

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет
будівництва і архітектури

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут телекомунікацій
і глобального інформаційного простору

Екологічна безпека та природокористування

Environmental safety and natural resources

Збірник наукових праць

ВИПУСК 47

2023

**Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури
Національна академія наук України
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору**

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Kyiv National University of Construction and Architecture
National Academy of Sciences of Ukraine
Institute of Telecommunications and Global Information Space**

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

**ENVIRONMENTAL SAFETY AND
NATURAL RESOURCES**

Збірник наукових праць

Випуск 3 (47), липень – вересень 2023 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 3 (47), July – September 2023

Founded in 2008
The journal is published 4 times a year

КИЇВ 2023

KYIV 2023

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:

О.М. ТРОФИМЧУК, д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. НАНУ

ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:

О.С. ВОЛОШКІНА, д-р техн. наук, проф.

Н. КАСАГЛІ, професор, Італія

Н. МАРГВЕЛАШВІЛІ, PhD, Австралія

Ю.І. КАЛЮХ, д-р техн. наук, проф.

ВИКОНАВЧИЙ РЕДАКТОР:

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

В.О. ВАСЯНИН, д-р техн. наук

О.М. ГУНЧЕНКО, канд. техн. наук, проф.

С.О. ДОВГИЙ, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
академік НАНУ

В.Б. ЄГОРОВ, д-р техн. наук

С.В. ЗАЙЦЕВ, д-р техн. наук, проф.

Н.В. КАСАТКІНА, д-р техн. наук

О.В. КОПІЙКА, д-р техн. наук, проф.

Г.М. КОЧЕТОВ, д-р техн. наук, проф.

Т.І. КРИВОМАЗ, д-р техн. наук, проф.

О.Є. КРУЖИЛКО, д-р техн. наук

В.О. МІЛЕЙКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.

Т.О. НЕГРІЙ, канд. техн. наук

О.В. НЕСТЕРЕНКО, д-р техн. наук

Д.В. СТЕФАНИШИН, д-р техн. наук

С.В. СУКАЧ, д-р техн. наук, проф.

О.М. ТЕРЕНТЬЄВ, д-р техн. наук

О.М. ТИХЕНКО, д-р техн. наук, проф.

Т.М. ТКАЧЕНКО, д-р техн. наук

В.М. ТРИСНЮК, д-р техн. наук

В.О. УСТИМЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, проф.

В.Ф. ФРОЛОВ, д-р техн. наук, проф.

Д.І. ЧЕРНИЙ, д-р техн. наук

С.Й. ШАМАНСЬКИЙ, д-р техн. наук

Є.О. ЯКОВЛЄВ, д-р техн. наук

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА

М. Й. ВАЛЕРІ, проф., Польща

М. ЖЕЛЕЗНЯК, д-р техн. наук, професор,
Фукусіма, Японія

Д. МІНТЕР, проф., Великобританія

А. МІШО, дослідник, Франція

М.Г. МУСТАФАСЬ, д-р с.-г. наук, Азербайджан

Я. ПЕКУТІН, проф., Польща

ПІНГ ЛУ, проф., Китай

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол № 12 від 18.09.2023)

Збірник наукових праць включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія "Б"), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук та доктора філософії за напрямом "технічні науки" за спеціальностями 101, 183 (Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886), 263 (Наказ Міністерства освіти і науки України від 15.11.2022 № 1026)

ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА

- Екологічна безпека та основи природокористування
- Цивільна безпека
- Інформаційні технології та математичне моделювання
- Дискусійні повідомлення

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ

03186, м. Київ, Чоколівський бульв., 13,
Інститут телекомунікацій і глобального
інформаційного простору НАН України

Телефони: (044) 245-87-97

(044) 524-22-62

E-mail: e.voloshki@gmail.com

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 14146-3117 Р від 27.05.2008 р.

Електронна версія збірника в Інтернеті
<http://www.es-journal.in.ua> українською
та англійською мовами



Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Олійник О.Я., Телима С.В., Калугін Ю.І., Олійник Є.О. Аналіз впливу гетерогенності біоплівки на ефективність вилучення органічних забруднень в біореакторах.....	5
Mustafayev M.G., Najiyev A.I., Hasanova A.Kh. The potential development way of Azerbaijan's melioration and water management area...	21
Ващенко В.М., Кордуба І.Б. Проблеми безпечної експлуатації Запорізької АЕС в умовах війни в Україні.....	29
Тихенко О.М., Дейнека К.С. Екологічні аспекти використання технології штучного фотосинтезу для декарбонізації довкілля.....	39
Глущенко Р.О., Ткаченко Т.М. Керування дощовими стоками «зеленими» покрівлями на прикладі торговельно-ділового комплексу «Перехрестя» в м. Дніпро.....	49

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Дерюгін О.В., Негрій Т.О., Боровицький О.М., Столбченко О.В., Архірей М.М. Оцінка індексу професійного ризику вальника лісу.....	59
---	----

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Довгий С.О., Копійка О.В., Козлов О.С., Литвиненко А.О. Інформаційні технології ІТ-сервісів архітектури додатків.....	75
Трофимчук О., Загородня С., Вишняков В., Клименко В., Шевякіна Н., Радчук І., Томченко О., Слестін С. Космічний моніторинг порушення стану екосистеми Чорноморського біосферного заповідника внаслідок військових дій.....	94
Ustimenko V., Pustovit O. On security of GIS systems with N-tier architecture and family of graph based ciphers.....	113
Зайцев С.В., Василенко В.М., Триснюк Т.В., Сокоринська Н.В. Метод структурної адаптації каскадних кодів для забезпечення заданої достовірності передачі інформації безпроводових систем передачі даних	133
Триснюк В.М., Шумейко В.О. Інформаційно-технічне моделювання балочних структур за матеріалами мультиспектральних космознімків...	144
Kapanadze G., Balavadze V., Kristesiashvili L., Archvadze V. Search for an equal-strength contour inside a viscoelastic rectangle.....	154
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	163

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Oliylyk O., Telyma S., Kalugin Yu., Oliylyk Ye. An analysis of the influence of the biofilm heterogeneity on the effectiveness of organic pollution removal in bioreactors.....	5
Mustafayev M.G., Hajiyev A.İ., Hasanova A.Kh. The potential development way of Azerbaijan's melioration and water management area...	21
Vashchenko V., Korduba I. Problems of safe operation of Zaporizka NPP in the conditions of war in Ukraine.....	29
Tykhenko O., Deineka K. Environmental aspects of using artificial photosynthesis technology for environmental decarbonization.....	39
Hlushchenko R., Tkachenko T. Rainwater management by “green” roofs on the example of trade-business centre “Perekhrestia”, Dnipro city.....	49

CIVIL SAFETY

Deryugin O., Nehrii T., Borovytskyi O., Stolbchenko O., Arkhirei M. Evaluation of the occupational risk index of the forest faller.....	59
--	----

INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

Dovgiy S., Kopyika O., Kozlov O., Lytvynenko A. Information technologies of application architecture`s IT services.....	75
Trofymchuk O., Zahorodnia S., Vishnyakov V., Klymenko V., Sheviakina N., Radchuk I., Tomchenko O., Slastin S. Space monitoring of violation of the ecosystem condition of the Black Sea biosphere reserve as a result of military actions.....	94
Ustimenko V., Pustovit O. On security of GIS systems with N-tier architecture and family of graph based ciphers.....	113
Zaitsev S., Vasylenko V., Trysnyuk T., Sokorinska N. Method of adaptation of cascade codes to ensure reliability of information transmission of wireless data transmission systems.....	133
Trysnyuk V., Shumeiko V. Information technologies of simulation of beam structures using multispectral spacecraft materials.....	144
Kapanadze G., Balavadze V., Kristesiashvili L., Archvadze V. Search for an equal-strength contour inside a viscoelastic rectangle.....	154
INFORMATION FOR AUTHORS.....	163

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

УДК 628.35

Oleksandr Oliynyk, Corresponding member of NASU, D.S. (Technical), Professor, Chief of the Department of Applied Hydrodynamics

Sergiy Telyma, PhD, Senior Research Associate
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0109-0696> *e-mail*: sertelyma@gmail.com

Yuriy Kalugin, PhD, Senior Research Associate
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0720-0665> *e-mail*: forkalugin@ukr.net

Yevheniy Oliynyk, Principal engineer

Institute of Hydromechanics of NASU, Kyiv, Ukraine

AN ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE BIOFILM HETEROGENEITY ON THE EFFECTIVENESS OF ORGANIC POLLUTION REMOVAL IN BIOREACTORS

***Abstract.** A mathematical model of biological purification of wastewater from organic pollutants in the conditions of an aeration tank with a fixed biocenosis (biofilm of microorganisms) is presented. At the same time the peculiarities of the formation and modeling of a complex heterogeneous stratified structure of a biofilm with variable processes and parameters along its thickness are considered and taken into account on in particular the processes of mass transfer and concentration of microorganisms. It shown that the treatment processes in heterogeneous stratified biofilm are designated by the effective diffusion coefficient which is depended on the pollutions concentration. Owing to that the pollutions concentration is changing of along the biofilm thickness and increase from the surface to the biofilm bottom the decreasing of the effective diffusion coefficient is observed. On the base of the provided experimental investigations the change of the effective diffusion parameter along the biofilm thickness may be specified according to linear law. The quantity criteria of the first and zero order kinetic and Monod equation were used in the practical calculations. Ascertain that the substrate removal have a place on the early part of the biofilm which amounts to 20–25% from the its full thickness. On the base of the created biofilm model of the heterogeneous-stratified structure the comparative analysis and valuation of the different investigations of the pollutions removal during the treatment processes at using of the homogeneous and heterogeneous structure of the biofilm were treated. It was designated that the pollutions removal effectiveness depends on the biofilm features. So at the some main parameters the homogeneous and stratified biofilms indicate almost the same microbial activity and the difference depends on the effective diffusion coefficient*

on the biofilm output. In the dependence on the hydrodynamic conditions of the treatment processes the homogeneous biofilm activity may be lower, higher or similar one of the stratified biofilm. Heterogeneous biofilm has the lower activity near the biofilm bottom at the high values of the effectiveness coefficient than the homogeneous one at the average values of this coefficient and the substrate against of the which the microorganisms growth is depended on to penetrate more in depth in stratified biofilm than in homogeneous one.

Key words: stratified model; biofilm; organic pollution; concentrations; treatment; effectiveness.

О.Я. Олійник, С.В. Телима, Ю.І. Калугін, Є.О. Олійник

Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ГЕТЕРОГЕННОСТІ БІОПЛІВКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИЛУЧЕННЯ ОРГАНІЧНИХ ЗАБРУДНЕНЬ В БІОРЕАКТОРАХ

Анотація. Наведена математична модель біологічної очистки стічних вод від органічних забруднень в умовах аеротенка з закріпленим біоценозом (біоплівкою мікроорганізмів). При цьому розглядаються і враховані особливості формування і моделювання складної неоднорідної стратифікованої структури біоплівки зі змінними процесами і параметрами по її товщині, зокрема, процеси масопереносу і концентрації мікроорганізмів. Показано, що ці процеси в гетерогенній стратифікованій біоплівці визначаються коефіцієнтом ефективної дифузії, який залежить від концентрації забруднень. В зв'язку зі зміною концентрації забруднень по товщині біоплівки із збільшенням від поверхні до дна спостерігається зменшення значення коефіцієнта ефективної дифузії по її товщині. На основі проведених експериментальних досліджень зміна параметра ефективної дифузії по товщині біоплівки може прийматись по лінійному закону. Наведено кількісні критерії застосування кінетики першого та нульового порядків в практичних результатах та використання рівняння Моно. З'ясовано, що вилучення субстрату відбувається переважно на початковій ділянці біоплівки, яка складає наближено 20–25% від загальної її товщини. На основі створеної моделі гетерогенно стратифікованої структури біоплівки виконано порівняльний аналіз і оцінку різних досліджень вилучення забруднень в процесі очистки при гомогенній та гетерогенній структурі біоплівки. Визначено, що ефективність вилучення забруднень залежить від основних характеристик біоплівок. Так, при деяких значеннях основних параметрів гомогенна і стратифікована біоплівки показують майже однакові значення мікробної активності і ця різниця залежить в основному від коефіцієнта ефективної дифузії на виході із біоплівки. В залежності від гідродинамічних умов процесу очистки активність гомогенної біоплівки може бути нижча, вища і аналогічна активності стратифікованої біоплівки. Стратифікована біоплівка при великих значеннях коефіцієнта ефективної дифузії в кінці біоплівки має меншу активність, ніж гомогенна при середньому його значенні, а субстрат, від якого залежить зростання мікроорганізмів, проникає глибше в стратифікованій біоплівці, ніж в гомогенній.

Ключові слова: стратифікована модель; біоплівка; органічне забруднення; концентрації; очистка; ефективність.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.5-20>

Вступ

Як відомо, облаштування додаткового завантаження із закріпленим біоценозом на його поверхні з високою концентрацією мікроорганізмів (біоплівкою) поряд із завислим біоценозом (активним мулом) при біологічній очистці стічних вод в біореакторах-аеротенках дозволяє значно підвищити ефективність вилучення органічних забруднень біологічними методами. При цьому в попередніх дослідженнях активні частини біоплівки приймалися як однорідні, гомогенні структури, а параметри, які в основному визначають вилучення забруднень, приймалися постійними по товщині біоплівки [1–3]. Проте, в реальних умовах біоплівка має неоднорідну гетерогенно стратифіковану структуру зі змінними основними параметрами по її товщині, що доведено багатьма експериментальними дослідженнями.

Таким чином, при дослідженні в реальних умовах очистки стічних вод в біореакторах з закріпленим біоценозом (біоплівкою) однорідність структури біоплівки потребує подальшого обґрунтування та врахування неоднорідної по її товщині стратифікованої структури, яка в основному залежить від зміни концентрацій (щільності) мікроорганізмів X_L (ХПК) по товщині біоплівки. При цьому вважається, що концентрація X_L і параметр ефективної дифузії D_L будуть основними факторами стосовно оцінки ефективності роботи біоплівки. При вилученні субстрату в біореакторах формується гетерогенна стратифікована структура біоплівки із змінною концентрацією (щільністю) мікроорганізмів по її товщині, яка буде більш щільна біля дна і менш щільна біля поверхні, через яку поступає субстрат в біоплівку із біореактора через пограничний шар рідини. І в такій біоплівці при вирішенні задач очистки буде також змінюватись ефективна дифузія, яка в загальному випадку залежить від щільності біоплівки X_L .

Мета роботи

Мета роботи полягає в розробці інженерних методів розрахунку вилучення органічних забруднень (ОЗ) біоплівкою в біореакторах на основі запропонованої моделі стратифікованої біоплівки. При цьому враховуються особливості і фактори формування структури цієї біоплівки, які є основними параметрами в розрахунках.

Результати досліджень

Проведені дослідження показали, що основними факторами і параметрами ефективності роботи такої біоплівки являються змінна концентрація мікроорганізмів X_L і змінний параметр ефективної дифузії D_L , який формує цю концентрацію і залежить від неї згідно з рівнянням, одержаним експериментальним шляхом [1, 2]:

$$D_L = D_w \left(1 - \frac{0,48 X_L^{0,93}}{11,19 + 0,27 X_L^{0,99}} \right), \quad (1)$$

де D_w – коефіцієнт ефективної дифузії субстрату в рідинному середовищі.

Із рівняння (1) видно, що при збільшенні концентрації X_L відбувається зменшення рідинної фази, тобто, пористості по товщині біоплівки, що призводить до зменшення коефіцієнта дифузії D_L . Тому в деяких роботах при визначенні коефіцієнта дифузії D_L приймається його безпосередня залежність від пористості ε , тобто, $D_L = f(\varepsilon_L)$.

На основі моделі (1) коефіцієнт дифузії D_L буде зменшуватись по товщині біоплівки і за даними існуючих експериментальних досліджень це зменшення можна прийняти по лінійному закону, а саме:

$$D_L(z) = D_{L_0} - D_{L_i} z, \quad (2)$$

а невідомі коефіцієнти D_{L_0} і D_{L_i} визначаються з прийнятої моделі при $z = 0$ $D_L = D_{L_0}$, а при $z = \delta$ $D_L = D_{L_0} - \delta D_{L_i}$.

Реалізація запропонованих рівнянь з визначення змін параметра D_L по товщині біоплівки базується на підставі використання даних дослідів, наведених в роботах [3, 4]. У даному випадку рівняння (2) можна записати у наступному вигляді:

$$\bar{D}_L(z) = \bar{D}_{L_0} - 0,001z = 0,6 - 0,001\delta. \quad (3)$$

Як приклад розрахунку в Таблиці 1 наведені дані величини ефективної дифузії в залежності від товщини біоплівки.

Таблиця 1. Значення коефіцієнта ефективної дифузії в залежності від товщини біоплівки

δ мкм	0	50	100	150	200	250	300
\bar{D}_L	0,60	0,55	0,48	0,44	0,40	0,36	0,30

де $\bar{D}_L(z) = \frac{D_L(z)}{D_w}$, $\bar{D}_{L_0} = \frac{D_{L_0}}{D_w}$.

При оцінці роботи біореакторів з біоплівкою, крім коефіцієнта дифузії, важливим параметром являється щільність (концентрація) мікроорганізмів X_L . В умовах неоднорідної стратифікованої структури біоплівки, на відміну від гомогенної структури, концентрація X_L залежить від коефіцієнта дифузії D_L і δ , змінюється по товщині біоплівки і буде більш ущільнена біля її дна при $z = \delta$ і значно менш ущільнена на проникній поверхні, на якій вона формується ($z = 0$) і через яку субстрат поступає в біоплівку. Використовуючи для визначення концентрації залежність (1), після деяких перетворень одержимо наступне рівняння:

$$X_L = -38,856 + 38,976(\bar{D}_L)^{-0,7782}, \quad (4)$$

яке для подальшого застосування доцільно переписати у наступному вигляді:

$$X_L = -38,856 + 38,976 \left(\frac{1 - \bar{z}}{k} \right), \quad (5)$$

де $\bar{z} = \frac{z}{\delta}$, $\psi = \frac{D_{L_0}}{\delta D_L}$, $\bar{D}_L = \frac{D_L}{D_W}$, $K = \frac{D_W}{D_{0L}}$.

Так як в запропонованій моделі використовуються відношення $\bar{X}_L = \frac{X_L}{X_{Lcp}}$, то для визначення середнього значення концентрації X_{Lcp} в біоплівці приймаємо, що

$$X_{Lcp} = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta X_L(z) dz = -38,856 - 175,7258 \psi k^{0,7282} \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{\psi} \right)^{0,2218} - 1 \right]. \quad (6)$$

Як уже зазначалось в попередніх дослідженнях, ефективність вилучення забруднень різного походження біоплівкою в значній мірі буде залежати від прийнятої в розрахунках товщини біоплівки δ [5, 6]. У випадку одного субстрату гетеротрофними мікроорганізмами формується однорідна по властивості біоценозу структура активної біоплівки товщиною δ . Крім того, на формування біоплівки впливають різні процеси, які враховуються в прийнятих кінетичних реакціях очистки, зокрема Моно, і доповнені за рахунок врахування таких важливих факторів, як її розпад і відрив [6]. В розрахунках товщини біоплівки доцільно визначати також час, коли настає стаціонарний режим роботи біоплівки товщиною δ . На відміну від інших процесів, досягнення дії стаціонарного стану для мікроорганізмів всередині біоплівки буде складати від декількох діб до тижнів. Так, в роботі [6] для характерних параметрів кінетичних моделей очистки ОЗ біоплівкою на рис. 1 наведені графіки з визначення товщини біоплівки при вилученні ОЗ в стаціонарних умовах, а на рис. 2 – формування товщини біоплівки в нестаціонарних умовах.

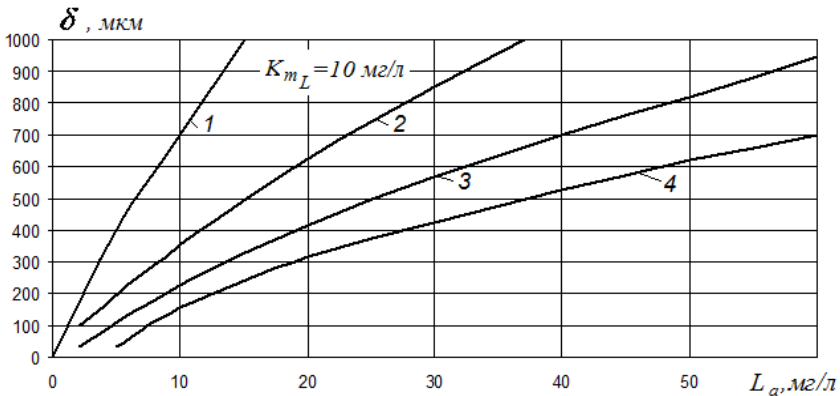


Рис. 1. Графіки для визначення активної товщини біоплівки δ в стаціонарних умовах для різних значень b , год⁻¹: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,03; 4 – 0,04

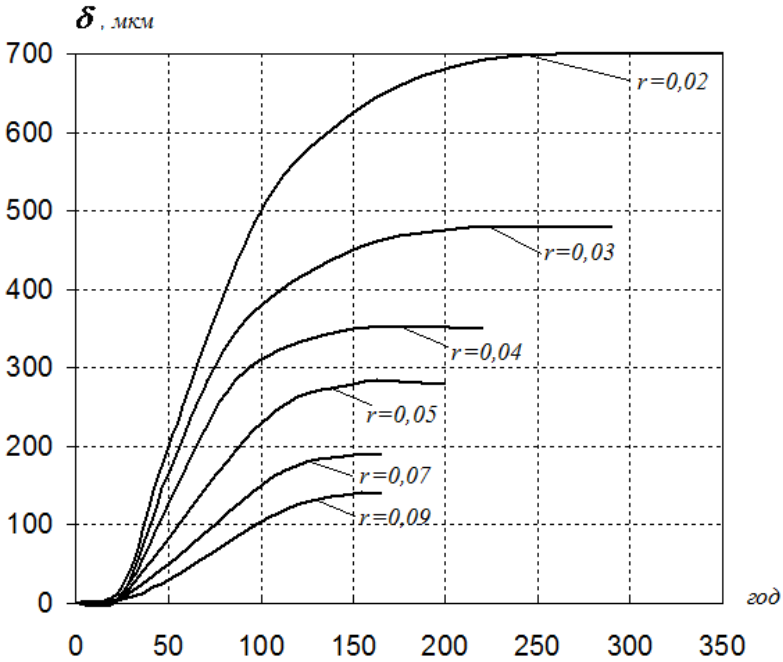


Рис. 2. Графіки формування товщини біоплівки в нестационарних умовах при різних значеннях $r = b$

З деяким наближенням запропоновані рекомендації з визначення товщини δ можуть бути прийняті і враховані в моделях і розрахунках очистки стратифікованою біоплівкою. Для визначення активної товщини біоплівки можна також скористатися даними, наведеними в Таблиці 2.

В Таблиці 2 показана зміна товщини активної біоплівки в залежності від зміни концентрації субстрату L_a , який поступає в біоплівку при різній щільності (концентрації) X_L в біоплівці. Так, при значній концентрації X_L товщина біоплівки збільшується, але повільно, ніж при меншій концентрації X_L при однаковому збільшенні концентрації субстрату L_a , який поступає в біоплівку.

Таблиця 2. Значення товщини біоплівки $\delta = f(L_\delta, X_L)$

X_L мг/см ³	$L_\delta = 0,01$ мг/см ³ δ , см	$L_\delta = 0,02$ мг/см ³ δ , см	$L_\delta = 0,04$ мг/см ³ δ , см	$L_\delta = 0,06$ мг/см ³ δ , см	$L_\delta = 0,08$ мг/см ³ δ , см	$L_\delta = 0,1$ мг/см ³ δ , см
5	0,045	0,055	0,068	0,072	0,078	0,083
15	0,022	0,028	0,034	0,038	0,041	0,043
25	0,014	0,018	0,029	0,025	0,030	0,028
50	0,010	0,08	0,013	0,014	0,016	0,017

При розрахунках товщини біоплівки використано співвідношення $100 \text{ мкм} = 0,01 \text{ см} = 10^{-4} \text{ м}$

В проведених дослідженнях при вилученні забруднень біоплівкою, яка утворюється на облаштованих завантаженнях в різних біореакторах, профіль вилучених концентрацій по товщині біоплівки і її основні параметри визначались при умові, що концентрація поступаючих забруднень в біоплівку L_{δ_0} дорівнює концентрації забруднень в об'ємі рідини в біореакторі L_a .

