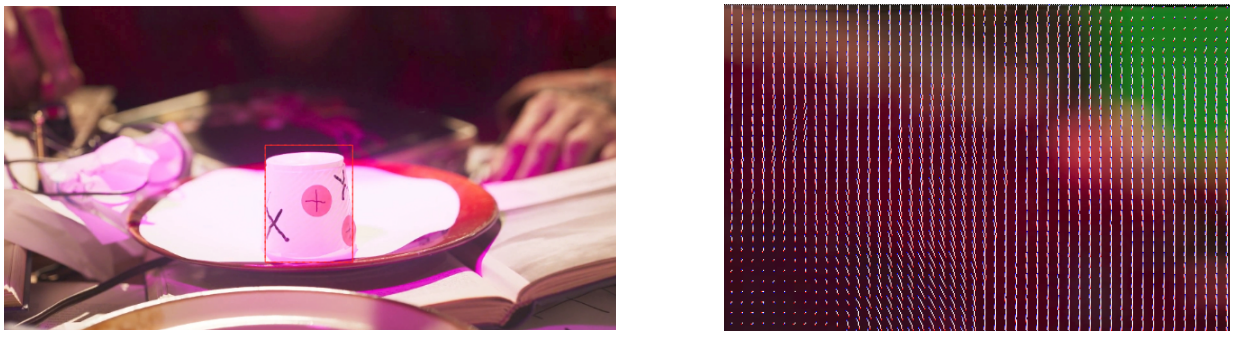


Рис. 2. Приклад використання векторів руху зображення: а) кадр зображення; б) збільшена копія зображення з векторами руху

ничні значення кутів області, параметр якості, мінімальна відстань шляху між особливими крапками в сусідніх кадрах. Наступним кроком визначаються параметри кольорової моделі, адже розрахований оптичний потік візуалізується у вигляді кольорових кривих (рис. 3):

```
   # Create random colors
  color = np.random.randint(0, 255, (100, 3))
  # Take first frame and find corners in it
  ret, first_frame = cap.read()
   old_gray = cv2.cvtColor(first_frame, cv2.
COLOR_BGR2GRAY)
    p0 = cv2.goodFeaturesToTrack(old_gray,
mask=None, **feature_params)
```

Після цього, задається маска області і розраховується для даного кадра зображення оптичний потік.

```
  # Create a mask image
  mask = np.zeros_like(first_frame)
while True:
  # Read new frame
  ret, frame = cap.read()
  if not ret:
    break
  frame_gray = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_
BGR2GRAY)
  # Calculate Optical Flow
  p1, st, err = cv2.calcOpticalFlowPyrLK(
      old_gray, frame_gray, p0, None, **lk_
params
  )
  # Select good points
  good_new = p1[st == 1]
  good_old = p0[st == 1]
  # Draw the tracks
   for i, (new, old) in enumerate(zip(good_
new, good_old)):
    a, b = new.ravel()
    c, d = old.ravel()
     mask = cv2.line(mask, (a, b), (c, d),
color[i].tolist(), 2)
     frame = cv2.circle(frame, (a, b), 5,
color[i].tolist(), -1)
```

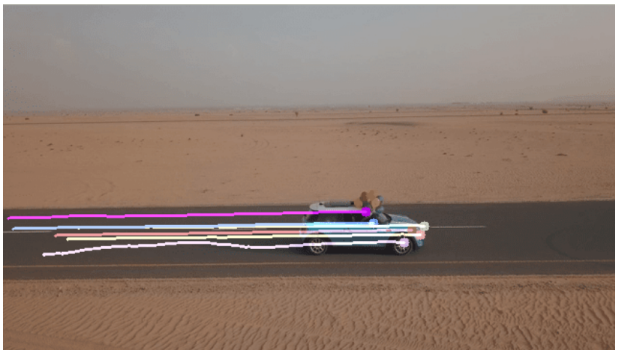


Рис. 3. Результат відслідковування за алгоритмом Optical flow

Висновки. На основі отриманих результатів можна дійти до висновку, що алгоритм оптичного потоку використовує поняття кутового детектора і у випадку зміни форми об'єкту, наприклад зведення його до крапки зображення, не може гарантувати високу точність. Крім цього, на основі наведеного програмного алгоритму оптичного потоку при програмній реалізації мають бути задані параметри детектора і їх числові значення, зокрема розмір вікна спостереження і може виникнути ситуація, що розміри можуть бути недостатніми при створенні векторів руху особливих крапок.