Структура гідродинаміки потоку при визначенні L_a в різних біореакторах була різною і не приймалась до уваги в дослідженнях. Проте, навіть при повному перемішуванні рідини в біореакторах з біоплівкою спостерігалось утворення на її зовнішній поверхні пограничного шару у вигляді рідинної плівки товщиною δ_p , із якої забруднення поступають в біоплівку. Тому при реалізації біоплівкових моделей очистки існує необхідність врахування зазначених процесів масопереносу забруднень в біоплівку через пограничний шар, який значно впливає на одержані результати очистки. Деякі питання, пов'язані з формуванням пограничного шару і необхідності при цьому врахування можливих різних гідродинамічних режимів руху рідини в ньому, структури пограничного шару, зокрема в умовах його формування на криволінійній поверхні, розглянуті в попередніх роботах [5, 6, 10]. В цілому, активність гомогенної біоплівки може бути нижча, вища і дорівнювати активності стратифікованої біоплівки. Стратифікована біоплівка зі значним коефіцієнтом ефективної дифузії D_{iL} (в кінці біоплівки) має меншу активність, ніж гомогенна із середнім значенням коефіцієнта дифузії

$$D_{L_{\text{гом}}} = \frac{D_{L0} + D_{L1}}{2},$$

а субстрат, від якого залежить зростання мікроорганізмів,

проникає глибше в стратифікованій біоплівці, ніж в гомогенній.

Наведений порівняльний аналіз виконано на основі використання кінетики реакції нульового порядку. В подальшому доцільно буде провести зазначений аналіз для умов використання нелінійної кінетичної реакції Моно.

У загальному випадку величина потоку забруднень, які поступають в біоплівку через її поверхню, визначається при $z = 0$ як:

$$I_L = -D_L \cdot \frac{dL}{dz}. \quad (7)$$

Рівняння (7) свідчить про те, що масоперенос забруднень в пограничному шарі відбувається за рахунок дифузії.

Для використання (7) у подальших розрахунках його доцільно переписати у вигляді:

$$I_L = -D_{Lp} \frac{L_{\delta_0} - L_a}{\delta_p} = K_{\delta p} (L_a - L_{\delta_0}) = \frac{1}{R_p} (L_a - L_{\delta_0}), \quad (8)$$

а в якості граничної умови при реалізації запропонованих моделей наступний вираз:

$$\frac{dL}{dz} = \frac{K_{\delta p}}{D_{L0}} (L - L_a).$$

В наведених рівняннях також прийнято

$$K_{\delta p} = \frac{1}{R_p} = \frac{D_p}{\delta_p}, \quad (9)$$

де $K_{\delta p}$ – коефіцієнт масопереносу, який залежить від товщини рідинної плівки (пограничного шару) δ_p і коефіцієнта дифузії в рідинній плівці D_p . В процесі досліджень було проведено обґрунтування зовнішнього опору R_p коефіцієнта масопереносу $K_{\delta p}$ в залежності від гідродинаміки потоку в рідинній плівці, яка формується на різних формах елементів завантаження з біоплівкою. Так, на рис. 3 як приклад для оцінки впливу δ_p наведено графік $I_L = f(L_a, \delta_p)$, побудований для випадку $\delta = 200$ мкм за кінетикою Моно в біореакторі-змішувачі, тобто, при $L_{\delta} = const$ [5, 6].

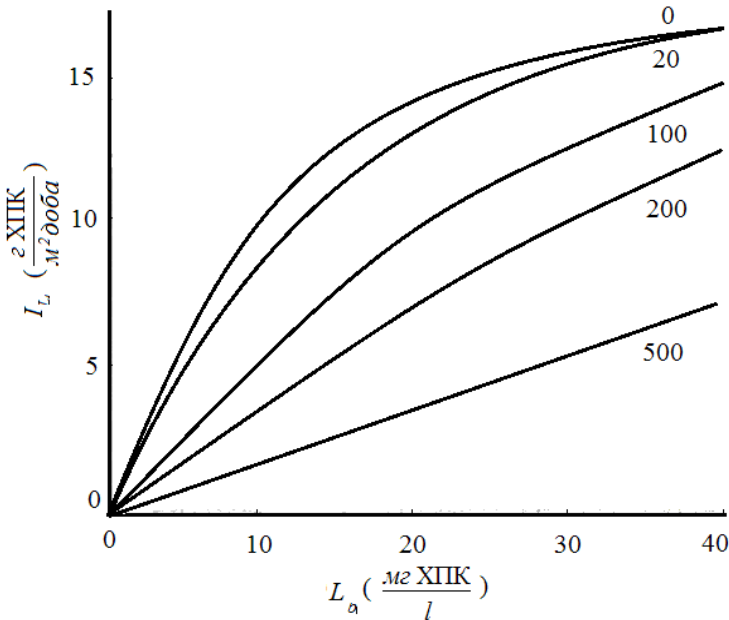


Рис. 3. Графік залежності потоку $I_L = \int L_a \delta_p$ за кінетикою Моно при $\delta = 200$ мкм

Як видно з графіка, при значній товщині пограничного шару $\delta_p = 500$ мкм, потік ОЗ зменшується майже на 70%. Значні і досить ґрунтовні експериментальні дослідження параметра I_L при формуванні рідинної плівки проведені в трубчатому реакторі, в якому у порівнянні з іншими біореакторами більш ґрунтовно описані гідродинамічні процеси [6, 7]. Вплив і аналіз цих процесів на обґрунтування параметра K_p і товщини δ_p проведено в попередніх роботах [7, 8]. В результаті досліджень побудовані розрахункові графіки з визначення товщини пограничного шару δ_p , а в окремих випадках і біоплівки δ при різних значеннях завантаження B_A і гідродинамічних умовах

в пограничному шарі R_δ і в трубчатому реакторі Re_T . На рис. 3 в якості прикладу наведені результати цих досліджень при $B_A = 10 \frac{z}{m^2 \text{ доба}}$.

Проведений аналіз одержаних досліджень показав, що при низьких завантаженнях $B_A > 2,5 \frac{z}{m^2 \text{ доба}}$ гідродинамічні умови в пограничному шарі майже не впливають на зростання його товщини δ_p .

Методи розрахунку очистки забруднень різного походження в біореакторах з біоплівкою з використанням параметра B_A наведені в роботах [2, 9]. В цих роботах розглянуто спроби визначення товщини δ_p і коефіцієнта K_p теоретичним шляхом на основі відомих параметрів (чисел), які характеризують режим потоку в пограничному шарі.

Слід зауважити, що в багатьох роботах товщина δ_p приймається десь в межах $\delta_p = 100\text{-}300$ мкм без достатнього обґрунтування і розглядається переважно ламінарний режим потоку в рідинній плівці.

Як правило, біоплівка формується на непроникному завантаженні і в кінці біоплівки швидкість зростання мікроорганізмів різко зменшується і практично відсутня утилізація субстрату, тобто, на нижній поверхні біоплівки подальше вилучення субстрату не відбувається і дифузійний потік дорівнює нулю, що і прийнято в граничній умові при $z = \delta \quad \frac{dL}{dz} = 0$. В роботах [6, 8] проведено визначення мінімальної концентрації L_{\min} , нижче якої потік субстрату дорівнює нулю і вище якої відбувається нормальний позитивний процес очистки:

$$L_{\min} = \frac{K_{ML}b}{Y_L \mu_{\max} - b}. \quad (10)$$

Таким чином, в реальних умовах при очистці стічних вод, зокрема органічного походження, в біореакторах зі зваженим біоценозом очистка буде відбуватись, як правило, гетерогенною стратифікованою біоплівкою. В зазначених умовах для гетерогенної стратифікованої біоплівки використовується рівняння, яке описує утилізацію органічних забруднень при одиночному лімітуючому субстраті в стаціонарних умовах і має наступний вигляд:

$$D_L(z) \frac{d^2L}{dz^2} - D_{L1} \frac{dL}{dz} - \frac{\mu_{\max} X_L}{Y} \cdot \frac{L}{K_{mL} + L} = 0. \quad (11)$$

Дане балансове рівняння описує швидкість утилізації субстрату в умовах нелінійної кінетики реакції Моно. Позначення прийнятих величин в рівнянні (11) наводиться в роботах [1-3].

В запропонованій математичній моделі стратифікованої біоплівки приймається [4]:

1. Зв'язок між коефіцієнтом ефективної дифузії D_L і щільністю біоплівки X_L згідно з рівнянням (1) у наступному вигляді:

$$\frac{D_L}{D_w} = 1 - \frac{0.48X_L^{0.93}}{11.19 + 0.27X_L^{0.99}}. \quad (12)$$

2. Коефіцієнт D_L в якості функції, яка залежить від концентрації L по лінійному закону,

$$D_L(z) = D_{L0} - D_{L1}z, \quad (13)$$

де невідомі коефіцієнти D_{L0} і D_{L1} приймаються згідно з виразами:

$$D_L(z) = D_{L0} - D_{L1}\delta, \quad (14)$$

тобто, при $z = 0$ $D_L = D_{L0}$, а при $z = \delta$ маємо $D_L = D_{L0} - D_{L1}\delta$.

Нижче, в Таблиці 3, наведені значення ефективної дифузії в гетерогенній стратифікованій біоплівці \bar{D}_{Lz} по її товщині z для $\delta = 300$ мкм, одержані експериментальним шляхом [4].

Таблиця 3. Значення $\bar{D}_{L\delta} = \frac{D_{Lz}}{D_w}$, одержані по товщині біоплівки $\delta = 300$ мкм експериментальним шляхом

$z, \text{мкм}$	0	50	100	150	200	250	300
\bar{D}_{Lz}	0,65	0,60	0,56	0,48	0,44	0,37	0,30

Виходячи з даних Таблиці 3, одержана наступна залежність для визначення коефіцієнта дифузії \bar{D}_{Lz} по товщині біоплівки z при $\bar{D}_{L0} = 0.65$:

$$\bar{D}_{Lz} = 0.65 - 0.001z. \quad (15)$$

Слід відмітити, що в прийнятій і реалізованій моделі забруднення поступають в біоплівку із біореактора через пограничний шар (рідинну плівку).

У цьому випадку значення коефіцієнта ефективної дифузії рекомендується приймати в середньому $D_{L0} = 0.8D_w$ [1, 2]. При реалізації моделі було прийнято наступне відношення:

$$k = \frac{D_w}{D_{0\delta}} = 1.25. \quad (16)$$

Запишемо рівняння (11) в безрозмірній формі у вигляді:

$$\frac{d^2\bar{L}}{dz^2} + \frac{1}{\bar{z} - \psi} \frac{d\bar{L}}{d\bar{z}} - \frac{\mu_{\max} \delta^2 X_{L\bar{n}\delta} \bar{X}_L}{Y L_a D_w \bar{D}_L} \cdot \frac{\bar{L}}{\bar{K}_{mL} + \bar{L}} = 0, \quad (17)$$

в якому прийнято

$$\bar{z} = \frac{z}{\delta}, \quad \bar{L} = \frac{L}{L_a}, \quad \bar{K}_{mL} = \frac{K_{mL}}{L_a}, \quad \bar{X}_L = \frac{X_L}{X_{Lcp}}, \quad \bar{D}_L = \frac{D_L}{D_w}, \quad \psi = \frac{D_{L0}}{\delta D_{L1}}$$

Для подальшого аналізу приймаємо:

$$\bar{D}_L = \frac{D_{LO}}{D_W} - \frac{D_{L1}}{D_W} \bar{z} = \frac{1}{k} \left(1 - \frac{\bar{z}}{\psi} \right), \quad k = \frac{D_W}{D_{LO}}. \quad (18)$$

Із врахуванням рівняння (17) після деяких перетворень для визначення концентрацій \bar{X}_L одержимо:

$$X_L = -38,85 + 38,98 \left(\frac{1 - \frac{\bar{z}}{\psi}}{k} \right)^{-0,78}. \quad (19)$$

Використовуючи залежність (19), можна визначити середнє значення концентрації в біоплівці $\bar{X}_{L\bar{n}\delta}$ за наступною формулою:

$$X_{Lcp} = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta X_L(z) dz = -38,85 - 175,73 \psi k^{0,78} \left[\left(1 - \frac{1}{\psi} \right)^{0,22} - 1 \right], \quad (20)$$

де k – коефіцієнт масопереносу забруднень в рідинній плівці.

На підставі одержаних результатів з визначення концентрацій X_L і X_{Lcp} можна визначити значення концентрацій $\bar{X}_L = \frac{X_L}{X_{Lcp}}$ в основному рівнянні (17).

Після деяких перетворень основне рівняння для вирішення і аналізу буде мати в безрозмірній формі наступний вигляд:

$$\frac{d^2 \bar{L}}{d\bar{z}^2} + \frac{1}{\bar{z} - \psi} \frac{d\bar{L}}{d\bar{z}} - \Phi^2 F(\bar{z}) \frac{\bar{L}}{K_m + \bar{L}} = 0, \quad (21)$$

де $F(\bar{z}) = \frac{\bar{X}_L}{D_L}$, а відомий модуль Tile буде визначатись за формулою:

$$\Phi = \sqrt{\frac{\mu_{\max} X_{Lcp} \delta^2}{Y L_a D_W}}. \quad (22)$$

Рішення рівняння (21) виконується при наступних граничних умовах:

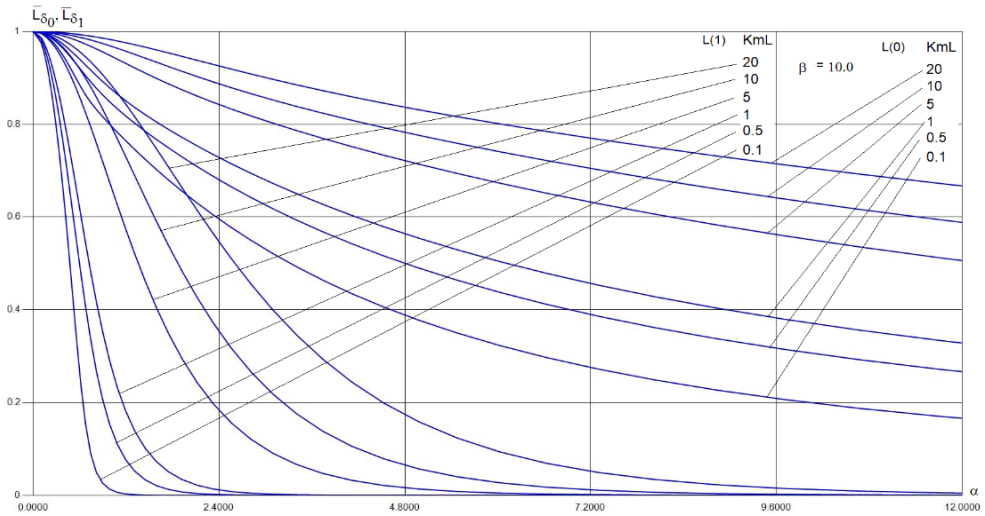
$$\text{при } \bar{z} = 0 \quad \frac{d\bar{L}}{d\bar{z}} = -\beta_L (1 - \bar{L}) \quad (23)$$

$$\text{при } \bar{z} = 1 \quad \frac{d\bar{L}}{d\bar{z}} = 0 \quad (24)$$

$$\beta_L = k \frac{K_L}{D_W} \delta = \frac{K_L}{D_{L0}} \delta, \quad (25)$$

де K_L – коефіцієнт масопереносу забруднень в рідинній плівці.

В результаті рішення рівняння (21) чисельними методами побудовані розрахункові графіки і таблиці для визначення концентрацій на зовнішній поверхні біоплівки $L_z = L_{\delta_0}(z = 0)$ та на внутрішній поверхні біоплівки $L_z = L_{\delta_1}(z = \delta)$, а також графіки і таблиці для визначення зміни концентрацій L_z по товщині біоплівки z (рис. 4). Наведені на графіках і таблицях результати розрахунків одержані для прийнятих різних, достатньо обґрунтованих характеристик $\beta_L, \Phi, \alpha_L, \psi$. Так, при визначенні параметра переносу забруднень рідинною плівкою β_L приймалось згідно з виразом (25), який також характеризує значення потоку забруднень, які безпосередньо поступають в біоплівку на очистку, а при визначенні модуля Φ прийнято $\Phi^2 = 1,25\alpha_L$, $\alpha_L = \frac{\mu_{\max} X_{Lcp} \delta^2}{\psi D_{L0} L_a}$ для різних значень параметра $\psi = \frac{D_{L0}}{D_{L1}}$.



А

Рис. 4. Графіки для визначення концентрацій на зовнішній $\bar{L}_{\delta_0} = \frac{L_{\delta_0}}{L_a}$ ($\delta \neq 0$) і

внутрішній $\bar{L}_{\delta_1} = \frac{L_{\delta_1}}{L_a}$ ($z = \delta$) поверхнях біоплівки при $\beta_L = 10,0$, значенні параметра

$\psi = 3,0$ і різних значеннях $\bar{K}_{ml} = \frac{K_{ml}}{L_a}$

В якості прикладу в Таблиці 4 наведені результати розрахунку концентрацій $\bar{L}_{0\delta} = \frac{L_{0\delta}}{L_a}$, $\bar{L}_{\delta_1} = \frac{L_{\delta_1}}{L_a}$, одержаних при значеннях параметрів $\beta_L = 5,2$ і $\psi = 3,0$.

Таблиця 4. Результати розрахунку концентрацій $\bar{L}_{0\delta}$ і \bar{L}_{δ_1}

$\bar{K}_{m_L} = \frac{K_{m_L}}{L_a}$		20	10	5	1	0,5	0,1
$\alpha_L = 2.5$	$\bar{L}_{0\delta}$	0,87	0,80	0,78	0,57	0,50	0,40
	\bar{L}_{δ_1}	0,65	0,32	0,18	0,03	0,01	0,0
$\alpha_L = 9.5$	$\bar{L}_{0\delta}$	0,57	0,47	0,40	0,25	0,18	0,10
	\bar{L}_{δ_1}	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Так як параметр β_L формується і залежить від складових, які визначаються структурою і характеристиками рідинної плівки (пограничного шару), то він не буде залежати від структури біоплівки. Тому для обох структур біоплівки значення коефіцієнта ефективної дифузії D_{L0} , який визначає потоки забруднень, що поступають в різні по структурі біоплівки, приймаємо як [2, 3]:

$$D_{L0} = 0,8D_w . \tag{26}$$

При побудові наведених вище графіків було використано і враховано діапазон змін параметра \bar{K}_L в межах $\bar{K}_{mL} = 0 \div 20$, значення якого визначає межі прийнятих в моделях очистки стічних вод різних рівнянь кінетичних реакцій, зокрема нульового і першого порядків.

Так, кінетика реакцій першого і нульового порядків в практичних розрахунках може відповідати відношенням $\bar{K}_{mL} = \frac{K_{mL}}{L_a} > 2 \div 3$ і

$\bar{K}_m < 0,15 \div 0,2$, тобто, десь в межах $0,15 < \bar{K}_m < 3$ і при розрахунках можна приймати відоме нелінійне рівняння Моно. Також на результати вилучення ОЗ біоплівкою має вплив комплексний параметр α_L , який пов'язаний з відомим в літературі модулем Тіля $\Phi = \sqrt{1,25\alpha_L}$. Більші значення α_L показують, що процеси реакції більше впливають, ніж процеси дифузії, що в цілому суттєво обумовлює складність оцінки параметра α_L . Процеси масопереносу в гетерогенній стратифікованій біоплівці залежать також від коефіцієнта ефективної дифузії D_L і від концентрації X_L , що враховано, як вже зазначалось вище, параметром $\psi = \frac{D_0}{D_{L1}\delta}$. При $\psi > 1,5$ в зміні концентрацій на

виході із біоплівки \bar{L}_{δ_1} суттєвих змін не спостерігалось.

Висновки

Проведені теоретичні дослідження вилучення ОЗ неоднорідною (стратифікованою) гетерогенною біоплівкою дозволили зробити наступні висновки:

1. В реальних умовах вилучення забруднень біологічними методами в різних біореакторах за рахунок закріпленого біоценозу відбувається переважно біоплівкою складної неоднорідної структури.

2. Для оцінки роботи такої біоплівки необхідно дослідити фактори та визначити параметри, що характеризують її активність і структуру, а саме: процеси масопереносу забруднень в об'ємі біоплівки та активність їх вилучення змінною щільністю мікроорганізмів по товщині біоплівки.

3. Процеси масопереносу в гетерогенній стратифікованій біоплівці визначаються коефіцієнтом ефективної дифузії D_L , який залежить від щільності (концентрації) X_L . В зв'язку зі зміною концентрації X_L по товщині біоплівки із збільшенням від поверхні до дна спостерігається зменшення параметра D_L по товщині біоплівки. На основі проведених експериментальних досліджень зміна параметра D_L по товщині біоплівки приймалась по лінійному закону і враховувалась параметром $\psi = \frac{D_o}{D_L \delta}$. При

цьому значне зменшення коефіцієнта D_L по товщині біоплівки характеризує відповідне збільшення параметра ψ . Слід зазначити, що при значенні $\psi > 1.5$, згідно з одержаними значеннями концентрацій на виході із біоплівки \bar{L}_{δ_1} , суттєвих змін в очистці не відбувається.

4. Значний вплив на результати вилучення ОЗ біоплівкою має комплексний параметр α_L , який пов'язаний з відомим в літературі модулем Тіля $\Phi = \sqrt{1,25 d_L}$, що використовувався при реалізації моделей. Так, більші значення параметра α_L показують, що процеси реакції більше впливають, ніж процеси дифузії. Проте, складність проведення оцінки впливу параметра α_L полягає у тому, що процеси реакції залежать від щільності X_L в біоплівці, в свою чергу коефіцієнт дифузії D_L також залежить від щільності X_L , зменшуючись зі збільшенням X_L .

5. Згідно з проведеними попередніми дослідженнями з деяким наближенням можна вважати, що кінетика реакцій першого та нульового порядків в практичних розрахунках може відповідати відношенням $\bar{K}_{mL} = \frac{K_{mL}}{L_a} > 2 \div 3$ і $\bar{K}_{mL} < 0,15-0,2$, тобто, в межах $0,15 < \bar{K}_{mL} < 3$ і при розрахунках кінетик реакцій R_L необхідно приймати рівняння Моно.

6. Проведений аналіз теоретичних досліджень показав, що переважне вилучення субстрату відбувається на початковій ділянці біоплівки, яка складає наближено 20–25% від загальної товщини біоплівки δ .

Створена модель гетерогенно стратифікованої структури біоплівки дозволила провести порівняльний аналіз і оцінку різних досліджень вилучення забруднень в процесі очистки в гомогенній по структурі біоплівці по її товщині.

Встановлено, що ефективність вилучення забруднень в значній мірі залежить від параметра ψ . Так, при високих значеннях ψ гомогенна і стратифікована біоплівки показують майже однакові значення мікробної активності, тобто, при стратифікованій біоплівці з низьким значенням D_{1L} загальна її активність наближається до активності гомогенної, а при низьких значеннях ψ гомогенна і стратифікована біоплівки показують різні активності і ця різниця залежить в основному від коефіцієнта ефективної дифузії на виході із біоплівки D_{1L} .

В цілому активність гомогенної біоплівки може бути нижча, вища і дорівнювати активності стратифікованої біоплівки. Стратифікована біоплівка зі значним коефіцієнтом ефективної дифузії D_{1L} (в кінці біоплівки) має меншу активність, ніж гомогенна із середнім значенням коефіцієнта дифузії $D_{L, \text{с.ом}} = \frac{D_{L0} + D_{L1}}{2}$, а субстрат, від якого залежить зростання мікроорганізмів, проникає глибше в стратифікованій біоплівці, ніж в гомогенній.

Наведений порівняльний аналіз виконано на основі використання кінетики реакції нульового порядку. В перспективі доцільно буде провести зазначений аналіз для умов використання нелінійної кінетичної реакції Моно.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Beyenal H., Lewandowski Z. (2005). Modeling mass transport and microbial activity in stratified biofilms. *Chemical Engin. Science*. №60. P. 4337–4348.
2. Elenter D., Milferstedt K., Zhang W., Hausner M., Morgenroth E. (2007). Influence of detachment on substrate removal and microbial ecology in a heterotrophic/autotrophic biofilm. *Nat.Resour.* 41. P. 4657–4671.
3. Henze M.M., van Loodsdresht M., Ekama G.A., Brdjanovic D. *Biological Wastewater Treatment* (2008). IWA Publishing. 511 p.
4. Lee M.W., Park I.M. (2007). One-dimensional mixed-culture biofilm model considering different space occupancies of particle components. *Water Res.* No. 1-41-1-44. P. 4317–4328.
5. Олійник О.Я., Айрапетян Т.С., Курганська С.М. (2016). Аналіз і деякі рекомендації до розрахунку кисневого режиму в аеротенках при очистці стічних вод від органічних забруднень зваженим і закріпленим біоценозом. *Наук. вісник будівництва, ХНУБА*, №3 (15). С. 177–184.
6. Wanner O., Ebert N.I., Rittman B.E. (2006). *Mathematical modeling of biofilms*. Scientific Technical Report, №18. 208 p.
7. Henze M., Harrenoes P., Jansen C., Arwin E. (2002) *Wastewater Treatment*. Springer: Berlin – New-York, 430 p.
8. Олійник О.Я., Айрапетян Т.С., Калугин Ю.І. (2019). Моделювання і розрахунки очистки стічних вод в аеротенках-змішувачах завислим і закріпленим біоценозом з використанням нелінійної кінетики Моно. *Науковий вісник будівництва, Харків*, т.97, №3. С. 113–122.
9. Beyenal H., Tanyolag A. (1994). A mathematical model for hollow biofilm reactors. *Chem. Engin. Journal*, 56. P. 853–859.
10. Wasche S., Horn H., Hempel D.C. (2002). Influence of growth conditions on biofilm development and mass transfer at the bulk/biofilm interface. *Water. Res.*, vol. 36. P. 4775–4784.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2023 і прийнята до друку після рецензування 19.06.2023

REFERENCES

1. Beyenal, H., & Lewandowski, Z. (2005). Modeling mass transport and microbial activity in stratified biofilms. *Chemical Engin. Science*, 60, 4337-4348.
2. Elenter, D., Milferstedt, K., Zhang, W., Hausner, M., & Morgenroth, E. (2007). Influence of detachment on substrate removal and microbial ecology in a heterotrophic/autotrophic biofilm. *Nat.Resour.*, 41, 4657-4671.
3. Henze, M.M., van Loodsdresht, M., Ekama, G.A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment*. IWA Publishing.
4. Lee, M.W., & Park, I.M. (2007). One-dimensional mixed-culture biofilm model considering different space occupancies of particle components. *Water Res.*, 1-41-1-44, 4317-4328.
5. Oliynyk, O.Ya., Airapetian, T.S., & Kurganska, S.M. (2016). Analysis and some recommendations due calculation of the oxygene regime in aerotanks at the treatment of the waste waters with organic pollutions by the suspended and fixed biocenosis. *Scient. Visnyk of Building*. Kharkiv, 3(15), 177-184 [in Ukrainian].
6. Wanner, O., Ebert, N.I., & Rittman, B.E. (2006). Mathematical modeling of biofilms. Scientific Technical report. №18. 208 p.
7. Henze, M., Harrenoes, P., Jansen, C., & Arwin, E. (2002). *Wastewater Treatment*. Springer: Berlin - New-York.
8. Oliynyk, O.Ya., Airapetian, T.S., & Kalugin, Yu.I. (2019). Modeling and calculations of the waste waters treatment in aerotanks-mixers by suspended and fixed biocenosis using of the nonlinear Monod kinetic. *Scient. Visnyk of Building*, Kharkiv, 3 (97), 113-122 [in Ukrainian].
9. Beyenal, H., & Tanyolag, A. (1994). A mathematical model for hollow biofilm reactors. *Chem. Engin. Journal*, 56, 853-859.
10. Wasche, S., Horn, H., & Hempel, D.C. (2002). Influence of growth conditions on biofilm development and mass transfer at the bulk/biofilm interface. *Water.Res.*, 36, 4775-4784.

The article was received 21.02.2023 and was accepted after revision 19.06.2023

Олійник Олександр Якович

член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, завідувачий відділом прикладної гідродинаміки Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. М. Капніст, 8/4

Телима Сергій Васильович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. М. Капніст 8/4

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0109-0696> **e-mail:** sertelyma@gmail.com

Калугін Юрій Іванович

кандидат фіз.-мат наук, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. М. Капніст, 8/4

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-00030720-0665> **e-mail:** forkalugin@ukr.net

Олійник Євген Олександрович

провідний інженер Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. М. Капніст, 8/4

UOT 631.4

Mustafa G. Mustafayev¹, Doctor of agricultural sciences
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2071-3078> **e-mail:** meliorasiya58@mail.ru

A.İ. Hajiyev², doctor of philosophy in agrarian sciences
e-mail: aslan.haciyev@gmail.com

A.Kh. Hasanova², doctoral student, assistant
e-mail: arzu.rzayeva.1980@mail.ru

¹Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan Institute of Soil Science and Agrochemistry, Baku, Azerbaijan Republic

²Azerbaijan Architecture and Construction University, Baku, Azerbaijan Republic

THE POTENTIAL DEVELOPMENT WAY OF AZERBAIJAN'S MELIORATION AND WATER MANAGEMENT AREA

Summary. The article is devoted to improvement of the agriculture of the Republic of Azerbaijan, creation of an abundance of crops, solution of the reliable supply of food products to the population, provision of efficient use of water resources in the country, improvement of water management, etc. The ways of development of the country's reclamation and water management by summarizing the results of multi-year data and scientific-research works were examined and noted, the reforms carried out in this field, major construction works, the potential development of grain growing, cotton growing, tobacco growing, cocoon growing and other fields in the country, as well as new information on the melioration measures performed as a result of the implementation of the tasks related to the creation of agroparks and large farms was examined, as well as information was given on the works being carried out on the improvement of the melioration potential, and the improvement of the water supply and melioration condition of the irrigated lands with the implementation of the measures planned for the future, the improvement of the newly irrigated lands as a result of its commissioning, reliable provision of bread and food products to the country's population at the expense of domestic production; Information about the implementation of various projects for the protection of buildings and other infrastructure objects from the harmful effects of floods and floodwaters, and for their more efficient use due to the regulation of water resources of rivers has been mentioned.

Key words: Agriculture; water resources; land reclamation; arable land; groundwater; main canals; collector-drainage network.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.21-28>

Introduction

The Republic of Azerbaijan is located in a zone with very complex natural and geographical conditions and is a country with ancient irrigation agriculture. As the territory of the country is located in a dry and arid zone, it is impossible to grow agricultural products here without irrigation, reclamation and development of water management. It is difficult to harvest agricultural crops without irrigation in the arable Kura-Araz plain of the area. Despite the fact that the history of irrigation dates back to ancient times, the construction of engineering irrigation systems in this zone

began at the beginning of the 20th century. Research conducted in this zone shows that there is no natural flow of drain water. Therefore, it is very important to build a collector-drainage network along with the irrigation network in this zone.

As a result of the implementation of these measures, the improvement of the water supply and melioration condition of the lands in our republic, the reliable provision of food products to the country's population as a result of the use of newly irrigated lands, the protection of residential areas, agricultural fields, hydrotechnical facilities and other infrastructure facilities from the harmful effects of flood and flood waters, rivers due to regulation of water resources, it will be possible to use them more efficiently.

Research object and methods

As a research object, water physical and chemical properties of irrigated lands of the Republic of Azerbaijan, their modern meliorative condition were studied and analyzed based on literature data. Methodological study of the specified research object is evaluated based on the accepted methods in the study of land reclamation issues. For this, a systematic approach and systematic analysis methods were used in the study of the issues.

Analysis and discussion

In our republic, which is an ancient irrigation farming country, the development of reclamation and water management, which plays an important role in the rise of agriculture, the creation of crop abundance, and the reliable supply of food products for the population, the reforms carried out in this field, large-scale construction works, the creation of a wide reclamation potential and the adoption of prospective programs are part of world politics. It is related to the tireless activity, hard work and visionary policy of Heydar Aliyev, a well-known leader, a wise and visionary politician, the national leader of the Azerbaijani people [1].

This area has been in the spotlight in recent years. Thus, the organization of the normal operation of the reclamation and irrigation systems, the repair and restoration works in the required volumes, the improvement of the water supply and reclamation condition of the irrigated lands, the continuation of the fight against floods and floodwaters and other relevant measures were implemented. So, at the expense of all financial sources, in 2004-2021, construction, reconstruction and restoration of 4.6 thousand kilometers of irrigation canals, 3.4 thousand kilometers of collector-drainage networks, water supply of lands on 483 thousand hectares and 307 thousand hectares of land improvement of the land reclamation was completed, 204,000 hectares of newly irrigated land areas were included in the crop rotation. More than 800 kilometers of existing soil protection dams have been substantially raised and strengthened, 203 kilometers of flood protection measures have been implemented in rivers, 3,061 subartesian wells have been dug and put into use to improve the supply of irrigation water to agricultural fields, as well as to meet the population's need for drinking water. 4 reservoirs with a total water capacity of 456 million cubic meters (Takhtakorpu, Shamkirchay, Tovuzchay, Goytepe) were built, as well as 3 reservoirs with a total water capacity of 15.5 million cubic meters (Pirsaatchay, Zogalavachay, Lavain) were repaired and restored [2].

The construction of the Khanarkh canal included in the "Reconstruction of the Samur-Absheron irrigation system" project in 2006, the restoration of the main intake facility located on the Samur river, the construction of the main water drain near the Samur river, the length of the first 50 kilometers of the Samur-Absheron canal and the length located in this section Reconstruction works of 185.7 kilometers of inter-farm canals were completed in 2007.

The construction of the 3rd part of the Main Mil-Mugan collector, which ensures the discharge of saline groundwater from 500 thousand hectares of irrigated areas of the republic to the Caspian Sea, was completed in 2006 and connected with the Mil-Karabakh collector [3, 4, 5, 6].

In order to transfer water from the 50th kilometer of the Samur-Absheron canal to the Takhtakorpu reservoir, the construction of the 32-kilometer-long Valvalachay-Takhtakorpu canal, which was started in 2008, and the Takhtakorpu reservoir with a total water capacity of 268.4 million cubic meters (with a Hydroelectric Power Station with a total capacity of 25 MW together) and the construction works of Takhtakörpü-Ceyranbatan canal, which is about 108 kilometers long, were completed in 2013.

On November 15, 2014, the opening ceremony was held in the presence of Mr. Ilham Aliyev, the President of the Republic of Azerbaijan. The construction works of 60.5 kilometers long highway canals, which will provide the construction of the Tovuzchay reservoir with a total water capacity of 20 million cubic meters was completed in 2016.

In order to fulfill the tasks given by the President of the Republic of Azerbaijan regarding the development of grain growing, cotton growing, tobacco growing, cocoon growing and other fields in the country, as well as the creation of agroparks and large farms, the Joint Stock Company organizes the normal operation of reclamation and irrigation systems, improves the water supply and reclamation condition of irrigated lands, expands the fields, fighting against floods and floodwaters and other directions, continued its successful activities in 2021, as in previous years [1].

In order to create agroparks, large-scale grain growing, cotton growing and other farms, the works of increasing the pumping capacity of the pumping station of the Shamkir machine channel and installing the 1202 pogonometer sections of the 3775 pogonometer pressure pipeline for the repair and restoration of its first turn have been completed. In order to provide irrigation water to 6,955 hectares (of which 1,582 hectares are newly irrigated areas) of Goranboy region, construction of 15,413 pogonometer long concrete-lined inter-farm distribution canals was carried out in the zone of the second turn of the Shamkir machine canal. Works on the construction of 9,506 square meters of reinforced concrete lined distribution channels and 12,000 square meters of emergency drainage channels with facilities for irrigating 9,461 hectares of new land located on the left bank of the new tributary canal of Araz have been completed. 25,335 pogonometers of closed drains and 108,032 pogonometers of closed drains were built to improve the melioration of 3,500 hectares of winter pasture land in Sabirabad region.

With the completion of irrigation water supply works for 2960 hectares of land belonging to the agricultural park in Yevlakh district, construction of 1 reserve water pool with a volume of 100 cubic meters, installation of mechanical and electrical equipment of the pumping station, external power supply and laying of pipelines with a pressure of 13114 pogonometers were carried out. In order to create an

agropark of 12,300 hectares in Sheki and Oguz regions, joint construction works with 4,820-meter-long closed collector and water coolers were carried out, and 3,860 hectares (of which 560 hectares are new irrigation gas fields) were provided for Agsu region. 3775 pogonometers of the channel are being reconstructed [2, 3].

Distribution of 4150 pogonometers of reinforced concrete distribution channels to improve the water supply of 1496 hectares of land in Mughanli of Aghstafa region, and I level pumping station, 4006 pogonometers of pressure pipeline, 1617 meters long pipeline to improve the water supply of 865 hectares of Ikinki Shikhli village of Gazakh region. work has been done. In order to improve the water supply of agricultural crops on the Absheron peninsula, 256 pogonometer sections of the Absheron main canal were reconstructed and the construction of the 885 pogonometer closed construction in the Binisi part of the canal was completed. By the Decree of the President of the Republic of Azerbaijan, 3,600 hectares (of which 450 hectares are newly irrigated areas) in 177 settlements of 38 cities and districts of the Republic of Azerbaijan are provided with irrigation water for agricultural fields and yard plots used for cultivation, to improve water supply, and to meet the population's need for drinking water. Project-estimate documents of 20 subartesian wells are prepared and drilling works are being carried out. At the same time, drilling works in the remaining 71 subartesian wells from 2020 were completed and put into operation. Delivery of irrigation water from the Kura river to the land belonging to the agricultural park in the territory of Hajigabul region with a pumping station with a consumption of 3.0 m³/sec.

The results of long-term experiments show that the compaction of the subsurface layer can be eliminated by plowing to a depth of 60 cm and deep-loosening to a depth of 1.0 m. In places where deep plowing and loosening has already been carried out, it is necessary to use crop rotations: here are the main agricultural crops (cotton, cereals) must necessarily be replaced by alfalfa for three years. In order to obtain high yields from loosened soils, it is necessary to apply two-tiered organic and mineral fertilizers (to the arable and sub-arable horizons separately). Such a system of agriculture mixed with cultivated plants creates a powerful highly fertile layer in the soil for three years, the thickness of which reaches 50-60 cm or more [7, 8, 9, 10, 11].

Retaining walls 1863 pogonometers long were built in the rivers passing through the territory of Balaken, Gakh, Sheki, Gabala Guba, Khachmaz, Aghjabedi and Lankaran regions of the republic for strengthening the banks and eliminating the emergency situation in the rivers due to flood and flood conditions.

Improvement of water supply to crops in Tovuz, Aghstafa, Gazakh, Oguz, Zardab and Saatli districts, provision of water to livestock complex in Shamakhi district, protection of border posts in the territories of Gakh and Gusar districts and the territory of Viravul village of Lankaran from floods and flood waters of the Viravulchay river is ensured. the preparation of project documents for the work has been completed.

At the same time, in accordance with the implementation of the projects included in the "Measure Plan for 2020-2022 on ensuring the efficient use of water resources" approved by the relevant Decree of the President of the Republic of Azerbaijan, the length of 29.5 kilometers, with a consumption of 12 kbm/sec, the Kyzylarkh Canal, 22.4 kilometers long, with a consumption of 20.2 kbm/sec, and the length of the Tartar Left Bank, for providing irrigation water to 29,660 hectares of land in Tarter, Goranboy, Yevlakh and Barda regions. Work on the technical and economic justification of the reconstruction of the Xanarkh canals with a length of

12.6 kilometers and a consumption of 10 kbm/sec, and the Upper Zeykhur canal with a length of 42 kilometers and a consumption of 4.5 kbm/sec, which provides irrigation water for 6091 hectares of cultivated land in Gusar region, has been carried out [2, 3, 4].

Thanks to the projects implemented by the society in 2021, the water supply of 9.5 thousand hectares of land and the reclamation condition of 3.5 thousand hectares of land were improved, and 2.1 thousand hectares of new land was provided with irrigation water. Management and affiliation of the Commission established by the Decree of the President of the Republic of Azerbaijan dated April 15, 2020 "On measures related to ensuring the efficient use of water resources" with the aim of ensuring the efficient use of water resources in the country, improving the management of water management and coordinating activities in this area with the participation of institutions, in the conditions of last year's severe drought and water shortage, appropriate preventive measures were taken to ensure the supply of drinking and communal water to the population, water supply to agricultural fields, and electricity production, working regimes for water reservoirs and main canals were prepared in an efficient manner and proper distribution of water, efficient and economical use of water was ensured [4, 5, 6].

As is known, the yield on irrigated lands is higher than on non-irrigated ones. In light of this, one of the main conditions for creating food abundance is to increase the area of irrigated farmland. To do this, reservoirs should be created and irrigation channels should be built taking into account the relief conditions and water resources of the country. The creation of such a system will increase yields on non-irrigated areas, while at the same time restoring the fertility of these soils [10, 11, 12].

In order to improve the water supply and melioration condition of the irrigated lands, 58.0 million cubic meters (14,200 kilometers of irrigation, 1,900 kilometers of collector-drainage network) of irrigation and collector-drainage networks were desilted, 53 kilometer part was covered with concrete, 5250 hydrotechnical devices, 6100 subartesian wells, 330 pumping stations were fundamentally and currently repaired. 16.3 million cubic meters of sewerage works were carried out in river channels, 6.5 thousand cubic meters of rock-stone and fashin, 2.1 thousand cubic meters of gabion dams were installed, and 25.7 thousand cubic meters of repair works were performed on stone-concrete dams.

Reinforcement works were carried out on the 107.9-kilometer section of the earth protection dams built along the Kura, Araz and mountain rivers that meet them, and embankment works with 44,130 cubic meters of stone and concrete products were carried out.

As a result of the measures taken, the irrigated land areas were mainly supplied with irrigation water. All agricultural plants in the republic were irrigated 3 times on average in the area of 1 million 443 thousand hectares. At present, the Society is continuing to implement relevant measures in order to further improve the water supply and melioration condition of agricultural fields. For the purpose of accurate accounting of water resources, 18 modern water measuring devices were installed in the main irrigation canals, and at the same time, an automated control system (SCADA) was installed in 694 subartesian wells. At present, work is being done in the direction of creating a centralized electronic accounting system for the Society, an electronic database of reclamation and water management facilities, a single electronic accounting database for human resources, financial and accounting, and organizing electronic document circulation [1, 6].

Construction of distribution canals for supplying water from the new branch of the Araz River to newly irrigated lands, reconstruction of the Gazanarkh canal to improve the water supply of farmlands in Agsu region, water supply to the farmlands of Khanliq, Kemarli, Aslanbeyli, Gaimagli and Ikini Shikhli villages of Gazakh region. restoration of pumping stations and underground irrigation networks (on the Second Shikhli farm), increasing the pumping capacity of the pumping station of the Shamkir machine channel and repair and restoration of its turn I, design and construction of inter-farm distribution channels in the zone of the second turn of the Shamkir machine channel are planned. Also, carrying out amelioration measures in the winter pastures located in Sabirabad and Salyan regions, improving the supply of irrigation water to agricultural fields (in Hajigabul region), designing and digging subartesian wells in order to improve water supply in the regions, fighting against the harmful effects of flood and flood dangerous rivers, and eliminating the emergency situation. measures, preparation of technical and economic justifications and project documents of Hekarichay and Bargushadchay reservoirs, repair and maintenance of Sugovushan (with a 5.2-kilometer main canal), Khachinchay (with a 7-kilometer canal), Ashagi Kondalanchay, Kondalanchay-1 and Kondalanchay-2 reservoirs. restoration, preparation of the feasibility study and project documents for the restoration and development of the melioration and water management complex in the liberated territories of Agdam, Fuzuli and Jabrayil regions, reconstruction of the Tartarchay Left Bank canal, Maiden Castle water Various measures are being taken by preparing the technical and economic justification of the construction of the main canal from the warehouse and project documents [1, 3].

Results

With the implementation of these measures, the improvement of the water supply and melioration of irrigated lands, the reliable supply of bread and food products to the population of the country due to internal production as a result of the use of newly irrigated lands, the harmful effects of flood and flood waters of residential areas, agricultural fields, hydrotechnical facilities and other infrastructure facilities. there will be ample opportunities to protect them from their effects, to use them more efficiently due to the regulation of water resources of rivers.

REFERENCES

1. Materials of the scientific-practical conference on the topic "National leader Heydar Aliyev is the creator and author of the field of water management and reclamation of Azerbaijan". (05.06.2020). Baku.
2. Ahmadzadeh, A. (2020, June 4). People's Newspaper. Baku.
3. Alimov, A.K. (2001). Hydrogeological processes and quantitative assessments of the sources of formation of elements of the water-salt balance of groundwater to substantiate hydrogeological and reclamation forecasts [Гидрогеологические процессы и количественные оценки источников формирования элементов водно-солевого баланса грунтовых вод для обоснования гидрогеолого-мелиоративных прогнозов]. Baku: Elm [in Russian].
4. Alimov, A.K. (2009). Irrigation canals and their impact on the environmental situation [Ирригационные каналы и их влияние на экологическую обстановку]. Baku: Elm [in Russian].

5. Iskenderov, M.Y., & Mustafayev, M.Q. (2020). Irrigation of saline lands with activated collector-drainage water activated in the magnetic field. *Intern. Journ. of the science of food and agriculture*, 4(1), 24–29. <http://doi.org/10.26855/ijfsa.2020.03.05>
6. Aslanov, R. (2020). Reclamation and water economy of the country are on the path of sustainable development [Ölkənin meliorasiya və su təsərrüfatı dayanıqlı inkişaf yolundadır]. 525th newspaper. Baku [in Azerbaijani].
7. Mustafayev, M. (2014). Meliorative state of irrigative saline soils in Mugan-Salyan massive of the Kur-Araz lowland. *News of State Agricultural Academy*, 1, 127-131.
8. Ekbayev, R., Balgabayev, N., Dzaparkulova, E., Bekbaev, U., & Mustafayev, M. (2014). Technical condition of the irrigative systems and their influence on dimensions of the irrigation norms. *Annals of Agrarian science*, Tbilisi, Georgia, 12(1), 46-49.
9. Mustafayev, M. (2012). Water and physical characteristics of irrigated soils in the Massif of Mugan-Salyan. *Journal of Water and Land Development*, Polsha, 17 (VII-XII), 61-67, PL ISSN 1429-7426.
10. Mustafayev M. (2015). Criteria for the evaluation of reclamation status of soils in the Mugan-Salyan massif. *Journal of water and Land Development*, Polsha, 24 (I-III), 21-26.
11. Mustafayev, M., Mazhaysky, YU., & Vinoqradov, D. (2018). Diagnostic Parameters of Irrigated Meadow-Serozemic and Alluvial Meadow Soils of the Mughan-Salyan Massif of Azerbaijan. *Russian Agricultural Sciences*, Moskva, 44 (6), 551-55.
12. Mustafayev, M. (2020). Change of the salt's quantity and type in the irrigated soils of the Mughan Plain and their impact on plants productivity. *International Journal of the Science of Food and Agriculture*, USA, 4(2), 101-108. <http://dx.doi.org/10.26855/ijfsa.2020.06.001>

The article was received 22.03.2023 and was accepted after revision 26.06.2023

М.Г. Мустафасєв, А.І. Гаджієв, А.Х. Гасанова
ПОТЕНЦІЙНИЙ ШЛЯХ РОЗВИТКУ МЕЛІОРАЦІЇ ТА ВОДОГОСПОДАРСТВА
АЗЕРБАЙДЖАНУ

Анотація. У статті розглянуто шляхи вдосконалення сільського господарства Азербайджанської Республіки, підвищення врожайності сільськогосподарських культур, вирішення проблеми надійного постачання населення продуктами харчування, забезпечення ефективного використання водних ресурсів країни, удосконалення управління водного господарства тощо. Проаналізовано шляхи розвитку меліорації та водного господарства країни за підсумками багаторічних даних та науково-дослідних робіт, реформи, що проводяться в цій галузі, капітальні будівельні роботи, перспективи розвитку зернових, бавовництва, тютюнництва, коконівництва та інших галузей, а також нові відомості про проведені меліоративні заходи в результаті виконання завдань щодо створення агропарків та великих фермерських господарств. Також надано інформацію про роботи з покращення меліоративного потенціалу земель, поліпшення водозабезпеченості та меліоративного стану зрошуваних земель з виконанням заходів, запланованих на перспективу, надійне забезпечення населення країни хлібом і продуктами харчування за рахунок власного виробництва в результаті введення в користування нових зрошуваних земель, населених пунктів. Наведено інформацію про реалізацію різноманітних проєктів із захисту будівель та інших об'єктів інфраструктури від шкідливої дії паводків та паводкових вод, їх більш ефективного використання за рахунок регулювання водних ресурсів річок.