Порівняння двох розглянутих алгоритмів відстеження об'єктів дозволяє стверджувати, що алгоритм CAMShift є простішим, але його стабільність роботи безпосередньо залежить від кольорових характеристик зображення. Насамперед це стосується кольору, освітлення та шуму зображення. Разом з тим, алгоритм на основі побудови оптичного потоку передбачає процедуру вибору та перетворення кольорової схеми зображення і побудова маски зображення для відслідковування особливих крапок при цьому може бути ускладнена, особливо, коли в схемі залучені такі параметри як відтінок, насиченість та яскравість пікселів зображення. Алгоритм CAMShift таких обмежень немає, оскільки в даному випадку вже використовується в основі алгоритму кольорова схема HSV і побудова гістограми області зображення проводиться для кадру після застосування маски та нормалізації значень.

Список літератури:

1. S. Damotharasamy, "Approach to model human appearance based on sparse representation for human tracking in surveillance," IET Image Processing, 14(11), 2383-2394, 2020, doi: 10.1049/iet-ipr.2018.5961

2. K.M. Abughalieh, S.G. Alawneh, "Predicting Pedestrian Intention to Cross the Road," IEEE Access, 8, 72558–72569, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2987777

3. E.J. Jung, et al, ” Development of a laser-rangefinder-based human tracking and control algorithm for a marathoner service robot,” IEEE/ASME transactions on mechatronics, 19(6), 1963-1976, 2014, doi: 10.1109/TMECH.2013.2294180

4. D. Li, et al, “A multitype features method for leg detection in 2-D laser range data, ” IEEE Sensors Journal, 18(4), 1675–1684, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2784900

5. V. Carletti, A. Greco, A. Saggese, M. Vento, “Multi-object tracking by flying cameras based on a forward-backward interaction,” IEEE Access, 6, 43905-43919, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2864672

6. F.L. Zhang, et al, “Coherent video generation for multiple hand-held cameras with dynamic foreground,” Computational Visual Media, 6(3), 291–306, 2020, doi: https://doi.org/10.1007/s41095-020-0187-3

7. Інтернет ресурс “CV-Tricks.comLearn Machine Learning, AI & Computer vision” https://cv-tricks.com/object-tracking/quick-guide-mdnet-goturn-rolo/

8. Prateek J. Artificial Intelligence with Python. Packt Publishing, 2017. 446 p.

9. S. Isik, “A Comparative evaluation of well-known feature detectors and descriptors,” International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers, 3(1), 1–6, 2015, doi: 10.18100/ijamec.60004

10. Lucas B., Kanade T. “An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision,” Proceedings of Imaging Understanding Workshop, 4, 121–130, 1981.

Pereverziev O.A., Trapezon K.O. RESEARCH OF SOFTWARE ALGORITHMS FOR TRACKING THE MOVEMENT OF OBJECTS IN ELECTRONIC SECURITY SYSTEMS

With the development of technologies in the field of computer vision, algorithms for detecting moving objects are increasingly used in various fields of science and technology, among which we can highlight interactive video, computer games and simulators, military tracking devices, robotic systems, etc. At the same time, if we consider a person or several people as a moving object, then in this case the task of video surveillance becomes quite complicated, because here it is necessary to take into account the requirements for the speed of processing images of objects and the accuracy of recognizing the latter based on approaches for identifying unique features . The paper considers two software algorithms for object tracking, based on which requirements can be formulated when creating electronic security systems. In particular, it was found that when tracking objects in real time, it is necessary to take into account the color characteristics of the image and the noise of the image. Also, the accuracy of the algorithm is affected by the sharpness of the image and the shape of the tracking object. A comparison of the two considered object tracking algorithms allows us to state that the CAMShift algorithm is simpler, but its stability of operation directly depends on the color characteristics of the image. First of all, this applies to parameters such as color, lighting and image noise. At the same time, the algorithm based on the construction of optical flow involves the procedure of selecting and transforming the color scheme of the image, and building an image mask for tracking special points can be complicated, especially when such parameters as hue, saturation, and brightness of the image pixels are involved in the scheme. The CAMShift algorithm has no such limitations, since in this case the HSV color scheme is already used as the basis of the algorithm and the histogram of the image area is built for the frame after applying the mask and normalizing the values.