Ключові слова: сільське господарство; водні ресурси; меліорація; рілля; підземні води; магістральні канали; колекторно-дренажна мережа.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 26.06.2023

Мустафаєв Мустафа Гілман огли

доктор сільськогосподарських наук, Міністерство науки та освіти Азербайджанської Республіки, Інститут ґрунтознавства та агрохімії

Адреса робоча: AZ1073 Азербайджан, м. Баку, вул. М. Рагіма, 5

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2071-3078> **e-mail:** meliorasiya58@mail.ru

Гаджієв А.І.

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Азербайджанський архітектурно-будівельний університет

Адреса робоча: AZ1073 Азербайджан, м. Баку, вул. Айна Султанова, 11

e-mail: aslan.haciyev@gmail.com

Гасанова А.Х.

докторант, асистент, Азербайджанський архітектурно-будівельний університет

Адреса робоча: AZ1073 Азербайджан, м. Баку, вул. Айна Султанова, 11

e-mail: arzu.rzayeva.1980@mail.ru

УДК 614.8 (076)

Volodymyr Vashchenko¹, doctor of physical and mathematical sciences, professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1585-1229> *e-mail*: nucleoroid@gmail.com

Iryna Korduba², candidate of technical sciences, associate professor of the department of technology of environmental protection and labor protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465> *e-mail*: uaror-korduba@ukr.net

¹Interdepartmental Scientific Center for Fundamental Research on Energy and Ecology, Odesa, Ukraine

²Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

PROBLEMS OF SAFE OPERATION OF ZAPORIZKA NPP IN THE CONDITIONS OF WAR IN UKRAINE

Abstract. *Among the specified types of terrorist threats, the most dangerous today is the nuclear threat, which has moved from the realm of the probable to a real military-terrorist attack on the Zaporizhzhia NPP and its capture by the occupiers. Therefore, the issue of determining the level of nuclear and environmental safety of Ukraine's nuclear power plants in extreme war conditions, using the example of the situation that developed at the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant (ZNPP), the largest in Europe, is extremely urgent, precisely because of the station's location in the war zone.*

During the period of the full-scale war, there have already been dozens of warheads hitting the objects of the critical infrastructure of the ZNPP, the external and emergency power supply of the ZNPP (transformer equipment, power supply systems to consumers, the premises of diesel generators, the industrial site of the station, and others). There have been corresponding emergency shutdowns of the power units of the ZNPP due to the blackout of the station and due to the forced disconnection of consumers as a result of the destruction of various objects in the power grid systems. These events cause great alarm and concern of the world public regarding the possibility of new global nuclear-ecological disasters due to nuclear-radiation accidents at the ZNPP. Many years of global experience in the operation of nuclear power reactor facilities (NPRF) and their safety regulation, as well as lessons from the largest nuclear and radiation accidents at NPPs, have revealed the insufficient validity of traditional probability indicators and safety criteria for NPPs, including the Zaporizhzhya plant. Probabilistic approaches to assessing the objective level of safety of the Zaporizhzhya NPP in extreme conditions of war are insufficiently substantiated, taking into account, among other things, the need to predict the possibility of the occurrence of unlikely emergency events and their combinations, which will have catastrophic consequences.

Therefore, conducting an objective assessment of the level of nuclear and radiation safety at the ZNPP due to the station's location in the war zone, as well as substantiating practical recommendations for preventing nuclear and environmental disasters at the NPPs of Ukraine, is an extremely urgent issue for the entire nuclear energy industry of Ukraine.

Keywords: *Zaporizhzhia NPP; nuclear energy of Ukraine; nuclear and environmental safety of ZNPP; extreme operating conditions of ZNPP in war conditions; prevention of serious nuclear and environmental accidents and disasters.*

В.М. Ващенко¹, І.Б. Кордуба²

¹Міжвідомчий науковий центр фундаментальних досліджень з питань енергетики і екології, м. Одеса, Україна

²Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС В УМОВАХ ВІЙНИ В УКРАЇНІ

***Анотація.** Серед визначених типів терористичних загроз, на сьогодні, найнебезпечнішою є ядерна загроза, яка перейшла з області ймовірних в реальну воєнно-терористичну атаку на Запорізьку АЕС та її захоплення окупантами. Тому, надзвичайно актуальним є питання визначення рівня ядерно-екологічної безпеки АЕС України в екстремальних умовах війни на прикладі ситуації, що склалася на найбільшій у Європі Запорізькій АЕС (ЗАЕС) саме з причин розташування станції в зоні бойових дій.*

За період повномасштабної війни вже сталися десятки попадань бойових снарядів по об'єктах критичної інфраструктури ЗАЕС, зовнішнього та аварійного електропостачання ЗАЕС (трансформаторне обладнання, системи електропостачання споживачам, приміщення дизель-генераторів, на промисловий майданчик станції і інші). Відбулися відповідні аварійні зупинки енергоблоків ЗАЕС через знеструмлення станції та через вимушене відключення споживачів в результаті руйнування різних об'єктів в системах електромереж. Ці події викликають велику тривогу та занепокоєння світової громадськості щодо можливості виникнення нових глобальних ядерно-екологічних катастроф внаслідок ядерно-радіаційних запроектованих аварій на ЗАЕС. Багаторічний світовий досвід експлуатації ядерних енергетичних реакторних установок (ЯЕРУ) та регулювання їх безпеки, а також уроки найбільших ядерних та радіаційних аварій на АЕС виявили недостатню обґрунтованість традиційних ймовірнісних показників та критеріїв безпеки АЕС і в тому числі Запорізької станції. Ймовірнісні підходи оцінки об'єктивного рівня безпеки Запорізької АЕС у екстремальних умовах війни недостатньо обґрунтовані з урахуванням, в тому числі, необхідності передбачати можливість виникнення малоймовірних аварійних подій та їх комбінації, які матимуть катастрофічні наслідки.

Тому проведення об'єктивної оцінки рівня ядерної та радіаційної безпеки на ЗАЕС з причин розташування станції в зоні бойових дій, а також обґрунтування практичних рекомендацій щодо запобігання ядерно-екологічним катастрофам на АЕС України є надзвичайно актуальним питанням для всієї ядерної енергетики України.

***Ключові слова:** Запорізька АЕС; ядерна енергетика України; ядерно-екологічна безпека ЗАЕС; екстремальні умови експлуатації ЗАЕС в умовах війни; запобігання важким ядерно-екологічним аваріям та катастрофам.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.29-38>

Вступ

Тероризм, як соціально-політичне явище, у різноманітних формах свого прояву наприкінці ХХ на початку ХХІ століття набув суттєво нових якісних рис. У середині 90-х років тероризм охопив понад 100 країн світу, а кількість терактів перевищила 25 тисяч [1]. Серед визначених типів терористичних загроз, на сьогодні, найнебезпечнішою є ядерна загроза, яка перейшла з області ймовірних в реальну воєнно-терористичну атаку на Запорізьку АЕС та її захоплення окупантами.

Мета роботи. Об'єктивна оцінка рівня ядерної та радіаційної безпеки ЗАЕС в екстремальних умовах воєнного часу, а також обґрунтування практичних рекомендацій щодо запобігання екологічним катастрофам.

Постановка задач і досліджень. Традиційно оцінка стану (рівня) ядерної та радіаційної безпеки АЕС заснована на імовірнісних та детерміністських показниках безпеки [2–13].

Основні імовірнісні показники безпеки у світовій ядерній енергетиці наступні:

– імовірність виникнення ядерної (важкої) аварії з пошкодженням ядерного палива (ЧПАЗ – частота пошкодження активної зони реактора):

$$\text{ЧПАЗ} \sim IP_s; \quad (1)$$

– імовірність виникнення гранично допустимого радіоактивного викиду:

$$\text{ЧПАВ} \sim \text{ЧПАЗ} \cdot P_b, \quad (2)$$

де I – імовірність виникнення вихідної аварійної події (ВАП); P_s – можливість відмови критичних змін систем безпеки ядерних енергоустановок; P_b – імовірність відмови захисних бар'єрів безпеки, що запобігають умовам радіоактивних викидів.

В якості ВАП регламентуються події/інциденти/порушення нормальних умов експлуатації, що призводять до аварійної зупинки реактора:

– течі/розриви трубопроводів та паропроводів систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок (СВБ ЯЕУ);

– знеструмлення енергоблоків; відмови СВБ нормальної експлуатації; екстремальні природні явища (землетруси, затоплення, торнадо, урагани тощо); падіння великих об'єктів на енергоблок та ін.

Зокрема, аварійні зупинки енергоблоків АЕС Fukushima-Daiichi у 2011 році сталися автоматично за зареєстрованим сигналом виникнення потужного землетрусу (з епіцентром у Тихому океані на відстані понад 100 км від узбережжя станції).

Імовірнісні критерії ядерної безпеки:

$$\text{ЧПАЗ} = \begin{cases} 10^{-4} \text{ 1/(реактор} \cdot \text{год)} - \text{для діючих ЯЕУ;} \\ 10^{-5} \text{ 1/(реактор} \cdot \text{год)} - \text{для нових ЯЕУ.} \end{cases} \quad (3)$$

Імовірнісні критерії радіаційної безпеки:

$$\text{ЧПАЗ} = \begin{cases} 10^{-6} \text{ 1/(реактор} \cdot \text{год)} - \text{для діючих ЯЕУ;} \\ 10^{-7} \text{ 1/(реактор} \cdot \text{год)} - \text{для нових ЯЕУ.} \end{cases} \quad (4)$$

Багаторічний світовий досвід експлуатації ЯЕУ та регулювання безпеки, а також уроки найбільших ядерних та радіаційних аварій визначили недостатню обґрунтованість традиційних імовірнісних показників та критеріїв безпеки (1)–(4). Зокрема, всі енергоблоки АЕС Fukushima-Daiichi на момент виникнення великої аварії у 2011 році відповідали встановленим критеріям ядерної та радіаційної безпеки.

Інші приклади можуть бути пов'язані з результатами імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) українських ЯЕУ з реакторами типу ВВЕР, в яких вважалося, що виникнення ВАП з повним тривалим знеструмленням енергоблоків (аналог ВАП на АЕС Fukushima-Daiichi) або торнадо (смерч) будь-якого класу інтенсивності однозначно призводить до відмови критичних для безпеки систем ($P_s = 1$). Однак імовірності цих ВАП є досить малою величиною, що задовольняє встановленим критеріям та умовам безпеки. Один із основних уроків Фукусімської аварії – необхідність передбачати можливість виникнення малоїмовірних ВАП, які мають катастрофічні наслідки.

Таким чином, застосування ймовірнісних підходів та методів оцінки стану ядерної, радіаційної та екологічної безпеки ЗАЕС в екстремальних умовах воєнного часу недостатньо обґрунтовано з таких причин:

- недосконалість імовірнісних методів оцінки рівня безпеки ЯЕУ;
- військові дії не передбачувані і підпорядковуються стохастичним закономірностям.

Більш обґрунтованими для об'єктивної оцінки безпеки є детерміністичні методи та підходи, що базуються на детерміністичному моделюванні аварійних послідовностей ВАП.

Детерміністськими критеріями ядерної та радіаційної безпеки зазвичай визначено: гранично допустимі температури ядерного палива та оболонки твелів; гранично допустимі тиски в реакторі та гермооб'ємі (контейнменті); гранично допустима концентрація водню; гранично допустимі дози радіоактивного опромінення персоналу, населення та довкілля.

Уроки Чорнобильської та Фукусімської аварій визначають актуальність додаткових детерміністських критеріїв безпеки: гранично допустимі умови виникнення парових енергетичних вибухів; гранично допустимі умови екстремальних зовнішніх впливів (землетруси, торнадо, урагани, затоплення промислових майданчиків, втрата кінцевого поглинача тепла, падіння потужних об'єктів на промайданчик АЕС) та ін.

ЯЕУ з ВВЕР мають у своєму розпорядженні необхідні системи для запобігання ядерним і радіаційним аваріям при врахованих проєктом ВАП (течі трубопроводів, знеструмлення енергоблоку, відмови СВБ нормальної експлуатації, ненавмисні помилкові дії персоналу, землетруси та ін.).

В екстремальних умовах військового часу експлуатації ЗАЕС вихідними подіями ядерних та радіаційних аварій можуть бути: руйнування захисних бар'єрів безпеки ЯЕУ внаслідок навмисного чи випадкового влучення бойових зарядів; руйнування чи відмови критичних об'єктів інфраструктури, які забезпечують зовнішнє чи аварійне електроспоживання енергоблоків ЗАЕС; затоплення промайданчика ЗАЕС внаслідок руйнування греблі Каховського водосховища; попадання потужних бойових зарядів у ставок-охолоджувач та інші.

До першої групи ВАП в екстремальних умовах експлуатації військового часу ЗАЕС відносяться: пошкодження або руйнування захисних бар'єрів безпеки ЯЕУ (захисна оболонка гермооб'єму – ЗО ГО, корпус реактора, тепловиділяючі збірки – ТВЗ, оболонки та паливна матриця, твел) внаслідок зовнішнього впливу бойових зарядів.

Відповідно до проєктної документації ЗАЕС гранично допустимий надлишковий тиск у ГО становить 0,5 МПа. Це граничне значення тиску може бути взято консервативно за основу оцінки граничної потужності бойових

зарядів руйнування ЗО ГО. При цьому необхідно враховувати, що експлуатаційні випробування на герметичність ЗО ГО проводяться при надлишкових тисках 0,07 МПа. Проте, тільки руйнування ГО не може бути безпосередньою причиною ядерної аварії (з пошкодженням ядерного палива). Для цього потрібна подальша руйнація захисних бар'єрів безпеки.

Гранично допустимий тиск (за умовами спрацьовування імпульсно-запобіжних клапанів) на корпус ядерного реактора ВВЕР – 17,0 МПа. Це гранично допустиме значення напруги у металі корпусу реактора при зовнішніх динамічних навантаженнях може бути консервативно прийнятим за основу оцінки гранично допустимої потужності бойового заряду пошкодження або руйнування корпусу ВВЕР. При цьому необхідно враховувати, що основа корпусу реактора – це сталь танкової броні. Тому більш реалістичними умовами пошкодження або руйнування корпусу ВВЕР є бойові заряди, здатні пробити броню сучасних танків. Крім того, необхідно враховувати, що лише порушення цілісності корпусу реактора не може бути достатньою умовою для початку ядерної аварії. Реально лише порушення цілісності корпусу реактора відповідає умовам максимальної проектною аварії (МПА) – гільйотинний розрив головного циркуляційного трубопроводу реакторного контуру.

Численні результати моделювання МПА ВВЕР-1000 на основі детерміністичних кодів встановили, що за умов збереження працездатності критичних (для забезпечення безпеки) конфігурацій систем безпеки умови початку ядерної аварії (при досягненні гранично допустимої температури оболонки твелів для початку інтенсифікації пароцирконієвої реакції при 1473 °К) не виникають при максимальній проектній аварії (МПА).

Таким чином, на основі результатів представленого аналізу встановлено, що необхідна для виникнення ядерної та радіаційної аварії потужність зовнішнього бойового заряду повинна бути здатна зруйнувати всі захисні бар'єри безпеки ЯЕУ та системи безпеки, що забезпечують управління аварійними процесами. Таку потужність можуть мати атомні чи водневі бомби.

До другої групи вихідних аварійних подій (ВАП) при експлуатації ЗАЕС в екстремальних умовах війни відносяться пошкодження або руйнування зовнішніми бойовими зарядами критичних об'єктів інфраструктури, що забезпечують зовнішнє та аварійне електропостачання АЕС. Важливо зазначити, що саме повна відмова систем зовнішнього та аварійного електропостачання власних потреб внаслідок спільного впливу землетрусу (потужністю близько 9 балів в епіцентрі) та затоплення промислового майданчика АЕС Фукусіма-1 цунамі з висотою хвилі біля узбережжя понад 14 метрів стала однією з основних аварій та катастрофічних екологічних наслідків Фукусімської аварії у 2011 році.

Лише за останній період повномасштабної війни в Україні сталося кілька десятків пошкоджень критичних об'єктів інфраструктур зовнішнього та аварійного електропостачання ЗАЕС (трансформаторне обладнання, системи електропостачання споживачам, приміщення дизель-генераторів та інші) та відповідні аварійні зупинки енергоблоків ЗАЕС через знеструмлення станцій. Аналогічні аварійні зупинки трапилися і на інших АЕС України. При цьому необхідно зазначити: процес аварійної зупинки ядерного реакторного енергоблоку знижує загальний рівень ядерної та радіаційної безпеки за

проектними допустимими циклами термічних та динамічних навантажень на системи важливі для безпеки ЯЕРУ з ВВЕР; аварійні зупинки АЕС суттєво впливають на надійність та працездатність усієї енергетичної системи України.

Наступною домінуючою для безпеки групою вихідних аварійних подій (ВАП) в екстремальних умовах військового часу експлуатації ЗАЕС є затоплення промислового майданчика станції внаслідок попадання бойових зарядів у греблю та в акваторію Каховського водосховища (висота греблі понад 50 метрів над рівнем водосховища), в ставок-охолоджувач ЗАЕС каскаду водосховищ, в якому знаходиться понад 2 млн тонн води.

Наслідками затоплення промислового майданчика ЗАЕС можуть бути: ВАП повного знеструмлення енергоблоків (аналог ВАП Фукусімської аварії); порушення умов теплообміну у сухих сховищах відпрацьованого ядерного палива (СВЯП).

Таким чином, найбільш актуальне для ядерної та радіаційної безпеки ВАП в екстремальних умовах експлуатації ЗАЕС в умовах війни є повне тривале знеструмлення (ПТЗ) внаслідок руйнування/пошкодження критичних об'єктів інфраструктури електропостачання та/або затоплення промислового майданчика (ВАП ПТЗ – аналог початку ядерних та радіаційних аварій Фукусімської катастрофи).

Відповідно до ядерного законодавства України офіційна оцінка критичності стану безпеки АЕС та прийняття рішень щодо можливості подальшої експлуатації або необхідності зупинення енергоблоків покладається на Державну інспекцію ядерного регулювання України (ДІЯРУ). Проте екстремальна ситуація в управлінні, експлуатації та регулюванні безпеки внаслідок терористичного тимчасового захоплення ЗАЕС вкрай ускладнює прийняття та реалізації ДІЯРУ адекватних рішень.

Оцінки стану безпеки ядерної енергетики України в екстремальних умовах війни. Нині в Україні, як і в світовій ядерній енергетиці, широкого поширення при модернізаціях ЯЕУ набув принцип «допустимості зниження рівня безпеки (ДЗРБ)» [1]. Відповідно до цього принципу зниження рівня безпеки ЯЕУ допустиме за умови

$$\frac{\Delta\text{ЧПАЗ}}{\text{ЧПАЗ}_0} \ll 1, \quad (5)$$

де ЧПАЗ_0 – базова імовірнісна оцінка частоти пошкодження активної зони (ЧПАЗ); $\Delta\text{ЧПАЗ}$ – навмисне або ненавмисне збільшення ЧПАЗ.

В екстремальних умовах експлуатації ЗАЕС $\Delta\text{ЧПАЗ}$ може бути пов'язане зі збільшенням імовірності ВАП, і якщо події/інциденти/порушення нормальної експлуатації, що виникають, задовольняють умові (5), то зберігається імовірність порушення умови (5). Крім того, як зазначалося вище, уроки відомих ядерних аварій ставлять рівень безпеки та допустиму подальшу експлуатацію енергоблоків у поточний момент часу. Такий підхід до оцінки рівня безпеки експлуатації ЗАЕС в екстремальних умовах війни є недостатньо обґрунтованим з наступних причин: у дофукусімський період в експлуатаційних звітах з імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) українських АЕС з ВВЕР-1000 важка ядерна аварія мала бути однозначним наслідком ВАП ПТЗ.

Однак, імовірність виникнення ВАП ПТЗ покладалась досить малою (порядку 10^{-7} реактор/рік). Тому внесок ВАП ПТЗ (повне тривале

знеструмлення) у базове значення ЧПАЗ був несуттєвим і умова допустимості зниження рівня безпеки (ДЗРБ) (5) виконувалася; а аварії з ВАП ПТЗ мали низький пріоритет для безпеки та розробки превентивних протиаварійних заходів. Однак після Фукусімської аварії ВАП ПТЗ отримали високий пріоритет для безпеки та розробки превентивних протиаварійних заходів.

Отже, найбільш актуальне для ядерної та радіаційної безпеки ВАП в екстремальних воєнних умовах експлуатації ЗАЕС – це повне тривале знеструмлення (ПТЗ) внаслідок руйнування/пошкодження критичних об'єктів інфраструктури електропостачання та/або затоплення промислового майданчика (ВАП ПТЗ – аналог початку ядерних та радіаційних аварій Фукусімської катастрофи).

В екстремальних умовах війни бойові дії є не передбачуваними і не підкоряються стохастичним закономірностям. Крім того, як зазначалося вище, уроки відомих ядерних аварій ставлять під сумнів обґрунтованість загалом усієї методології ІАБ для об'єктивної оцінки стану безпеки ядерних енергетичних установок (ЯЕУ) і в тому числі принцип допустимого зниження рівня безпеки (ДЗРБ). Такий підхід до оцінки рівня безпеки експлуатації ЗАЕС в екстремальних умовах війни є недостатньо обґрунтованим з наступних причин: це не виключає можливості появи нових ВАП, що ставить під сумнів обґрунтованість загалом усієї методології ІАБ для об'єктивної оцінки стану безпеки ЯЕУ (у тому числі й принцип ДЗРБ).

Більш обґрунтованим для об'єктивної оцінки стану (рівня) безпеки є детерміністський підхід, в основу якого покладено моделювання впливу конкретних екстремальних подій на умови безпеки. Одним із таких актуальних питань може бути оцінка умов затоплення промислового майданчика ЗАЕС внаслідок попадання бойових зарядів у греблю чи в Каховське водосховище, чи в ставок-охолоджувач. Затоплення промислового майданчика АЕС Fukushima-Daiichi у 2011 році цунамі було визначальною причиною повного тривалого знеструмлення (ПТЗ) енергоблоків, ядерних аварій та катастрофічних екологічних наслідків.

У стрес-тестах з переоцінки безпеки АЕС України з урахуванням уроків Фукусімської аварії було проведено детерміністський аналіз можливості затоплення промислового майданчика ЗАЕС внаслідок руйнування гребель Дніпровського каскаду водосховищ під час запроєктного землетрусу. Внаслідок цього було встановлено відсутність можливості/ризиків затоплення промислового майданчика ЗАЕС. Однак при моделюванні процесів затоплення у стрес-тестах використовувалися спрощені квазістаціонарні гідравлічні моделі, а також не враховувався вплив таких екстремальних явищ, як землетруси, торнадо та урагани безпосередньо на об'єми води в Каховському водосховищі та в ставку-охолоджувачі ЗАЕС.

У роботі [2] була розроблена вдосконалена гідродинамічна модель можливого затоплення промислового майданчика ЗАЕС внаслідок впливу означених екстремальних явищ на греблю та на акваторію Каховського водосховища та ставка-охолоджувача станції. Екстраполяція результатів цього моделювання на екстремальні воєнні умови експлуатації ЗАЕС дозволяє вважати, що затоплення промислового майданчика ЗАЕС можливе при попаданні бойових зарядів у греблю, в акваторію Каховського водосховища та ставок-охолоджувач з потужністю зарядів, здатною зруйнувати понад 30% греблі або еквівалентною землетрусу з відгуком прискорення на поверхні

грунту більше як 1,2 g, або торнадо більше 2-го класу інтенсивності, або урагану зі швидкістю вітру понад 80 км/год.

З урахуванням вищенаведених результатів умови затоплення промислового майданчика ЗАЕС за потужності бойового заряду із силою впливу F:

$$F > 1,2\rho HS_1 g \quad (6)$$

і/або

$$F > \Delta P_2 S_1 \quad (7)$$

і/або

$$F > 0,3\sigma S_2 \quad (8)$$

і/або

$$F > v_c^2 \rho HS_1 / L, \quad (9)$$

де ρ – щільність води; H – висота промислового майданчика ЗАЕС над рівнем ставка-охолоджувача; S_1, S_2 – площа поверхні ставка-охолоджувача та греблі Каховського водосховища відповідно; g – прискорення сили тяжіння; ΔP_2 – тиск розрідження у торнадо 2-го класу інтенсивності; σ – гранично допустима напруга руйнування бетону греблі Каховського водосховища; v_c – гранично допустима швидкість ураганного вітру; L – еквівалентний (наведений) розмір ставка-охолоджувача.

У постфукусімський період також були розроблені протиаварійні заходи для українських АЕС, пов'язані переважно з кваліфікацією систем дизель-генераторів, встановленням потужних батарей постійного струму, розширенням можливостей пасивних систем безпеки, впровадженням експлуатаційних інструкцій/посібників з управління аваріями з повним тривалим знеструмленням (ПТЗ) та ін. Проте ефективність всіх цих заходів щодо подолання наслідків затоплення недостатньо очевидна, оскільки на момент аварії на АЕС Fukushima-Daiichi всі зазначені вище заходи були реалізовані, але запобігти ядерним аваріям, руйнівним парогазовим вибухам і катастрофічним екологічним наслідкам зрештою не вдалося.

Крім того, необхідно враховувати, що на промисловому майданчику ЗАЕС розташовані сухі сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП), в яких охолодження ядерного палива здійснюється природною циркуляцією повітря. У разі затоплення разом зі сміттям можуть бути порушені умови необхідного охолодження СХВЯП, що створює додаткові вихідні аварійні події (ВАП).

Таким чином, критичними наслідками затоплення промислового майданчика ЗАЕС можуть бути наступні ВАП: повне тривале знеструмлення енергоблоку; порушення умов теплообміну в СХВЯП.

В розроблених у пост-фукусімський період СОАІ/КЯА ВВЕР-1000 дії оперативного персоналу з управління аваріями з повним тривалим знеструмленням (ПТЗ) фактично зводяться до заходів з відновлення електропостачання та підключення всіх доступних засобів охолодження активної зони реактора і в тому числі акумуляторних батарей постійного струму для забезпечення працездатності електронасосів активних систем безпеки.

Слід зазначити, що спроби реалізації всіх зазначених заходів були і в умовах Фукусімської аварії. Проте уникнути ядерних аварій, руйнівних

вибухів та катастрофічних екологічних наслідків не вдалося. Тому не існує підстав щодо ефективності цих заходів у екстремальних умовах затоплення промислового майданчика ЗАЕС.

Для запобігання можливому затопленню промислового майданчика ЗАЕС може бути ефективним будівництво дамб на березі ставка-охолоджувача.

Висновки

1. Актуальним питанням оцінки стану/рівня безпеки ядерної енергетики України в екстремальних умовах війни є ситуація на найбільшій у Європі Запорізькій АЕС з причин її тимчасового знаходження в зоні бойових дій та труднощів в управлінні та експлуатації, а також регулювання безпеки на окупованій станції.

2. Імовірнісні підходи оцінки об'єктивного стану/рівня безпеки Запорізької АЕС у екстремальних умовах є недостатньо обґрунтованими з урахуванням уроків найбільших ядерних та радіаційних аварій.

3. На основі детерміністського підходу визначено умови критичного затоплення для безпеки промислового майданчика Запорізької АЕС внаслідок екстремальних бойових дій.

4. Затоплення промислового майданчика ЗАЕС може бути причиною виникнення двох вихідних аварійних подій: повне тривале знеструмлення енергоблоків; порушення умов теплообміну у сухих сховищах відпрацьованого ядерного палива.

5. Запобігання затопленню промислового майданчика Запорізької АЕС може ґрунтуватися на будівництві захисних бар'єрів від затоплення на березі ставка-охолоджувача.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Забулонов Ю.Л., Лисиченко Г.В., Ковалевський В.В. Тероризм XXI століття – реальна загроза техногенно-екологічній безпеці. – Збірник тез доповідей – Міжнародна науково-практична конференція “Перший Всеукраїнський з’їзд екологів” – Інтернет-спільнота «Промислова екологія» – <http://eco.com.ua/>
2. Комплекс методів переоцінки безпеки атомної енергетики України з урахуванням уроків екологічних катастроф у Чорнобилі та Фукусімі / За ред. В. І. Скалозубова. Одеса: Астропринт, 2013. 242 с.
3. Громов Г.В., Дибач А.М., Зелений О.В., Інюшев В.В. та ін. Результати експертної оцінки стрес-тестів діючих енергоблоків АЕС України з урахуванням уроків аварії на АЕС «Фукусіма-1» Японії. Ядерна та радіаційна безпека. 2012. № 1 (53). С. 3–9.
4. Острейковський В.А., Швириєв Ю.В. Безпека атомних станцій. Імовірнісний аналіз безпеки. М.: ФІЗМАТЛІТ, 2008. 352 с.
5. IAEA International Fact Finding Expert Mission of Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report. IAEA, 2011. 160 p.
6. Грищенко Б.Ю., Полянський М.А., Севбо О.Є., Семенюк І.А. Застосування ймовірнісних методів аналізу безпеки АЕС при дослідженні порушень крихкої міцності корпусу реактора. Ядерна та радіаційна безпека. 2013. № 1 (57). С. 22–25.
7. Щодо Плану дій з виконання цільової позачергової перевірки та подальшого підвищення безпеки АЕС України з урахуванням подій на Фукусіма-1. Колегія Держатомрегулювання, №2 від 19.05.11 р.

8. Борисенко В.І. Про деякі закономірності наслідків аварій на АЕС. Проблеми безпеки АЕС та Чорнобиля. 2012. Випуск 18. С. 6–15.
9. Результати проведення стрес-тестів Національний звіт України. ГІЯРУ, 2011. 137 с.

Стаття надійшла до редакції 09.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 31.05.2023

REFERENCES

1. Zabuloniv, Yu.L., Lysychenko, H.V., & Kovalevskiy, V.V. Teroryzm XXI stolittia – realna zahroza tekhnohenno-ekolohichnii bezpetsi. In *Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia “Pershyi Vseukrainskyi zizd ekolohiv”*. Internet-spilnota «Promyslova.ekolohiia». Retrieved from: <http://eco.com.ua/> [in Ukrainian].
2. Skalozubov, V. I. (Ed.). (2013). *Kompleks metodiv pereotsinky bezpeky atomnoi enerhetyky Ukrainy z urakhuvanniam uroktiv ekolohichny khkatastrof u Chornobyli ta Fukusimi*. Odesa: Astroprint [in Ukrainian].
3. Hromov, H.V., Dybach, A.M., Zelenyi, O.V., Iniushev, V.V. et al. (2012). *Rezultat yekspertnoi otsinky stres-testiv diiuchykh enerhobloktiv AES Ukrainy z urakhuvanniam uroktiv avariina AES «Fukusima-1» Yaponii. Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, 1 (53), 3-9 [in Ukrainian].
4. Ostreikovskiy, V.A., & Shvyriaiev, Yu.V. (2008). *Bezpeka atomnykh stantsii. Imovirnisnyi analiz bezpeky*. Moskow: FIZMATLIT [in Ukrainian].
5. IAEA International Fact Finding Expert Mission of Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami. (2011). IAEA Mission Report.
6. Hryshchenko, B.Yu., Polianskyi, M.A., Sevbo, O.Ye., & Semeniuk, I.A. (2013). *Zastosuvannia ymovirnisnykh metodiv analizu bezpeky AES pry doslidzhenni porushen krykhkoi mitsnosti korpusu reaktora. Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, 1 (57), 22-25 [in Ukrainian].
7. Shchodo Planu dii z vykonannia tsilovoi pozacherhovoї perevirky ta podalshoho pidvyshchennia bezpeky AES Ukrainy z urakhuvanniam podiina Fukusima-1. *Kolehiia Derzhatomrehulivannia*, №2 vid 19.05.11.
8. Borysenko, V.I. (2012). *Pro deiaki zakonimirnosti naslidkiv avariina AES. Problemy bezpeky AES ta Chornobyliia*, 18, 6-15 [in Ukrainian].
9. *Rezultaty provedennia stres-testiv. Natsionalnyi zvit Ukrainy*. (2011). НІАРУ.

The article was received 09.03.2023 and was accepted after revision 31.05.2023

Автори висловлюють свою вдячність Скалозубову Володимиру Івановичу, доктору технічних наук, професору кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка» за обговорення та корисні поради в процесі виконання даної роботи.

Ващенко Володимир Миколайович

доктор фізико-математичних наук, професор Міжвідомчого наукового центру фундаментальних досліджень з питань енергетики і екології

Адреса робоча: пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1585-1229> **e-mail:** nucleoroid@gmail

Кордуба Ірина Богданівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища і охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: Повітрофлотський проспект, 31, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465> **e-mail:** uaror-korduba@ukr.net

UDC 581.132-021.58]502/504

Oksana Tykhenko, D.Sc. of Engineering, Prof.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6459-6497> **e-mail:** okstih@ua.fm

Karina Deineka, student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-4093-0222> **e-mail:** deynekakarina@ukr.net

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF USING ARTIFICIAL PHOTOSYNTHESIS TECHNOLOGY FOR ENVIRONMENTAL DECARBONIZATION

Abstract. *The increasing levels of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere have been recognized as a major contributor to global climate change. As a result, there is a pressing need to develop sustainable and eco-friendly methods for mitigating CO₂ emissions. CO₂ recycling has emerged as a promising solution, aiming to convert CO₂ into valuable products while reducing its impact on the environment. This work uses the CO₂ recycling approach, which involves the conversion of CO₂ emissions into useful organic compounds. An experiment with artificial photosynthesis is carried out with the help of a special installation, where CO₂ undergoes photochemical reactions that contribute to the formation of organic compounds. Photocatalytic conversion of CO₂ is environmentally friendly as it uses light energy and renewable raw materials to produce valuable chemicals without producing harmful by-products or waste. It has been established that TiO₂ in the form of anatase and rutile is the most common CO₂ photocatalyst. As a result of the experiment, the main output products were methanol, acetate aldehyde and acetone. The use of ultraviolet radiation and an electric field significantly affected the synthesis of organic substances and their quantity. It can be used in various industries such as fuel, chemical and pharmaceutical industries. In particular, methanol, acetate aldehyde and acetone are promising substances for the use and production of biofuels.*

Key words: *recycling; carbon dioxide; climate change; artificial photosynthesis; processing of CO₂; atmospheric air; organic substances.*

О.М. Тихенко, К.С. Дейнека

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ШТУЧНОГО ФОТОСИНТЕЗУ ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ДОВКІЛЛЯ

Анотація. *Підвищення рівня вуглекислого газу (CO₂) в атмосфері визнано головним фактором глобальної зміни клімату. Як наслідок, існує нагальна потреба у розробці стійких та екологічно чистих методів зменшення викидів CO₂. Переробка CO₂ стала перспективним рішенням для перетворення CO₂ на цінні продукти, одночасно зменшуючи його вплив на навколишнє середовище. У цій роботі використовується підхід рециклінгу CO₂, який передбачає перетворення викидів CO₂ в корисні органічні сполуки. Експеримент з штучним фотосинтезом здійснюється за допомогою спеціальної установки, де CO₂ піддається фотохімічним реакціям, що сприяють утворенню органічних сполук. Фотокаталітичне перетворення CO₂ є екологічним, оскільки використовується світлова енергія та відновлювана сировина для виробництва*

цінних хімічних речовин без утворення шкідливих побічних продуктів або відходів. Встановлено, що TiO_2 у формі анатазу та рутилу є найпоширенішим фотокаталізатором CO_2 . В результаті проведення експерименту основними продуктами виходу були метанол, ацетат альдегід та ацетон. Використання ультрафіолетового випромінювання та електричного поля значно вплинуло на синтез органічних речовин та їх кількість. В подальшому вони можуть бути використані в різних галузях, таких як паливна, хімічна та фармацевтична промисловість. Зокрема, метанол, ацетат альдегід та ацетон є перспективними речовинами для використання та виробництва біопалива.

Ключові слова: рециклінг; вуглекислий газ; зміна клімату; штучний фотосинтез; переробка CO_2 ; атмосферне повітря; органічні речовини.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.39-48>

Вступ

Зі зростанням рівня вуглекислого газу (CO_2) в атмосфері, зміна клімату стала однією з найважливіших проблем, які ставлять під загрозу існування нашої планети. Швидкісний розвиток промисловості, споживчого суспільства та використання викопних палив призвели до значного збільшення викидів CO_2 . У зв'язку з цим, на сьогоднішній день нагальною стала потреба у розробці стійких та екологічно чистих методів зменшення викидів CO_2 . Один з таких методів – рециклінг CO_2 . За рахунок застосування цього процесу можна не лише зменшити вплив CO_2 на клімат Землі, але й перетворити його в цінні ресурси.

Фотокаталітична конверсія CO_2 в органічні речовини є важливою та актуальною з кількох причин:

1) CO_2 є головним фактором зміни клімату, і його перетворення на хімічні речовини за допомогою фотокаталізу може допомогти зменшити кількість CO_2 в атмосфері та пом'якшити наслідки зміни клімату;

2) виробництво органічних речовин з CO_2 може зменшити залежність від викопного палива та інших невідновлюваних ресурсів, що робить його сталим підходом до хімічного синтезу;

3) фотокаталітичне перетворення CO_2 є екологічним, оскільки використовується світлова енергія та відновлювана сировина для виробництва цінних хімічних речовин без утворення шкідливих побічних продуктів або відходів;

4) перетворення CO_2 на органічні речовини може створити нові економічні можливості та джерела доходу при зменшенні використання вуглецю;

5) вивчення фотокаталітичного перетворення CO_2 вимагає розробки нових матеріалів, каталізаторів і реакційних систем, що може призвести до наукового прогресу в галузі матеріалознавства та каталізу.

Мета роботи полягає у дослідженні екологічних переваг рециклінгу CO_2 для декарбонізації та забезпечення екологічно стійкого розвитку довкілля.

Аналіз літератури

Декарбонізація – це зменшення викидів CO_2 за рахунок використання джерел енергії з низьким вмістом вуглецю, досягнення меншого викиду парникових газів в атмосферу.

Основними прикладами методів декарбонізації є:

1. ініціатива обмеження видобутку корисних копалин, основні положення якої викладені в [1] та базуються на розрахунках міжнародних експертів [2], які вважають, що для уповільнення глобального потепління необхідно до 2030 року скоротити видобуток вугілля (61%), нафти (36%) і природного газу (32%);

2. відмова від двигунів внутрішнього згорання. Зменшення перевезень транспортних засобів на основі двигунів внутрішнього згорання підтримується членами Альянсу з декарбонізації транспорту [3] та Альянсу з нульовими викидами транспортних засобів [4], які об'єднують понад 20 країн. Згідно з аналізом відкритих даних [5], до 2025 року частка продажів нових автомобілів з двигунами внутрішнього згорання знизиться до 23%. Пропорційно до цього знизиться і попит на продукти нафтопереробки;

3. технологія прямого захоплення повітря (Direct-Air-Capture, DAC), що заснована на вилученні CO₂ з атмосфери за допомогою гігантських пирососів. Фільтруючий матеріал містить аміни – спеціальні хімічні речовини, які вловлюють вуглекислий газ [6];

4. штучний фотосинтез – це процес використання штучних систем для виробництва енергії з використанням сонячного світла. Штучний фотосинтез відбувається подібно до природного фотосинтезу в рослинах [7]. Технологія штучного фотосинтезу для рециклінгу CO₂ у органічні сполуки має потенціал для зменшення викидів парникових газів та скорочення використання викопних палив. Однак, перед впровадженням у промисловий процес необхідно вдосконалення каталізаторів, оптимізація енергетичної ефективності та розв'язання практичних технічних проблем.

Методика проведення дослідження

У лабораторних умовах проведений експеримент по рециклінгу. Для проведення досліджень використовувалися два зразки фотокаталізатора TiO₂ у вигляді рутилу та анатазу.

Питома поверхня досліджуваних зразків оцінювалася за вимірюваннями адсорбції/десорбції азоту при 196 °C за допомогою приладу Sorptomatic 1900 (CarloErba, Мілан, Італія). Перед вимірюваннями зразки порошку дегазувалися у вакуумі при 300 °C.

Спектри дифузного відбиття зразків порошку вимірювалися за допомогою спектрофотометра Cary 5000 UV–VIS–NIR з інтегруючою сферою (Agilent, Санта-Клара, Каліфорнія, США) в діапазоні довжин хвиль 200–800 нм. Спектри відбиття фіксувалися зі спектральною роздільністю 1 нм.

Морфологія поверхні зразків досліджувалася за допомогою скануючого електронного мікроскопа HITACHI (HitachiHigh-Tech, Tokyo, Японія), оснащеного енергодисперсійним спектрометром EDS (Thermo Noran, Worona Road Madison, WI, USA) .

Фотокаталітичні вимірювання проводилися в безперервному проточному реакторі (рис. 1), що складається з двох частин: нижнього циліндра, який був обладнаний нагрівальним елементом і системою охолодження, а також верхнього циліндра, всередині якого поміщався фотокаталізатор і куди вводили реакційну суміш.

Верхня частина була закрита кварцовим склом і ущільнена хімічно інертними прокладками. Як джерело електромагнітного випромінювання

(365 нм і 465 нм) використовувалася діодна матриця. Площа поверхні фотокатализатора, піддана електромагнітному випромінюванню, становила 10,18 см². Умови процесу були наступними: температура реактора 30 °С, реакційна суміш – 5% об. Н₂О – 95% об. СО₂; загальна витрата газу – 0,8 мл/хв, маса фотокатализатора – 10 мг.

Вологий СО₂ був отриманий пропусканням сухого СО₂ через термостатований барботер, наповнений фільтрованою водою. Температура барботера встановлювалася таким чином, щоб досягти 5% води в газі. Додатково відбувався підігрів газопроводу, щоб уникнути конденсації води. Перші вимірювання проводилися щонайменше через 2 години на потоці. Аналіз продуктів реакції проводився за допомогою on-line газового хроматографа, оснащеного полум'яно-іонізаційним детектором і капілярною колонкою HP PLOT/Q. Були використані такі умови аналізу: газ-носії – гелій, температура детектора 220 °С, температура інжектора 120 °С.

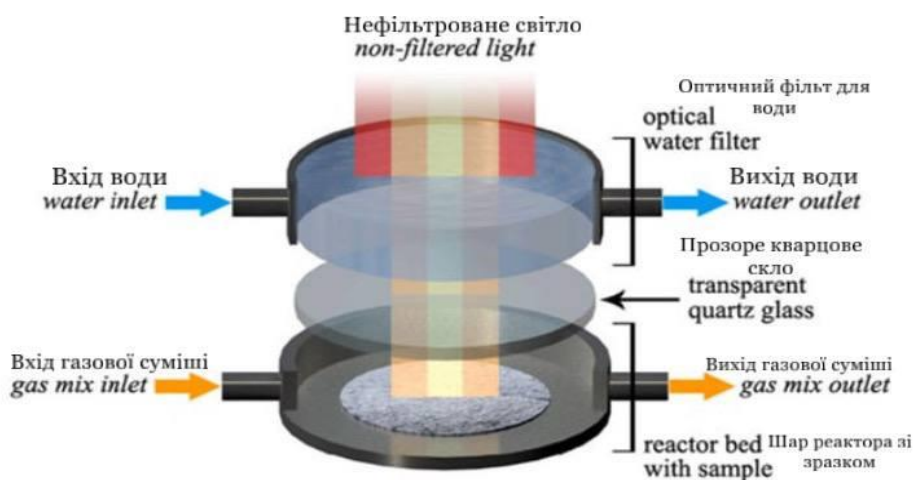


Рис. 1. Схематичне зображення фотокаталітичного реактора

Результати дослідження

Для експерименту обрано два зразки TiO₂. Перший зразок був оброблений при 500 °С, інший – 700 °С. Після такої термічної обробки змінюється питома поверхня (рис. 2). Перший зразок складається з 87,8% анатазу і 12,8% рутилу, другий – на 100% складається з рутилу.

Було проведено дослідження з рециклінгу СО₂ за допомогою штучного фотосинтезу.

Штучний фотосинтез використовує фотокатализатори – речовини, які можуть поглинати світлову енергію і використовувати її для спонукання хімічних реакцій. Катализатором в даній реакції виступає TiO₂.

У процесі фотокаталітичної реакції, під дією світла, фотокатализатори стають активними і здатними ініціювати хімічні перетворення. Вони можуть взаємодіяти з реакційними речовинами (наприклад, органічними сполуками) і сприяти формуванню нових зв'язків або розриву існуючих. Цей процес може привести до синтезу складних органічних сполук.

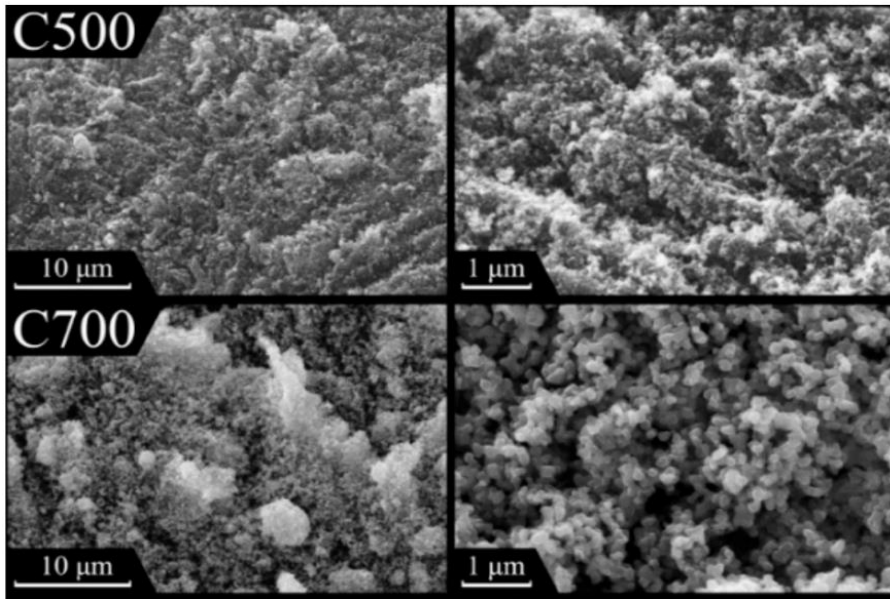


Рис. 2. Вигляд зразків TiO₂ після термічної обробки

Мета першого експерименту – перевірити, чи відбудеться синтез речовин без використання ультрафіолетового випромінювання.

Результати проведеного дослідження свідчать, що синтез відбувався, найбільше утворювалося ацетат альдегіду, метанол і ацетон утворювалися в дуже малій кількості і лише за один проміжок часу порівняно з ацетат альдегідом (рис. 3).

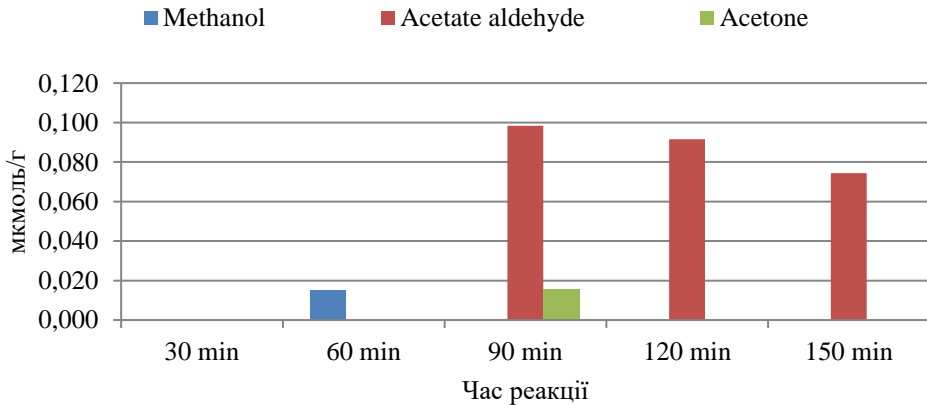


Рис. 3. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину без електромагнітного випромінювання

Експеримент з анатазом під дією ультрафіолету, потужність якого становила 50% без електричного поля, показав, що кількість ацетат альдегіду з часом збільшується. Метанол почав утворюватися лише через 90 хвилин. Ацетон утворився з самого початку, в невеликій кількості (рис. 4).

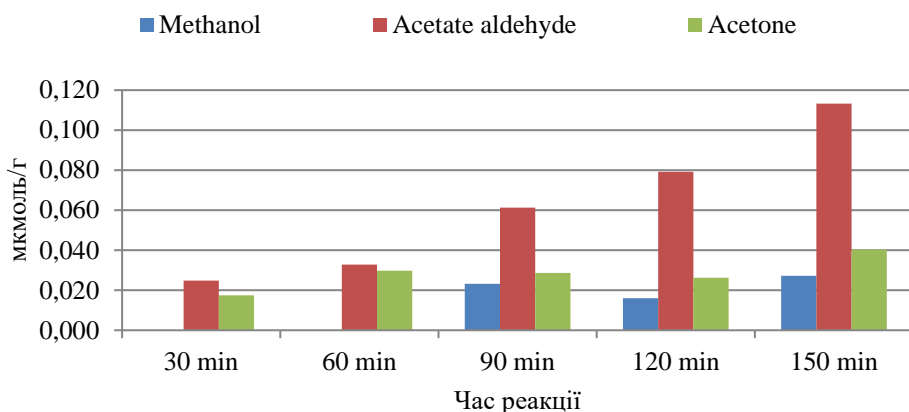


Рис. 4. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину за допомогою УФ (інтенсивність 50%) випромінювання без електричного поля

При збільшенні інтенсивності УФ до 100% кількість усіх продуктів зростає в півтора рази, метанол почав утворюватися знову з 90 хв. Отже, інтенсивність УФ впливає на вихід продукції (рис. 5).