Key words: *security system, image, color, feature, object, histogram, mask, accuracy.*

Відомості про авторів

Абдулін М.З. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Амбросьонок А.А. – студентка кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Антонів О.С. – аспірант Державного університету інфраструктури та технологій

Арінушкіна Н.С. – кандидат технічних наук, доцент Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Бажай-Жежерун С.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології оздоровчих продуктів Національного університету харчових технологій

Баран Н.М. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри хімічної технології переробки пластмас Національного університету «Львівська політехніка»

Батюк Л.В. – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри медичної і біологічної фізики і медичної інформатики Харківського національного медичного університету

Беднарська І.С. – асистент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бердниченко Ю.А. – кандидат історичних наук, доцент кафедри технологій транспорту та управління процесами перевезень Державного університету інфраструктури та технологій

Береговий Т.О. – аспірант кафедри хімічної технології композитних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Береза-Кіндзерська Л.В. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету харчових технологій

Бернацький А.В. – кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Бєляновська О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри енергетики ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Болотіна В.В. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка»

Бондарєва В.І. – заступник завідувача відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Будя Ю.С. – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вакалюк Т.А. – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Вишемірська Я.С. – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Войналович О.О. – магістр кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воловик А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Волошкевич П.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки Національного університету «Львівська політехніка»

Воронов Г.К. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Гайтан О.М. – старший викладач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Голенко М.Ю. – Team Lead, Viseven Ukraine

Гондовська А.С. – аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гриценко О.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної технології переробки пластмас Національного університету «Львівська політехніка»

Грищенко Т.М. – старший викладач Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Давлатова Д.Х. – студентка 6 курсу групи 6151м кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Дадиверін В.В. – магістрант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Данилейко О.О. – інженер-технолог І категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України; інженер І категорії кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Демидюков О.В. – аспірант кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Одеського національного морського університету

Дістанов В.Б. – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Домanська Г.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електронні обчислювальні машини» Українського державного університету науки і технологій

Єгоров О.Й. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Електронні обчислювальні машини» Українського державного університету науки і технологій

Єрьомін О.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології, теплотехніки та охорони праці Національної металургійної академії України

Єсакова С.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури

Жданюк Н.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри хімічної технології кераміки та скла Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Желєзна В.В. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри харчових технологій Уманського національного університету садівництва

Зайцева І.С. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Івасенко Д.В. – магістрант Національної академії внутрішніх справ

Казимиренко Ю.О. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Кириченко Г.І. – доктор технічних наук, професор кафедри технологій транспорту та управління процесами перевезень Державного університету інфраструктури та технологій

Кізілова Н.М. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної математики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

Кішянус І.В. – старший викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Ковалевський В.В. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Коваль М.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету

Коверніченко Л.М. – кандидат технічних наук, доцент Криворізького національного університету

Колесник Д.Д. – студентка кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кольцов А.В. – студент 6 курсу групи 6151м кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Костюк О.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства і природокористування

Кочмарський В.З. – кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства і природокористування

Кравченко В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва

Куба В.В. – старший викладач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства і природокористування

Кутковецька Т.О. – доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва

Куц Г.О. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу ефективності енерговикористання та оптимізації енергоспоживання Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

Лагута В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Автоматика та телекомунікації» Українського державного університету науки і технологій

Латанська Л.О. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Лебедєв В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Лебедєва Н.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Левківський В.Л. – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

Лєндич Є.С. – студент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Лузан С.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри зварювання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Лукашенко В.А. – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Лукінюк М.В. – старший викладач кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Любич В.В. – доктор сільськогосподарських наук, професор, професор кафедри харчових технологій Уманського національного університету садівництва