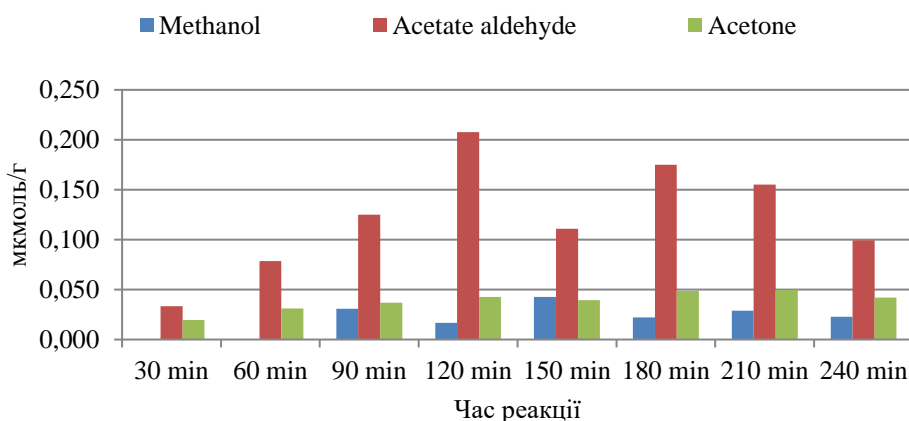


Рис. 5. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (інтенсивність 100%) випромінювання без електричного поля

При використанні 100% інтенсивності УФ-випромінювання і додаванні електричного поля (рис. 6) відразу видно, що реакція пройшла краще, ніж в попередньому варіанті. Всі продукти почали утворюватися з початку експерименту. З часом всі три продукти почали знижуватися через дезактивацію каталізатора.

Порівнюючи синтез речовини за допомогою ультрафіолетового світла та електричного поля, можна чітко простежити, що кількість речовини значно збільшилася порівняно з тим, коли електричне поле було відсутнє.

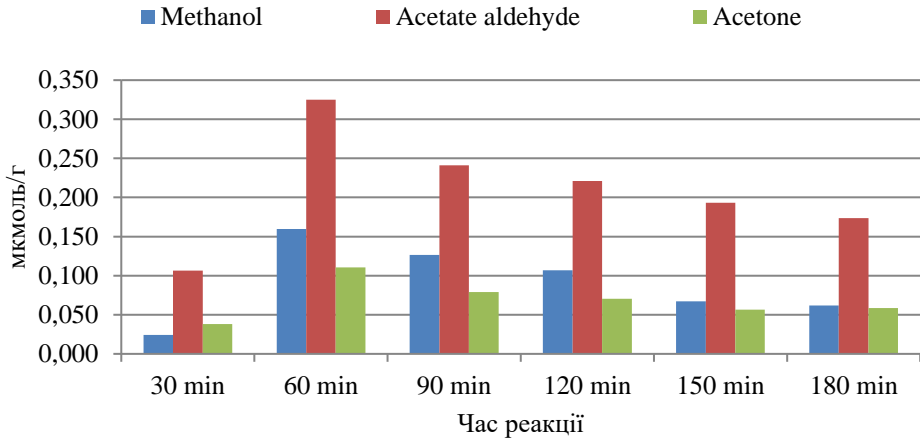


Рис. 6. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (100% інтенсивності) випромінювання з електричним полем

Експеримент з рутилом при використанні 100% ультрафіолетового випромінювання, без електричного поля (рис. 7) показав, що найбільше утворюється ацетат альдегіду, ацетон починає утворюватися з 60 хвилини, а метанол – з 120 хвилин у найменшій кількості.

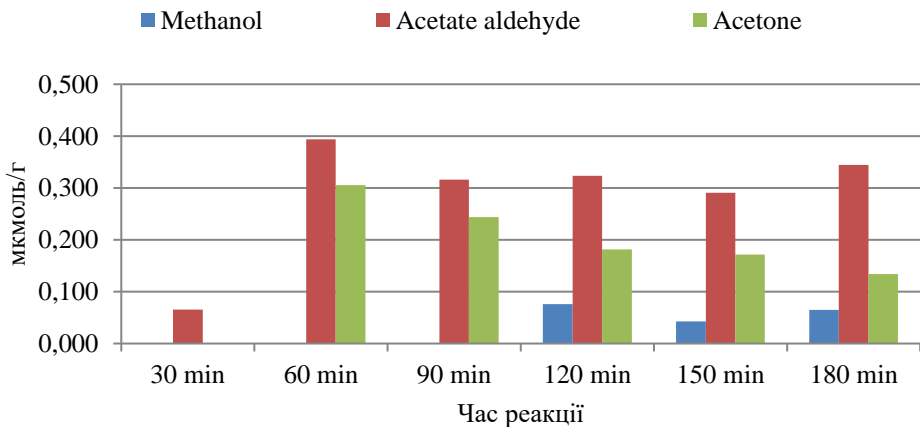


Рис. 7. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (інтенсивність 100%) випромінювання, без електричного поля

При додаванні електричного поля (рис. 8) ацетон і ацетат альдегід почали утворюватися з самого початку експерименту, метанол – з 90 хвилини.

Дослідження з додаванням рутилу показали, що більша кількість ацетатного альдегіду утворюється за допомогою ультрафіолетового випромінювання та електричного поля. Більша кількість метанолу і ацетону утворюється без використання електричного поля.

Порівнюючи однакові умови експерименту, використання рутилу виявилось більш ефективним по відношенню до аналізу.

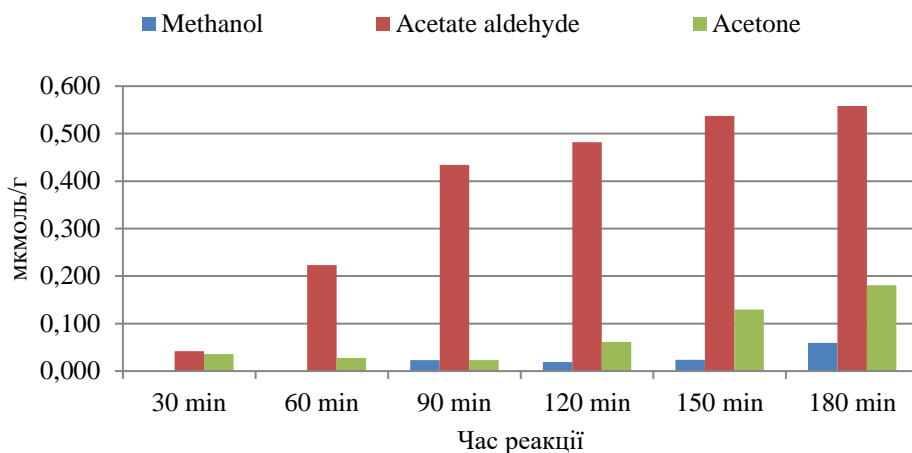


Рис. 8. Результати утворення кількості мікромолей органічних речовин, що утворилися на 1 грам каталізатора за 1 годину з використанням УФ (100% інтенсивності) випромінювання з електричним полем

Висновки

Фотокаталітичне перетворення CO_2 з утворенням органічних речовин є важливим, оскільки CO_2 є основним парниковим газом, надлишок якого в атмосфері призводить до зміни клімату. Перетворюючи CO_2 на інші хімічні речовини, можна пом'якшити його вплив, зменшивши його концентрацію в атмосфері.

В результаті проведення експерименту основними продуктами виходу були метанол, ацетат альдегід та ацетон. Використання ультрафіолетового випромінювання та електричного поля значно вплинуло на синтез органічних речовин та їх кількість.

Метанол утворювався в найбільшій кількості зі зразком анатазу, із середнім виходом 0,040 мкмоль/год. У найбільшій кількості ацетат альдегід утворювався зі зразком рутилу, середній вихід становив 0,334 мкмоль/год. Ацетон також утворювався в найбільшій кількості зі зразком рутилу, із середнім виходом 0,124 мкмоль/год.

За рахунок фотокаталітичного перетворення CO_2 можливе виробництво відновлюваного палива та хімікатів. Встановлено, що TiO_2 у формі анатазу та рутилу є найпоширенішим фотокаталізатором CO_2 . В обох випадках фотокаталітичне перетворення CO_2 передбачає поглинання світлової енергії для створення електронно-діркових пар, які потім можуть реагувати з CO_2 з утворенням різних продуктів.

Рециклінг CO_2 за допомогою штучного фотосинтезу має кілька екологічних аспектів, які є перспективними для декарбонізації довкілля:

- зменшення викидів парникових газів;
- використання відновлюваної енергії;
- зменшення залежності від викопних ресурсів;
- зниження забруднення довкілля;
- закриття глобального вуглецевого циклу.

Утворені речовини – метанол, ацетат альдегід та ацетон є перспективними речовинами для використання та виробництва біопалива. Метанол може використовуватись як пряме паливо для спеціалізованих двигунів або як сировина для виробництва інших паливних продуктів, таких як диметил ефір (DME) або водень. Ацетат альдегід може бути перетворений в бутанол, який може служити як замітник бензину. Бутанол має високий вміст енергії і може бути використаний у стандартних двигунах без значних модифікацій. Ацетон є перспективною речовиною для виробництва пропанолу, який може бути використаний як альтернатива бензину або додаткове паливо для змішування з бензином.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The Lofoten Declaration: A Global Call for Climate Leadership. The Lofoten Declaration. URL: <http://www.lofotendeclaration.org/> (дата звернення: 18.06.2023).
2. The Production Gap Report: 2020 Special Report / SEI, IISD, ODI, E3G, UNEP, December 2020. URL: <https://productiongap.org/> (дата звернення: 18.06.2023).
3. Transport Decarbonisation Alliance. URL: <http://tda-mobility.org/> (дата звернення: 18.06.2023).
4. Zev Alliance. Accelerating the Adoption of Zero-Emission Vehicles. URL: <http://www.zevalliance.org/> (дата звернення: 18.06.2023).
5. Growing momentum: Global overview of government targets for phasing out sales of new internal combustion engine vehicles. International Council on Clean Transportation. URL: <https://theicct.org/blog/staff/global-ice-phaseout-nov2020> (дата звернення: 18.06.2023).
6. Журнал «Економіка та держава» – наукове фахове видання України з питань економіки. URL: http://www.economy.in.ua/pdf/1_2021/28.pdf (дата звернення: 18.06.2023).
7. Визначення фотосинтезу, етапи, рівняння, процес і діаграма. *Microbiology Note – Online Biology Notes*. URL: <https://microbiologynote.com/uk/photosynthesis/> (дата звернення: 18.06.2023).

Стаття надійшла до редакції 13.06.2023 і прийнята до друку після рецензування 11.09.2023

REFERENCES

1. The Lofoten Declaration: A Global Call for Climate Leadership. The Lofoten Declaration. Retrieved June, 18, 2023 from <http://www.lofotendeclaration.org/>
2. The Production Gap Report: 2020 Special Report. SEI, IISD, ODI, E3G, UNEP, December 2020. Retrieved June, 18, 2023 from <https://productiongap.org/>
3. Transport Decarbonisation Alliance. Retrieved June, 18, 2023 from <http://tda-mobility.org/>
4. Zev Alliance. Accelerating the Adoption of Zero-Emission Vehicles. Retrieved June, 18, 2023 from <http://www.zevalliance.org/>
5. Growing momentum: Global overview of government targets for phasing out sales of new internal combustion engine vehicles. International Council on Clean Transportation. Retrieved June, 18, 2023 from <https://theicct.org/blog/staff/global-ice-phaseout-nov2020>
6. Journal «Economy and the State» – a scientific publication of Ukraine on economic issues. Retrieved June, 18, 2023 from http://www.economy.in.ua/pdf/1_2021/28.pdf
7. Definition of photosynthesis, stages, equations, process and diagram. *Microbiology Notes – Online Biology Notes*. Retrieved June, 18, 2023 from <https://microbiologynote.com/uk/photosynthesis/>

The article was received 13.06.2023 and was accepted after revision 11.09.2023

Тихенко Оксана Миколаївна

д.т.н., проф., професор кафедри екології Національного авіаційного університету

Адреса робоча: 03058 Україна, м. Київ, пр-т Любомира Гузара, 1

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6459-6497> **e-mail:** okstih@ua.fm

Дейнека Каріна Сергіївна

здобувачка вищої освіти, кафедра екології Національного авіаційного університету

Адреса робоча: 03058 Україна, м. Київ, пр-т Любомира Гузара, 1

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-4093-0222> **e-mail:** deynekakarina@ukr.net

УДК 628.38:628.13:628.16:628.17:618.21

Roman Hlushchenko, post-graduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2863-1480> **e-mail:** gr2017inc@gmail.com

Tetiana Tkachenko, Dr Hab., professor, Head of a Department

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

RAINWATER MANAGEMENT BY “GREEN” ROOFS ON THE EXAMPLE OF TRADE-BUSINESS CENTRE “PEREKHRESTIA”, DNIPRO CITY

***Abstract.** The densification of urban building causes the replacement of urban green areas with negative environmental impact. Therefore, it is necessary to move to the concept of combining living plants with building structures. The concept of green construction is a universal approach that allows not only to reduce the negative impact of construction on the environment but on the contrary, to ensure a positive impact on the environment. This concept can be applied at all levels – from a single building to neighborhoods or settlements. One of the serious problems of cities is the management of stormwater runoff. They carry trash, bacteria, heavy metals and other pollutants through storm drains into local waterways. The most common means of managing urban runoff are storm sewer systems, which have the conventional name of "grey infrastructure." These systems are ageing and require expensive repairs. Due to climate change, the amount of runoff is increasing, which leads to exceeding the carrying capacity of the systems. The development of territories significantly disrupts the water balance. The sponge city allows effective solving of these problems thanks to the maximum approach of the functioning of built-up areas to unbuilt ones. In this work, a "green" roof is being developed on the roof of the "Perekhrestia" shopping and business center in Dnipro city. To do this, the volume of precipitation in the city for 2022 was analyzed. The "Roof Garden" system from the Zinko-Ukraine company was adopted. This system currently has a margin of 50% retention of precipitation falling on green areas. To dispose of water from pedestrian areas, it is necessary to install water storage tank(s). It is advisable to use this water for watering green areas or for toilet needs. Two toilets in the public toilet ensure the emptying of the tank(s) in 15 days. Increasing the number of sanitary devices simplifies the water supply system and increases the resilience of objects to climate change.*

***Keywords:** "green construction"; "green" roof; rainwater; stormwater runoff; sponge city; rainwater management.*

Р.О. Глушенко, Т.М. Ткаченко

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

КЕРУВАННЯ ДОЩОВИМИ СТОКАМИ «ЗЕЛЕНИМИ» ПОКРІВЛЯМИ НА ПРИКЛАДІ ТОРГОВЕЛЬНО-ДІЛОВОГО КОМПЛЕКСУ «ПЕРЕХРЕСТЯ» В М. ДНІПРО

***Анотація.** Ущільнення забудови міст спричиняє заміщення міських зелених зон з негативним впливом на довкілля. Тому необхідно переходити до концепції поєднання живих рослин з будівельними конструкціями. Концепція зеленого будівництва є універсальним підходом, що дозволяє не просто зменшити*

негативний вплив будівництва на довкілля, а навпаки, забезпечити позитивний вплив на навколишнє середовище. Цю концепцію можна застосовувати на всіх рівнях – від окремої будівлі до кварталів або населених пунктів. Однією з серйозних проблем міст є керування зливовими стоками. Вони переносять сміття, бактерії, важкі метали та інші забруднювачі через зливову каналізацію в місцеві водні шляхи. Найбільш розповсюдженим засобом управління міськими стоками є системи зливової каналізації, які мають умовну назву «сіра інфраструктура». Ці системи старіють і вимагають дорогого ремонту. Через зміни клімату обсяг стоків зростає, що призводить до перевищення пропускної спроможності систем. Забудова території суттєво порушує водний баланс. Місто-губка дозволяє ефективно вирішувати ці проблеми завдяки максимальному наближенню функціонування забудованих територій до незабудованих. У даній роботі розробляється «зелена» покрівля на даху торговельно-ділового комплексу «Перехрестя» в м. Дніпро. Для цього проаналізовано об'єми опадів в м. Дніпро за 2022 р. Прийнято систему «Сад на даху» від компанії Зінко-Україна. Ця система на сьогодні має запас 50% утримання опадів, що потрапили на зелені зони. Для утилізації води з пішоходних зон необхідно встановлювати бак(и) для накопичення води. Цю воду доцільно використовувати на полив зелених зон або для потреб туалетів. Два унітази громадського туалету забезпечують спорожнення бака(ів) за 15 діб. Збільшення кількості санітарних приладів спрощує систему водопостачання та підвищує стійкість об'єктів до змін клімату.

Ключові слова: «зелене» будівництво; «зелена» покрівля; дощові води; зливові стоки; місто-губка; керування дощовими стоками.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.49-58>

Вступ

З початку технологічної революції урбанізація набула лавинного характеру. Це призводить до знищення природних ландшафтів. Ущільнення забудови міст спричиняє заміщення міських зелених зон, тобто втрату рекреаційних можливостей, біорізноманіття, природних засобів очищення довкілля та насичення киснем. Тому необхідно переходити до концепції поєднання живих рослин з будівельними конструкціями.

Якщо не вживати заходів, виникають небезпечні явища – ефект міського теплового острова (різниця температури сягає 10°C), погіршення якості повітря через техногенне навантаження, проблеми з відведенням поверхневого стоку через зростання їхнього об'єму та зношення системи дощової каналізації, соціальні проблеми – нестача місць для рекреації, погіршення стану здоров'я, відеоєкологічні проблеми (погіршення естетичних якостей, створення психічно агресивного середовища) та багато інших.

Концепція зеленого будівництва є універсальним підходом, що дозволяє не просто зменшити негативний вплив будівництва на довкілля, а навпаки, забезпечити позитивний вплив на навколишнє середовище. Цю концепцію можна застосовувати на всіх рівнях – від окремої будівлі до кварталів або населених пунктів.

Об'єкт вважається об'єктом “зеленого” будівництва, якщо його спроектовано, побудовано та він експлуатується з забезпеченням [1]:

- ефективного використання ресурсів;
- захисту довкілля та зменшення забруднення;
- здорового, зручного та ефективного використання простору;
- гармонійного співіснування з природою.

Технології зеленого будівництва відіграють важливу роль у зниженні викидів вуглецю. Виробництво бетонів дає до 5% світових антропогенних викидів цього парникового газу [2]. Тому зменшення загального об'єму бетону, який використовується під час будівництва, відповідає концепції “зеленого” будівництва.

У зелених будівлях використовуються різні технології та матеріали, щоб зменшити вплив на навколишнє середовище та/або витрати на енергію. Такими є оптимізація орієнтації будівлі [3], використання екологічно чистих та енергоефективних матеріалів протягом усього життєвого циклу будівлі [3, 4], енергоефективне підтримання параметрів мікроклімату опаленням та кондиціонуванням повітря [5], зокрема правильним повітророзподіленням [6, 7], управління освітленням [5], використання природного освітлення [5], використання відновлюваних джерел енергії [5], навчання людей правильній експлуатації будівель [5], технологія розумного міста [8]. Це дозволяє оптимізувати режими роботи різних систем життєзабезпечення та споживання ресурсів, а також впровадити “зелені конструкції”, що поєднують будівельні конструкції з живими рослинами [9-15].

Однією з серйозних проблем міст є керування зливовими стоками [16], що є основною причиною забруднення води та ґрунту в містах. Вони переносять сміття, бактерії, важкі метали та інші забруднювачі через зливову каналізацію в місцеві водні шляхи. Сильні зливи можуть спричинити повені, які завдадуть шкоди майну та інфраструктурі [17].

Найбільш розповсюдженим засобом управління міськими стоками є системи зливної каналізації, які мають умовну назву «сіра інфраструктура» [18]. Ці системи старіють і вимагають дорогого ремонту. Через зміни клімату обсяг стоків зростає, що призводить до перевищення пропускної спроможності систем.

Виходом є перехід до «зеленої» інфраструктури [19] за концепцією «місто-губка» [20]. Основним принципом є поглинання дощової води якомога ближче до її падіння.

У 2019 році Конгрес Сполучених Штатів Америки прийняв «Закон про покращення водної інфраструктури» [21], який визначає зелену інфраструктуру як «набір заходів, які використовують системи рослин або ґрунту, водопроникне покриття або інші водопроникні поверхні чи субстрати, збір та повторне використання дощової води або озеленення для зберігання, проникнення або випаровування зливної води для зменшення надходження до каналізаційних систем або поверхневих вод».

Концепція міста-губки передбачає максимальне використання наявних поверхонь для поглинання дощової води – «зелені» покрівлі, дощові сади, водопропускні покриття доріг та доріжок тощо [22]. Водостоки покрівель можуть обладнуватися резервуарами для збирання дощової води на технічні цілі [23]. Особливо ефективно збирати воду після фільтрації в шарах «зелених» покрівель [23].

Забудова територій [24] суттєво порушує водний баланс (рис. 1), що негативно позначається на довкіллі. Зокрема, зменшення випаровування призводить до зниження відносної вологості повітря. А відсутність потоку ґрунтових вод призводить до порушення водного балансу водоносних горизонтів, зокрема, роботи колодязів у прилеглих територіях. Місто-губка дозволяє ефективно вирішувати ці проблеми завдяки максимальному наближенню функціонування забудованих територій до незабудованих.

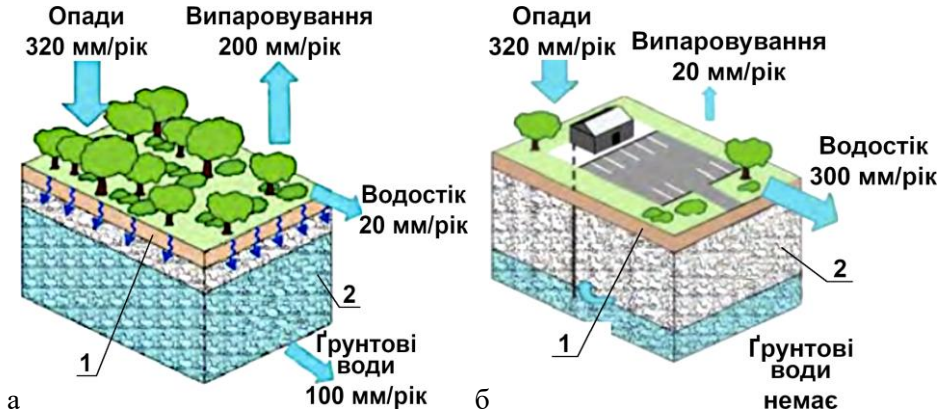


Рис. 1. Водний баланс територій [24]: а – незабудованої; б – забудованої

Таким чином, «зелена» інфраструктура – це адаптивний і багатофункціональний підхід до управління зливовими водами та підвищення кліматичної стійкості з багатьма перевагами для громад:

- покращує якість стічних вод та зберігає їх для повторного використання;
- підвищує стійкість спільноти та інфраструктури;
- зміцнює місцеву економіку через зменшення водоспоживання, витрат на дощову каналізацію, більш надійну логістику через відсутність затоплення автошляхів, відсутність втрат через затоплення підвалів, цокольних поверхів, підземних переходів тощо.

Одним з елементів «зеленого будівництва», який виконує функцію губки, є зелені покрівлі на будівлях, тобто поєднання покрівлі з живими рослинами. Особливістю «зелених покрівель» є не лише затримання і відведення дощової води, але і її фільтрація з подальшою можливістю застосування для господарських потреб. Тому постає задача створення таких «зелених» покрівель.

Матеріали і методи

У даній роботі розробляється «зелена» покрівля на даху торговельно-ділового комплексу «Перехрестя» в м. Дніпро. При цьому необхідно врахувати кліматичні умови за даними [25]. Дніпропетровська область знаходиться в помірних широтах і має помірно континентальний клімат [25]. У січні спостерігається найнижча температура – мінус 5,5 °С. У липні спостерігається найвища температура – плюс 26,7 °С. Річна кількість опадів 513 мм. Водні ресурси області в середній за водністю рік становлять 52,8 млрд м³. Зокрема, місцевий стік, що формується в межах області, становить 0,825 млрд м³ і 0,381 млрд м³ – запаси підземних вод. Водозабезпеченість в середньому по області становить 0,57 тис. м³ води на душу населення на рік. В порівнянні цей показник по Україні становить 1 тис. м³ на рік, у Європі – 4,6 тис. м³, в Канаді – 99 тис. м³, у світі – 8,2 тис. м³.

Огляд та аналіз наявних систем водопостачання та водовідведення області показує, що вони знаходяться переважно в незадовільному стані, очисні споруди працюють неефективно та потребують ремонту та реконструкції.

У цілому, переважання більшості очисних споруд не спостерігається. Однак, якість очищення стічних вод незадовільна, низка показників перевищує нормативи гранично-допустимого скиду забруднювачів (ГДС) і не дозволяє досягнути категорії “нормативно-очищені”.

Для створення «зеленої» покрівлі на даху торговельно-ділового комплексу «Перехрестя» в м. Дніпро проаналізуємо об'єми опадів в м. Дніпро за 2022 р. (рис. 2). Максимальний об'єм опадів відповідає $O_c = 34$ мм у квітні (кількість днів $z = 30$).

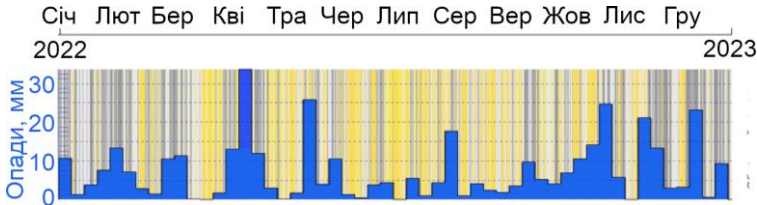


Рис. 2. Об'єм опадів за даними архіву погоди

Розроблення «зеленої» покрівлі з функцією водоутримання та повторного використання води

Задля максимального утримування води було проаналізовано наявні на ринку рішення і прийнято систему «Сад на даху» від компанії Зінко-Україна (рис. 3, 4). Це – система зі спеціально підібраним для цього набором рослин, вологоутримуючими матами і дренажними елементами типу Floradrain® FD 40 [26]. Висота системи 160 мм, маса 180 кг/м², водонакопичення 68 дм³/м² або $H = 68$ мм, співвідношення стоку $C < 30$. Площа даху ТДК «Перехрестя» $S_n = 1192$ м² складається з площі зелених зон $S_{gy} = 544$ м², що утримують воду, та площі пішохідних зон $S_{og} = 648$ м² з водопроникним покриттям, звідки вода відводиться.

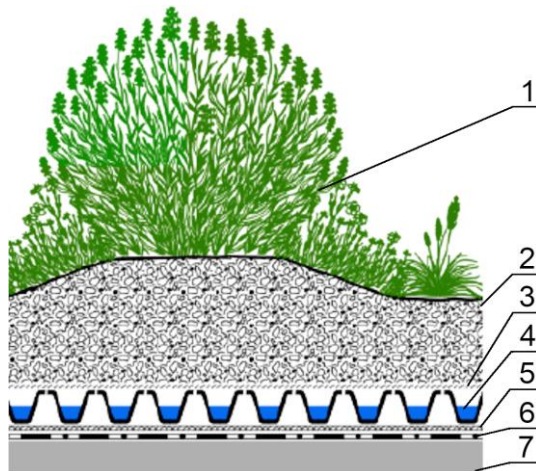


Рис. 3. Схема системи Floradrain® FD 40 [26]: 1 – багаторічні рослини; 2 – системний субстрат «запашні трави»; 3 – системний фільтр SF; 4 – дренажний елемент Floradrain® FD 40-E, FD 40-R (рулон), FD 40-RV (рулон і системний фільтр); 5 – вологоутримувальний захисний мат SSM 45; 6 – протикореневий шар WSF 40; 7 – конструкція даху



Рис. 4. Проект «зеленої» покрівлі:

- монтування дренажного мату Floradrain® FD 40 у пішохідних зонах отворами донизу для швидшого водовідведення ($S_{ee} = 648 \text{ м}^2$);
- монтування дренажного мату Floradrain® FD 40 у зонах насаджень отворами догори для утримування води ($S_{ey} = 544 \text{ м}^2$)

При максимальній зливі на рівні $O_c = 34 \text{ мм}$ запас становить

$$Z = 100 \cdot (H - O_c) / H = 50\%.$$

Таким чином, кліматичні зміни і пов'язане з ними зростання кількості опадів не повинні виснажити можливості водоутримання зелених зон покрівлі. Дощова вода буде повністю утримана зеленими зонами без навантаження на зливове водовідведення.

Теоретична максимальна кількість опадів, яка утримується зеленими зонами даної покрівлі, дм^3 ,

$$W_{ey} = S_{ey} \cdot O_c. \quad (1)$$

За формулою (1) $W_{ey} = 18496 \text{ дм}^3$.

Потреба у воді на полив за [27] становить 3...6 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{добу})$. Якщо асортимент рослин відповідає відносно невеликій кількості опадів області, приймаємо потребу $q = 3 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{добу})$. Тоді потреба у поливі зелених зон становитиме, $\text{дм}^3/\text{добу}$,

$$Q_n = S_{ey} \cdot q. \quad (2)$$

За формулою (2) $Q_n = 1632 \text{ дм}^3/\text{добу}$. Тоді кількість діб, які покрівлю не слід поливати після максимальної зливи, слід визначати за формулою, діб,

$$n = W_{ey} / Q_n = O_c / q. \quad (3)$$

За формулою (3) покрівлю можна не поливати $n = 11,3$ діб. При цьому залишається невикористаний ресурс дощової води з пішохідних зон об'ємом, м^3 ,

$$W_{ee} = S_{ee} \cdot O_c. \quad (4)$$

За формулою (4) $W_{\text{вв}} = 22032 \text{ дм}^3$. Цю воду доцільно збирати до бака(ів) для подальшого використання. Для максимальної утилізації даного ресурсу об'єм бака(ів) має відповідати $W_{\text{вв}}$ з заокругленням у більший бік – $\Sigma W_{\text{в}} = 23 \text{ м}^3$.

Оптимальний час зберігання води за досвідом становить 2...3 тижні, після чого якість води значно погіршується через біологічні та хімічні процеси. Використання накопиченого об'єму на полив відбуватиметься протягом n_n діб за формулою

$$n_n = W_{\text{вв}} / Q_n = (S_{\text{вв}} / S_{\text{вн}}) \cdot (O_c / q) = (S_{\text{вв}} / S_{\text{вн}}) \cdot n. \quad (5)$$

За залежністю (5) маємо $n_n = 13,5$. Якщо починати полив з бака(ів) після вичерпування утриманої води, зберігати воду в баку прийдеться $n + n_n = 24,8$ дні. Останні 3,5 дні до субстрату потраплятиме вода неналежної якості.

Можна спробувати стратегію поповнення запасів утриманої води шляхом більш інтенсивного поливання, ніж потрібно. При цьому вода знову проходить субстрат і корені рослин, що має очистити її від мікроорганізмів і утворених хімічних забруднювачів. Можливість такої біоремедіації води з продовженням строку зберігання вимагає додаткового експериментального підтвердження.

З іншого боку, бак(и) буде розташовано нижче рівня покрівлі, що вимагатиме застосування насосів для підняття її на полив. Іншою стратегією є використання води для туалетів на нижчих поверхах, що дозволяє скористатися гідростатичним тиском для самоплину. За [27] середня за годину потреба у воді на один унітаз і пісуар громадських туалетів становить, відповідно, 90 і 20 $\text{дм}^3/\text{год}$. При восьмигодинному робочому дні добова потреба становитиме, відповідно, 720 і 160 $\text{дм}^3/\text{год}$. Таким чином, два унітази спорожнять бак(и) за $22032 / (2 \cdot 720) = 15,3$ доби, що відповідає оптимальному режиму експлуатації. Використання баків для більшої кількості санітарних приладів залишається виправданим задля спрощення системи водопостачання відповідних туалетів. Адже спорожнення бака(ів) швидше ніж за 14 діб не погіршує якість води.

Оскільки зміни клімату можуть збільшити кількість опадів, то бак(и) рекомендується проектувати з запасом. На сьогодні методики визначення запасу відсутні, а прогнози залишаються недостатньо обґрунтованими. Тому пропонується приймати запаси з урахуванням можливостей замовника та будівельних конструкцій. У такому разі збільшення кількості санітарних приладів, що обслуговуються, стає виправданим задля підвищення стійкості об'єктів до кліматичних змін.

Висновки

Зелені покрівлі є перспективним напрямком підвищення водної стійкості міст у рамках концепції «міста-губки». Забудова територій погіршує їхній водний режим через порушення водного балансу. Перехід до міста-губки дозволяє максимально відновити цей баланс. На прикладі «зеленої» покрівлі на даху торговельно-ділового комплексу «Перехрестя» в м. Дніпро показано, що зелені зони здатні накопичувати весь об'єм опадів без скидання. Пішохідні зони збирають суттєвий об'єм води, який доцільно збирати в баку(ах) для

подальшого використання на полив або туалети. Подальші дослідження буде спрямовано на врахування прогнозованих кліматичних змін при проєктуванні системи утилізації води від опадів.

Подяки

Дана робота є частиною прикладного дослідження з держбюджетним фінансуванням «Створення перспективних технологій формування безпечного середовища будівель поєднанням "зелених конструкцій", фітодизайну та інженерних систем», номер держреєстрації 0122U001197.

Публікацію підготовлено в рамках проєкту «Багаторівнева місцева, національна та загальнодержавна освіта та навчання в галузі кліматичних послуг, адаптації та пом'якшення наслідків зміни клімату 619285-EPP-1-2020-1-FI-EPPKA2-SVHE-JP». Підтримка Європейською комісією випуску цієї публікації не означає схвалення вмісту, який відображає лише думки авторів, і Комісія не може нести відповідальність за будь-яке використання інформації, що міститься в ній.



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



REFERENCES

1. Zhu, M. Q. (2012). Green construction concept in assessment system for Green Building. *Advanced Materials Research*, 507, 142–146. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.507.142>
2. Digital Cement. (2011, May 10). *Exbrief Cement MAY2011*. WBCSD Cement. Executive Brief / March 2011. Retrieved March 26, 2023, from https://www.dcement.com/UploadFiles/CSI_UploadFiles_7000/201108/2011083111385307.pdf
3. Maglad, A. M., Houda, M., Alrowais, R., Khan, A. M., Jameel, M., Rehman, S. K., Khan, H., Javed, M. F., & Rehman, M. F. (2023). BIM-based energy analysis and optimization using insight 360 (case study). *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01755. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01755>
4. Wu, Z. (2023). Performance Analysis of New Energy-saving and environment-friendly materials for building decoration based on the whole life cycle. *Journal of Experimental Nanoscience*, 18(1), 2170358. <https://doi.org/10.1080/17458080.2023.2170358>
5. Oloruntobi, O., Mokhtar, K., Mohd Rozar, N., Gohari, A., Asif, S., & Chuah, L. F. (2023). Effective technologies and practices for reducing pollution in warehouses - A Review. *Cleaner Engineering and Technology*, 13, 100622. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100622>
6. Voznyak, O., Savchenko, O., Spodyniuk, N., Sukholova, I., Kasynets, M., & Dovbush, O. (2022). Improving of ventilation efficiency at air distribution by the Swirled Air Jets. *Pollack Periodica*, 17(1), 123–127. <https://doi.org/10.1556/606.2021.00419>
7. Zhelykh, V., Voznyak, O., Yurkevych, Y., Sukholova, I., & Dovbush, O. (2021). Enhancing of energetic and economic efficiency of air distribution by swirled-compact air jets. *Production Engineering Archives*, 27(3), 171–175. <https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.22>
8. Fan, H., Zhang, N., & Su, H. (2023). The effects of smart city construction on Urban Green Total Factor Productivity: Evidence from China. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 36(1), 2181840. <https://doi.org/10.1080/1331677x.2023.2181840>
9. Tkachenko, T., & Mileikovskiy, V. (2020). Methodology of thermal resistance and cooling effect testing of green roofs. *Songklanakarın Journal of Science and Technology*, 42(1), 50–56. <https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2020.8>

10. Krivenko, O., Mileikovskiy, V., & Tkachenko, T. (2018). The principles of energy efficient microclimate provision in the skyscraper “biotecton” of 1 km height. *European Journal of Engineering and Formal Sciences*, 2(3), 66–75. <https://doi.org/10.26417/ejef.v2i3.p66-75>
11. Tkachenko, T., & Mileikovskiy, V. (2019). Solution of sick building syndrome problem using indoor plants. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(2019)(3), 405–411. https://procedia-esem.eu/pdf/issues/2019/no3/48_Tkachenko_19.pdf
12. Tkachenko, T., & Mileikovskiy, V. (2018). Geometric basis of the use of “Green constructions” for Sun Protection of glazing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 809, 1096–1107. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95588-9_94
13. Tkachenko, T., Mileikovskiy, V., & Ujma, A. (2019). Field study of air quality improvement by a “Green roof” in Kyiv. *System Safety: Human - Technical Facility - Environment*, 1(1), 419–424. <https://doi.org/10.2478/czoto-2019-0054>
14. Voloshkina, O., Tkachenko, T., Sipakov, R., & Tkachenko, O. (2019). The estimation and reduction of risks caused by air pollution in cities. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 8(2/2019), 17–25. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2019.2.02>
15. Tkachenko, T. (2018). Energy efficiency of “green structures” in cooling period. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 453–457. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14570>
16. Zhou J., Pang Y., Fu G., Wang H., Zhang Y., & Memon F. A. (2018). A review of urban rainwater harvesting in China. *Journal Of Water Reuse And Desalination*, 13(1), 041. <https://doi.org/10.2166/wrd.2023.041>
17. Chen, J., Li, Y., & Zhang, C. (2023). The effect of design rainfall patterns on urban flooding based on the Chicago method. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4245. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054245>
18. Environmental Protection Agency. (2023, February 7). *Green and Gray Infrastructure Research*. EPA. <https://www.epa.gov/water-research/green-and-gray-infrastructure-research>
19. Interfax-Ukraine. (2019, November 7). *Velyki mista ta ikhni zhyteli naibilsh urazlyvi pered ekolohichnymi katastrofamy – ekspert*. Interfax-Ukraine. <https://interfax.com.ua/news/general/623225.html> [in Ukrainian].
20. Wang, M., Yuan, H., Zhang, D., Qi, J., Rao, Q., Li, J., & Keat Tan, S. (2023). Supply-demand measurement and spatial allocation of sponge facilities for Sponge City Construction. *Ecological Indicators*, 148, 110141. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110141>
21. Public Law 115–436, *Water Infrastructure Improvement Act* (2019). Washington. <https://www.congress.gov/115/plaws/publ436/PLAW-115publ436.pdf>
22. Hlushchenko, R., Tkachenko, T., Mileikovskiy, V., Kravets, V., & Tkachenko, O. (2022). “Green structures” for effective rainwater management on roads. *Production Engineering Archives*, 28(4), 295–299. <https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.37>
23. Tkachenko, T.M. & Prokopenko, I.O. (2020). Calculation of maintenance of surface drainage roofing of a German manufacturer. *Environmental Safety and Natural Resources*, 35(3), 44–56. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.44-56> [in Ukrainian].
24. Southwest Michigan Planning Commission. (2009). *Planning and Zoning for Water Quality Protection in the Black River Watershed*. Benton Harbor, Michigan; Southwest Michigan Planning Commission. Retrieved May 20, 2023, from https://www.swmpc.org/downloads/report_planning_and_zoning_1.pdf
25. Department of Ecology and Natural Resources of Dnipropetrovsk Regional Military Administration. (2022). *Regional report on the state of the natural environment in the Dnipropetrovsk region for 2021*. Dnipro; Department of Ecology and Natural Resources of Dnipropetrovsk Regional Military Administration. <https://adm.dp.gov.ua/storage/app/media/Pro%20oblast/Ekolojiia/Rehionalna%20dopovid%20ta%20Ekolohichniyi%20pa sport/Rehionalna%20dopovid%20pro%20stan%20navkolyshnoho%20pryrodoho%20sere dovyscha%20v%20Dnpr.obl./REHIONALNA%20DOPOVID%20pro%20stan%20navkolyshnoho%20pryrodoho%20sere dovyscha%20u%202021%20rotsi.pdf> [in Ukrainian].

26. Stuckmann, M. P. (n.d.). *Perennial Garden Chart*. *Perennial Garden Chart | ZinCo Green Roof Systems USA*. <https://zinco-usa.com/node/574>
27. Bovkun, Zh., Kashlikov, M., Pavlyk, L., & Kasimova, N. (2013). *Vnutrishnii vodoprovod ta kanalizatsiia*. *DBN V.2.5-64:2012*. Kyiv. Minrehion.

Стаття надійшла до редакції 22.05.2023 і прийнята до друку після рецензування 24.08.2023

The article was received 22.05.2023 and was accepted after revision 24.08.2023

Глущенко Роман Олександрович

аспірант, Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: Повітрофлотський проспект, 31, м. Київ, 03037, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2863-1480> **e-mail:** gr2017inc@gmail.com

Ткаченко Тетяна Миколаївна

докт. техн. наук, професорка, завідувачка кафедри, Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: Повітрофлотський проспект, 31, м. Київ, 03037, Україна,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

UDC 658.382

Oleg Deryugin¹, Candidate of Technical Science, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2456-7664> **e-mail:** deryugin_o@ukr.net

Tetiana Nehrii², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4239-3178> **e-mail:** tetiana.nehrii@gmail.com

Oleksandr Borovytskyi¹, Graduate student
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-7960> **e-mail:** borovytskyi.o.m@nmu.one

Olena Stolbchenko¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-4382> **e-mail:** elena_aot@ukr.net

Mykhailo Arkhirei¹, Graduate student
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6803-0703> **e-mail:** arkhirei@meta.ua

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

EVALUATION OF THE OCCUPATIONAL RISK INDEX OF THE FOREST FALLER

Abstract. *The purpose of the work is to assess the professional risk index of a forest feller, taking into account: ergonomic, psychosocial and hygienic factors and individual parameters, with the development of practical recommendations for reducing diseases of the musculoskeletal system, taking into account the adaptive capabilities of a person.*

To estimate the occupational risk index, methods were used to determine the danger from the working posture, the influence of psychosocial factors, and individual indicators. The assessment of the index of occupational risk of injury/disease of the musculoskeletal system was determined on a scale from 0 to 1. To determine the adaptation capabilities of forest loggers to resist physical exertion, we used the method proposed by R.M. Baevsky.

A procedure has been developed for the assessment of the occupational risk index during the performance of various logging operations of a forest logger based on the assessment of ergonomic posture, the influence of psychosocial, hygienic factors, and individual parameters. It was determined that the work related to the technological process of harvesting wood and cleaning trees from branches and knots has the highest degree of risk. It is shown that the greatest influence on the value of the occupational risk index is caused by an uncomfortable ergonomic posture and a psychosocial factor, while when whipping whips and their loading – psychosocial and hygienic factors. It has been established that the greatest influence on the adaptive capabilities of a forest feller has an uncomfortable working posture and a psychosocial factor.

The relationship between adaptation possibilities and the discomfort of the working posture, psychosocial and hygienic factors has been established.

It is shown that for the felling of trees and sawed off branches, it is necessary to provide workers with high adaptability, while it is desirable to involve workers with low adaptability in the trawling of whips and their load.

Keywords: *risk; forest faller; ergonomic risk; uncomfortable posture; psychosocial factor.*

О.В. Дерюгін¹, Т.О. Негрій², О.М. Боровицький¹, О.В. Столбченко¹, М.М. Архірей¹

¹Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна

²Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ОЦІНКА ІНДЕКСУ ПРОФЕСІЙНОГО РИЗИКУ ВАЛЬНИКА ЛІСУ

Анотація. *Мета роботи – оцінка індексу професійного ризику вальника лісу з врахуванням ергономічного, психосоціального і гігієнічного чинників та індивідуальних параметрів з розробкою практичних рекомендацій для зменшення захворювань опорно-рухового апарату з урахуванням адаптаційних можливостей людини.*

Для оцінки індексу професійного ризику скористались методами для визначення небезпеки від робочої пози, впливу психосоціального фактору та індивідуальних показників. Оцінку індексу професійного ризику травмування/захворювання опорно-рухового апарату визначали за шкалою від 0 до 1. Для визначення адаптаційних можливостей вальників лісу щодо супротиву фізичним навантаженням скористались методом, запропонованим Р.М. Баєвським.

Розроблено процедуру для оцінки індексу професійного ризику при виконанні різних лісозаготівельних робіт вальника лісу на основі оцінювання ергономічної пози, впливу психосоціального і гігієнічного чинників та індивідуальних параметрів. Визначено, що роботи, які пов'язані з технологічним процесом здобутку деревини та очищення дерев від гілок та сучків, мають найбільший ступінь ризику. Показано, що на величину індексу професійного ризику найбільш впливають незручна ергономічна поза та психосоціальний чинник, тоді як при трелюванні хлестів та їх навантаженні – психосоціальний та гігієнічний чинники. Встановлено, що найбільший вплив на адаптаційні можливості вальника лісу має незручна робоча поза та психосоціальний чинник.

Встановлено взаємозв'язок між адаптаційними можливостями і незручністю робочої пози, психосоціальним і гігієнічним чинниками.

Показано, що для звалювання дерев і обпилювання гілок необхідно залучати працівників з високими адаптаційними можливостями, тоді як працівників з низькими адаптаційними можливостями бажано долучати до трелювання хлестів та їх навантаження.

Ключові слова: *ризик; вальник лісу; ергономічний ризик; незручна поза; психосоціальний чинник.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.59-74>

Вступ

Професія вальника лісу характеризується найбільшою травмонебезпечністю в технологічному процесі здобутку деревини [1, 2]. Це пов'язано, перш за все, незручними виробничими позами та значною кількістю моторно-ручної праці,

використанням в технологічному процесі здобутку деревини важких бензопил. Крім того, робота проводиться в природних умовах – у віддалених районах на пересічній (часто крутій) місцевості, що вимагає постійної зосередженості і концентрації уваги. Вплив згаданих небезпечних чинників призводить до найрозповсюдженішого професійного захворювання вальників деревини – порушення опорно-рухового апарату. Звісно, це вимагає запровадження нових технологічних рішень для ручної рубки лісу, які базуються на розумінні механізмів формування відповідних виробничих поз з «нейтральним» положенням хребта [3, 4]. Звідси висвітлення найбільш травмонебезпечних рухів при виконанні виробничих операцій з подальшим їх аналізом та розробкою відповідних рекомендацій щодо зменшення рівня професійного ризику травмування являється актуальною задачею.

Огляд літературних джерел

Аналіз літературних джерел показав значну зацікавленість фахівців з безпеки праці проблемою зменшення травматизму у робітників лісової галузі як в нашій країні, так і за кордоном. Так, у більшості вітчизняних публікацій вказується, що основними причинами травмування є невиконання працівниками вимог інструкцій з охорони праці; несвочасне та неякісне проведення інструктажів з охорони праці; недотримання вимог безпеки при звалюванні дерев, лісосічних роботах (звалювання дерев, обрізування гілок, трелювання та навантаження деревини) [5, 6]. При цьому для зниження травматизму рекомендується забезпечувати ефективну роботу служб охорони праці усіх рівнів, посилити контроль за наявністю дозвільних документів у суб'єктів господарювання, які виконують роботи підвищеної небезпеки, а також запровадити поетапну механізацію (автоматизацію) всього комплексу лісозаготівельних робіт, при цьому використовуючи кращий світовий досвід [7].

Найбільший інтерес для зменшення травматизму представляє застосування кращого світового досвіду. На цьому наголошують автори дослідження [8, 9], де вказується на необхідність аналізу технологічних карт робіт, до яких включають усі аспекти виробничих операцій, у тому числі з охорони праці на основі передових безпечних практик. В той же час до поширених практик відносять формування відповідної робочої пози, яка забезпечить мінімальний ризик травмування [10]. Так, у дослідженні [11] авторами було встановлено, що робоча поза під час валки дерев бензопилою з нахиленим вперед тілом у положенні стоячи більше впливає на роботу серця, ніж положення навпочіпки або на колінах. В іншому дослідженні йдеться про напруження м'язів [12]. Зокрема сказано, що при згинанні тулубу активність м'язів лівого передпліччя значно збільшується у порівнянні з правим. Тоді як у положенні на колінах такої асиметрії у навантаженні не відзначалось. Поширеною рекомендацією для зменшення фізичного навантаження під час рубки лісу є застосування спеціальних механізованих комплексів [13]. Однак їх застосування хоча і зменшує фізичне навантаження, але збільшує рівень напруженості праці через розумове перевантаження, необхідність забезпечення відповідного контролю за станом механізованих систем та інше [14]. Результат аналізу літературних джерел показав, що проблема підвищення безпеки при лісозаготівельних роботах сьогодні є актуальною. Для її вирішення застосовують здебільшого два шляхи [15]. Перший – відпрацювання безпечних технологічних операцій

із реалізацією відповідного навчання, застосуванням безпечного і комфортного ручного інструменту, застосування онлайн діагностики за ризиковими позами вальників лісу [16]. Другий передбачає автоматизацію і механізацію робіт із застосуванням дистанційних технологій та безлюдною лісозаготівлею. Однак і в першому і в другому випадку існують питання оцінки ергономічного ризику [17] з визначення безпечної робочої пози або з оцінки напруження та інтенсивності праці при керуванні роботизованими комплексами.