Макарова Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Макруха Т.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної механіки Економіко-технологічного інституту імені Роберта Ельворті

Маначин І.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Українського державного університету науки і технологій

Марчук Г.В. – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

Марчук Д.К. – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

Матюхов Д.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології жирів та продуктів бродіння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Мережко Н.В. – доктор технічних наук, профессор завідувач кафедри товарознавства та митної справи Київського національного торгівельно-економічного університету

Мироненко Л.С. – кандидат технічних наук, доцент кафедри біотехнології, біофізики та аналітичної хімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Мінаєва Ю.Ю. – старший викладач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Мірошниченко Д.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології переробки нафти, газу та твердого палива Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Мотиленко В.А. – здобувач ступеня доктора філософії кафедри електронних обчислювальних машин Українського державного університету науки і технологій

Мурад'ян А.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Одеського національного морського університету

Набок Т.М. – молодший науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Новіков В.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій Уманського національного університету садівництва

Нудченко Л.А. – старший викладач кафедри хімічної технології композитних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Омецинська Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Павленко В.Я. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Пахомова В.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин Українського державного університету науки і технологій

Переверзєв О.А. – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петренко О.І. – кандидат економічних наук, доцент, завідувачка кафедри бізнес-логістики та транспортних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

Петрик Ю.М. – старший викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Петриченко Є.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва

Петров Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Пилипенко О.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Породнов А.О. – аспірант кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Потап О.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Українського державного університету науки і технологій

Потапова К.Р. – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Притула Н.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пустовой Г.М. – аспірант ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Рибальченко М.О. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів Українського державного університету науки і технологій

Розорінов Г.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Саввова О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Савченко Д.О. – студент кафедри технології жирів та продуктів бродіння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Сазонов А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Свідерський В.А. – доктор технічних наук, професор кафедри хімічної технології композитних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Середа В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сизий Б.С. – курсант ВСП «Криворізький фаховий коледж Національного авіаційного університету»

Ситников П.А. – аспірант кафедри зварювання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Сіора О.В. – науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Сірченко І.А. – аспірант кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Смірнова О.Л. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківській політехнічній інститут»

Соколовський М.В. – інженер-технолог І категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Соловей Л.В. – старший викладач кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Соломаха А.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Стрелко О.Г. – доктор історичних наук, професор кафедри технологій транспорту та управління процесами перевезень Державного університету інфраструктури та технологій

Строган О.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки Національного університету «Львівська політехніка»

Сухий К.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Сухий М.К. – студент ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Тарасенко-Клятченко О.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тесленко О.І. – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник відділу ефективності енерговикористання та оптимізації енергоспоживання Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

Тимейчук О.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин Національного університету водного господарства і природокористування

Тимошенко Л.С. – старший викладач кафедри «Електронні обчислювальні машини» Українського державного університету науки і технологій

Трапезон К.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Трапезон К.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Трембус І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фалалєєва Т.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Фесенко О.І. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

Фещенко І.О. – магістрант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фролова Л.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Цяпа С.М. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Чепурний Д.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури

Чередніков В.М. – кандидат технічних наук, доцент, ТОВ «КБ «Аерокоптер»

Череднікова О.В. – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка

Черепанська І.Ю. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Черьопкіна Р.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шамсутдінова Н.О. – інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

Швець Н.О. – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шелешей Т.В. – кандидат технічних наук, старший викладач Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шибакінський В.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Українського державного університету науки і технологій

Щерба В.В. – начальник відділу промислового та цивільного будівництва Державного підприємства «Державний інститут по проектуванню підприємств гірничорудної промисловості «Кривбаспроект»

Щербань В.О. – магістр 2 курсу хіміко-технологічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Юрчук В.С. – студентка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ярута А.М. – кандидат технічних наук, завідувач відділення «Транспортні технології» Харківського автотранспортного фахового коледжу

Науковий журнал

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 33 (72) № 6 2022

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *В. Гайдабрус*

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. 27,17. Ум. друк. арк. 34,86. Зам. № 1222/530
Підписано до друку 30.12.2022. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.