Аналіз літературних джерел підтвердив актуальність обраної теми дослідження стосовно оцінки ергономічних ризиків, яка дозволить як обґрунтувати запобіжні заходи, так і змінити технологію рубки деревини, щоб уникнути травм опорно-рухового апарату.

Мета роботи

Оцінка індексу професійного ризику вальника лісу, з врахуванням ергономічного, психосоціального та гігієнічного чинників та індивідуальних параметрів з розробкою практичних рекомендацій для зменшення захворювань опорно-рухового апарату з урахуванням адаптаційних можливостей людини.

Методи дослідження

Для оцінки індексу професійного ризику скористаємось підходами для визначення:

– ергономічного ризику – методом "Rapid Entire Body Assessment worksheet" (REBA) [18, 19], який представляє собою чек-лист з оцінкою незручності розташування тулубу, шиї та ніг працівника, дослідженням несприятливого розташування плечей, ліктів та зап'ястя;

– психосоціальних ризиків – на основі опитувальників "The Copenhagen Psychosocial Questionnaire" (COPSOQ; COPSOQ II) [20, 21], з яких були вибрані найбільш впливові чинники на роботу вальника лісу, що характеризують рівень складності, технологію і наявну організаційну культуру;

– індивідуального здоров'я людини – на основі розрахунку біологічного віку [22, 23] за чотирма показниками: артеріальним тиском, масою тіла, затримкою дихання, частотою серцевих скорочень.

В результаті поєднання даних підходів був отриманий спеціальний чек-лист (рис. 1) для визначення індексу професійного ризику як суми балів, розрахованої за кожною складовою. Причому індекс професійного ризику визначається за формулою:

$$R_{EP} = 1 - \prod_{i=1}^n \frac{S_{\max} - S_{EPi}}{S_{\max}}, \quad (1)$$

де S_{EPi} – сума балів за ергономічною, психосоціальною, гігієнічною та індивідуальною складовими індексу професійного ризику; S_{\max} – максимальна сума балів, яка визначена за одним із критеріїв індексу професійного ризику.

Кожна складова індексу професійного ризику складається з декількох небезпечних чинників, які характеризують напрямки руху суглобів, величину зусиль, навантаження, стан психосоціальної активності, дискомфорт, індивідуальний рівень здоров'я, які оцінювались за шкалою від 1 до 3 (1 – мінімальний вплив; 3 – максимальний вплив на працездатність чи виконання виробничих завдань). Критерії індексу професійного ризику визначались у відповідності до вимог ДСТУ 2293:2014 "Охорона праці. Терміни та визначення основних понять": неприйнятний – до 0,35 бала; прийнятний з перевіркою – 0,35–0,75 бала; прийнятний – більше 0,75 бала. Для визначення критеріїв було проаналізовано низку наукових робіт з побудови шкал для обґрунтування рівнів професійного ризику [24, 25]. Так, ISO 73:2018 "Керування ризиком. Словник термінів" визначає, що ймовірність – це міра можливості виникнення, яка подається числом між 0 та 1, де 0 – неможливість, а 1 – абсолютна впевненість.



Рис. 1. Загальний вигляд чек-листа визначення професійного ризику

Для визначення ймовірності виникання захворювань опорно-рухового апарату використали методіку з оцінки адаптаційних можливостей системи кровообігу, що дозволяє оцінити здатність працівника витримувати невідповідність робочих поз, вплив психосоціальних і санітарно-гігієнічних небезпечних чинників [26]:

$$AM = 0,011 ЧСС + 0,014 АТС + 0,008 АТД + 0,014 В + 0,009 М - 1,57, \quad (2)$$

де AM – адаптаційні можливості; $ЧСС$ – частота серцевих скорочень; $АТС$ – артеріальний тиск систолічний (мм рт. ст.); $АТД$ – артеріальний тиск діастолічний (мм рт. ст.); $В$ – вік; $М$ – маса тіла, кг.

Рівень адаптаційних можливостей визначається за табл. 1 [26].

Таблиця 1. Рівень адаптаційних можливостей

Оцінка адаптаційних можливостей АП	Значення
Задовільна адаптація	$\leq 2,10$
Напруження механізмів адаптації	2,11–3,20
Незадовільна адаптація	3,21–4,30
Зрив адаптації	$\geq 4,31$

Для визначення маси тіла застосовували ваги. Артеріальний тиск та число серцевих скорочень оцінювали за допомогою проведення медогляду працівників, які брали участь в дослідженні. Отримані результати заносили у формуляри контролю існуючого стану здоров'я.

Для проведення дослідження комплексного професійного ризику було взято декілька основних виробничих операцій технологічного процесу здобутку деревини: звалювання дерев, очищення дерев від гілок та сучків, трелювання хлестів, навантажування хлестів (рис. 2).



Рис. 2. Основні виробничі операції технологічного процесу здобутку деревини: звалювання дерев (а), очищення дерев від гілок та сучків (б), трелювання хлестів (в), навантажування хлестів (г)

Для встановлення впливу робочої пози на індивідуальні показники працівників та величину втрати працездатності в дослідженні брали участь 10 вальників лісу, основні фізичні характеристики яких наведені в таблиці 2. Всі учасники експерименту добровільно погодились брати участь, не мали

відповідних вад фізичного і психічного здоров'я. Попередньо проходили визначення основних показників серцево-судинної системи. Однією з основних умов було знеособлення отриманих даних стосовно індивідуальних даних рівня здоров'я.

Таблиця 2. Характеристики учасників експерименту

Учасник	Вік, роки	Стаж, роки	Маса тіла, кг	Артеріальний тиск, мм рт.ст.	Частота серцевих скорочень за 1 хв. (уд./хв.)	Затримка дихання, с
1	26	2	78	120/80	75	45
2	32	3	76	120/80	84	55
3	35	5	82	125/90	82	35
4	40	10	85	130/90	74	44
5	43	8	84	135/90	88	38
6	46	12	93	120/80	79	48
7	48	10	94	130/90	86	32
8	50	12	89	130/90	91	34
9	51	13	96	125/90	86	46
10	53	15	91	130/90	87	35

Результати дослідження

На першому етапі дослідження проводили оцінку індексу професійного ризику виконання робіт вальниками лісу (рис. 3), а результати розрахунку осередненого комплексного професійного ризику при різних виробничих операціях технологічного процесу здобутку деревини наведені в таблиці 3.

Таблиця 3. Результати оцінки індексу професійного ризику вальника деревини при різних виробничих операціях технологічного процесу здобутку деревини

Виробнича операція	Оцінка складових індексу, бали			Величина індексу професійного ризику	Оцінка ризику
	ергономічна	психологічна та гігієнічна	індивідуальні параметри		
Звалювання дерев	19±0,5	16±0,3	9±0,6	0,31	Неприйнятний
Очищення дерев від гілок та сучків	19±0,5	16±0,9	10±0,7	0,36	Неприйнятний
Трелювання хлестів	12±0,6	13±0,7	10±0,5	0,5	Прийнятний з перевіркою
Навантажування хлестів	12±0,8	15±0,7	10±0,7	0,6	Прийнятний з перевіркою

Оцінка комплексного індексу професійного ризику вальника лісу

1. Ергономічний чинник

Аналіз положення шиї



Оцінка **2**

Корисувачем:

- Якщо навантаження до 5 кг - +1;
- Якщо навантаження від 5 кг до 10 кг - +2;
- Якщо навантаження більше 10 кг - +3;

Аналіз положення тулуба



Оцінка **2**

Корисувачем:

- Якщо тулуб нахилена у бік - +1

Аналіз положення ніг



Оцінка **1**

Зусилля навантаження

- Якщо навантаження до 5 кг - +1;
- Якщо навантаження від 5 кг до 10 кг - +2;
- Якщо навантаження більше 10 кг - +3;

Корисувачем:

- Якщо виконання роботи: +1

Аналіз положення плеча



Оцінка **3**

Корисувачем:

- Якщо плече відхилено назад - +1

Аналіз положення передпліччя



Оцінка **3**

Аналіз положення зап'ястя



Оцінка **3**

Корисувачем:

- Якщо зап'ястя закручено або сильно закруте: +1

Оцінка поверхні захвату інструменту:

- Гладка поверхня рукоятки інструменту: +0;
- Пригнута поверхня рукоятки інструменту: +1;
- Церрировані поверхні рукоятки інструменту: +2;
- Р-зубчаті відростки: +3;

Оцінка **2**

Підсумкова оцінка

Оцінка **19**



2. Психосоціальний чинник

Бали для оцінки:
 мінімальний вплив - 1 бал
 середній вплив - 2 бали
 мінімальний вплив - 3 бали

1. Напруженість праці **2**
 2. Важкість праці **2**
 3. Емоційна напруга **2**
 4. Темп роботи **3**
 5. Незадоволеність працею **2**
 6. Кліматичний дискомфорт **2**
 7. Акустичний дискомфорт **1**
 8. Вібраційний дискомфорт **1**
 9. Естетичний дискомфорт **2**
 10. Сенсорний дискомфорт **1**
- Підсумкова оцінка (сума) **17**

3. Індивідуальний чинник

Оцінка

1. Вік:
 < 46: +1
 46-55: +2
 > 55: +3

2. Індекс маси тіла:
 IMT < 25: +1
 IMT 25-29,9: +2
 IMT > 30: +3

3. Артеріальний тиск:
 120/80: +1
 130/90: +2
 140/100: +3

4. Частота серцевих скорочень:
 < 75: +1
 75-85: +2
 > 85: +3

5. Затримка дихання:
 > 40 сек.: +1
 30-40 сек.: +2
 < 30 сек.: +3

Підсумкова оцінка **10**

Індекс професійного ризику

$$19 + 17 + 10 = 46$$

від 0 до 23 балів - ризик прийнятний

від 24 до 46 балів - ризик прийнятний з перевіркою

від 47 до 69 балів - ризик не прийнятний

Рис. 3. Приклад з визначення професійного ризику вальника лісу

Результати оцінки адаптаційних можливостей працівників наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Оцінка адаптаційних можливостей працівників після робочої зміни

Учасник	ЧСС	АТС	АТД	АМ
1	78	124	85	2,7
2	88	125	90	2,9
3	90	130	90	3,1
4	86	135	98	3,3
5	96	140	95	3,5
6	85	126	90	3,3
7	92	136	95	3,6
8	96	135	94	3,6
9	93	133	96	3,6
10	96	140	96	3,7

Цікавим також є визначення впливу виробничої операції на зміну адаптаційних можливостей працівників. Для цього було розділено працівників за групами, результати оцінювання наведені в таблиці 5.

Таблиця 5. Результати оцінки адаптаційних можливостей працівників за технологічними операціями

Показники АМ за віком	Виробнича операція			
	Звалювання дерев	Очищення дерев від гілок та сучків	Трелювання хлестів	Навантажування хлестів
< 35 років	2,81	2,83	2,52	2,63
35–45 років	3,38	3,45	3,02	3,1
> 45 років	3,61	3,68	3,22	3,41

У таблиці 6 наведено результати оцінювання зміни ергономічної складової індексу професійного ризику вальника деревини при застосуванні різних виробничих поз технологічного процесу при спилюванні дерев.

Таблиця 6. Величина ергономічної складової вальника деревини при різних виробничих позах при спилюванні дерева

Вид робочої пози при звалюванні дерева			
	Нахилена	Навпочіпки	На колінах
Величина ергономічної складової у балах	19	16	13

Обговорення результатів дослідження

Аналіз даних таблиці 3 дозволяє встановити величину індексу професійного ризику при виконанні різних лісозаготівельних робіт працівниками на основі комплексного оцінювання впливу різних чинників виробничого процесу: пози, психосоціального фактору, гігієнічного та індивідуального параметра.

Можна зробити висновок, що роботи при звалюванні дерев та очищенні від гілок та сучків мають найбільший ступінь індексу професійного ризику через незручну робочу позу та психосоціальний фактор. Зважаючи, що для визначення психосоціального фактору застосовувалась суб'єктивна думка учасників експерименту через суб'єктивне визначення інтенсивності та важкості праці, було запропоновано провести перевірку енергетичних витрат лісорубів при виконанні даних видів робіт за допомогою оцінки зміни частоти серцевих скорочень та артеріального тиску.

Дані результатів дослідження зазначених показників після закінчення роботи, які наведено в таблиці 4, у результаті порівняння зі встановленими показниками до початку роботи дозволяють стверджувати, що лісозаготівельні роботи відносяться до важких. Даний висновок був зроблений згідно з рекомендаціями щодо оцінки зниження працездатності людини на основі дослідження змін серцево-судинної системи [27]. Крім того, існують декілька наукових робіт, в яких звалювання дерев і опилування гілок визначають як важкі роботи із затратами енергії понад 290 Вт [28, 29].

Наступним важливим висновком даного дослідження є оцінка найбільшого впливу на величину індексу професійного ризику при виконанні лісозаготівельних робіт. Так, результати показують (табл. 5), що на звалювання дерев та обпилування гілок найбільше впливають незручна ергономічна поза та психосоціальний чинник, тоді як при трелюванні хлестів та їх навантажуванні – психосоціальний чинник. Звідси виникає необхідність перегляду технології звалювання дерев, визначення робочих поз з мінімальним ергономічним ризиком. При цьому проведений аналіз дозволяє зробити висновки, що робоча поза на колінах для звалювання дерев має менший ергономічний ризик, ніж нахилена (табл. 6). Схожий висновок був отриманий і у роботі [10].

При дослідженні адаптаційних можливостей вальників лісу також визначено, що незручна робоча поза та психосоціальний фактор мають найбільший вплив. Однак, при цьому у робіт з трелювання хлестів та їх навантаження найбільше впливають психосоціальний фактор та фактор дискомфорту. Це пояснюється тим, що роботи виконуються сидячи, а також найбільший вплив відіграє не важкість праці, а інтенсивність через необхідність контролю за приладами. Крім того, на фактор дискомфорту впливає значна кількість операцій, які повторюються, і робота на відкритому просторі. В результаті проведених оцінок можна зробити висновки, що найкращі адаптаційні можливості, навіть при незручній робочій позі та психосоціальних факторах, мають молоді працівники, що дозволяє їм працювати при звалюванні дерев і обпилуванні гілок, тоді як старших працівників бажано застосовувати для навантаження.

Висновки

1. Запропоновано новий підхід для визначення індексу професійного ризику, який включає вплив ергономічного, психосоціального та гігієнічного чинників та індивідуальних параметрів працівників.

2. Проведено оцінку індексу професійного ризику вальників лісу при виконанні різних лісозаготівельних робіт на основі оцінювання ергономічної пози, впливу психосоціального чинника та індивідуальних параметрів.

3. Визначено, що роботи зі звалювання дерев та очищення дерев від гілок та сучків мають найбільший ступінь індексу професійного ризику.

4. Показано, що найбільший вплив на величину індексу професійного ризику при звалюванні дерев та обпилюванні гілок чинить незручна ергономічна поза та психосоціальний чинник, тоді як при трелюванні хлестів та їх навантажуванні – психосоціальний чинник.

5. Встановлено, що найбільше на адаптаційні можливості вальників лісу впливає незручна робоча поза та індивідуальні параметри.

6. Встановлено взаємозв'язок між адаптаційними можливостями і незручністю робочої пози та психосоціальним чинником.

7. Показано, що для звалювання дерев і обпилювання гілок необхідно залучати працівників з високими адаптаційними можливостями, тоді як працівників з низькими адаптаційними можливостями бажано долучати до трелювання хлестів та їх навантаження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Березовський, А.П., Трус, О.М., Прокопенко, Е.В. (2021). Стан виробничого травматизму за галузями економіки підприємств України. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 4(129), 90-97. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.4.90-97>
2. Jankovský, M., Allman, M., & Allmanová, Z. (2019). What Are the Occupational Risks in Forestry? Results of a Long-Term Study in Slovakia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24), 4931. <https://doi.org/10.3390/ijerph16244931>
3. Landekić, M., Martinić, I., Mijoć, D., Bakarić, M., & Šporčić, M. (2021). Injury Patterns among Forestry Workers in Croatia. *Forests*, 12, 1356. <https://doi.org/10.3390/f12101356>
4. Garland, J., Cedergren, J., Eliasson, L., van Hensbergen, H., McEwan, A., & Wästerlund, D. Occupational Safety and Health in Forest Harvesting and Silviculture – *A Compendium for Practitioners and Instructors; Forestry Working Paper No. 14*; FAO: Rome, Italy, 2020. Retrieved from: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca8773en>
5. Гогіташвілі, Г.Г., Степанишин, В.М., Тисовський, Л.О. (2011). Аналіз статистичних даних щодо причин та наслідків виробничого травматизму працівників Держкомлісгоспу України (2000-2009 рр.). *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології*, 707, 42-45. Режим доступу: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/b571603e-0ea7-455f-92fb-7d73ab8e91b3/content>
6. Kruzhilko, O., Maystrenko, V., Polukarov, O., Kalinchyk, V.P., Shulha, A., Vasyliiev, A., & Kondratov, D. (2020). Improvement of the approach to hazard identification and industrial risk management, taking into account the requirements of current legal and regulatory acts. *Archives of Materials Science and Engineering*, 105(2). 65-79. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5763>

7. Radionov, M., & Gora, R. (2021). Analysis of the safety and health status at the work of workers of the forest industry of Ukraine and measures for its improvement. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 37(4), 50-56. [In Ukrainian] <https://doi.org/10.36804/nndipbop.37-4.2021.50-56>
8. Цимбал, Б.М., Ткаченко, О.О. Запобігання професійним ризикам у лісовому господарстві України. "Молодь і технічний прогрес в АПВ". *Інноваційні розробки в аграрній сфері: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Том 2. Харків: ХНТУСГ, 2020. 281-284. Режим доступу: <http://29ujmo6.257.cz/bitstream/123456789/12854/1/%D0%A2%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%9E.%D0%9E..pdf>
9. Макаренко, О.М. (2015). Аналіз стану виробничого травматизму в лісовому господарстві Рівненської області. *Студентський Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*, 3(5), 77-79. Режим доступу: <https://ep3.nuwm.edu.ua/4239>
10. Tsioras, P.A., Khooshdohbat, M., Nikooy, M., Naghdi, R., & Heidari, M. (2022). The Impact of Body Posture on Heart Rate Strain during Tree Felling. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 11198. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811198>
11. Grzywiński, W., Jelonek, T., Tomczak, A., Jakubowski, M., & Bembenek, M. (2017). Does body posture during tree felling influence the physiological load of a chainsaw operator?. *Annals of agricultural and environmental medicine: AAEM*, 24(3), 401-405. <https://doi.org/10.5604/12321966.1235177>
12. Dvořák, J., Natov, P., Natovová, L., Krilek, J., & Kováč, J. (2016). Operator's physical workload in simulated logging and timber bucking by harvester. *CAAS Agricultural Journals*, 62(5), 236-244. <https://doi.org/10.17221/21/2016-JFS>
13. Bont, L.G., Fraefel, M., Frutig, F., Holm, S., Ginzler, C., & Fischer, C. (2022). Improving forest management by implementing best suitable timber harvesting methods. *Journal of Environmental Management*, 302(Part B), 114099. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114099>
14. Borz, S.A., Iordache, E., & Marcu, M.V. (2021). Enhancing Working Posture Comparability in Forest Operations by the Use of Similarity Metrics. *Forests*, 12, 926. <https://doi.org/10.3390/f12070926>
15. Lundbäck, M., Häggström, C., Fjeld, D., Lindroos, O., & Nordfjell, T. (2022). The economic potential of semi-automated tele-extraction of roundwood in Sweden. *International Journal of Forest Engineering*, 33(3), 271-288. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1906617>
16. Zurita Vintimilla, M.C., Castro Pérez, S.N., & Borz, S.A. (2021). Processing Small-Sized Trees at Landing by a Double-Grip Machine: A Case Study on Productivity, Cardiovascular Workload and Exposure to Noise. *Forests*, 12, 213. <https://doi.org/10.3390/f12020213>
17. Spinelli, R., Aminti, G., Magagnotti, N., & De Francesco, F. (2018). Postural Risk Assessment of Small-Scale Debarkers for Wooden Post Production. *Forests*, 9, 111. <https://doi.org/10.3390/f9030111>
18. Чеберячко, С.І., Дерюгін, О.В., Третьяк, О.О., Муха, О.А. (2020). Оцінка ергономічних ризиків здоров'ю робітників автосервісу. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*, 2(15), 155-164. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.403>
19. Borodina, N., Cheberiyachko, S., Deryugin O., Tretyak, O., & Bas, I. (2021). Occupational risk assessment of passenger bus drivers. *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*, 11(2), 81-90. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.2.8>
20. Laura Esteve-Matalí, Clara Llorens-Serrano, Jordi Alonso, Gemma Vilagut, Salvador Moncada, Albert Navarro-Giné, Mental health inequalities in times of crisis: evolution between 2005 and 2021 among the Spanish salaried population, *Journal of Epidemiology and Community Health*, 77, 1, (38-43), (2022) <https://doi.org/10.1136/jech-2022-219523>

21. M. Truchon, M. Gilbert-Ouimet, A. Zahirihsarsini, M. Beaulieu, G. Daigle, L. Langlois, Occupational Health and Well-being Questionnaire (OHWQ): an instrument to assess psychosocial risk and protective factors in the workplace, *Public Health*, 210, (48-57), (2022) <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2022.06.008>
22. Орехова О. В. Біологічний вік робітників, що працюють в умовах впливу шкідливих і небезпечних факторів сучасного металургійного виробництва / О. В. Орехова // Український журнал з проблем медицини праці. – 2009. – № 2. – С. 31–35. https://web.archive.org/web/20201105144036id_/https://ujoh.org/upload-files/doc/vydav/09-02/04.pdf
23. Біологічний вік та фізична активність / Г. Коробейніков, С. Адирхаєв, К. Медвидчук [та ін.] // Теорія і практика фізичного виховання і спорту. – 2007. – № 1. – С. 60–63.
24. Baybutt, P. (2018). Guidelines for designing risk matrices. *Process Safety Progress*; 37, 49-55. <https://doi.org/10.1002/prs.11905>
25. Card, A.J., Ward, J.R., & Clarkson, J. (2014). Trust-level risk evaluation and risk control guidance in the NHS east of England. *Risk Analysis*, 34, 1469-1481. <https://doi.org/10.1111/risa.12159>
26. Bondarenko, V., Ryabukha, O., Martyshko, A., Davigora, Yu. (2020). Restoration of physical capacity of employees of the National Police of Ukraine. Educational methodical manual. Kyiv: National Academy of Internal Affairs. Retrieved from: <http://elar.naiu.kiev.ua/handle/123456789/17666>
27. Lysenko, O.M. (2012). The changes of physiological reactivity of cardiorespiratory system to respiratory homeostasis with the use of complex stimulation of special work capacity. *Fiziologichnyi Zhurnal*, 58(5), 70-77 [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/fz58.05.070>
28. Manual for statistics on energy consumption in households – 2013 edition [On line]: Official site / Eurostat. – Retrieved from: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/ks-gq-13-003>
29. Romero-Jordán, D., & del Río, P. (2022). Analysing the drivers of the efficiency of households in electricity consumption. *Energy Policy*, 164, 112828. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112828>

Стаття надійшла до редакції 03.04.2023 і прийнята до друку після рецензування 10.06.2023

REFERENCES

1. Berezovskyi, A., Trus, O., & Prokopenko, E. (2021). The state of occupational traumatism for branches of economy of enterprises of Ukraine. *Scientific Journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University"*, 4(129), 90-97 [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.4.90-97>
2. Jankovský, M., Allman, M., & Allmanová, Z. (2019). What Are the Occupational Risks in Forestry? Results of a Long-Term Study in Slovakia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(24), 4931. <https://doi.org/10.3390/ijerph16244931>
3. Landekić, M., Martinić, I., Mijoć, D., Bakarić, M., & Šporčić, M. (2021). Injury Patterns among Forestry Workers in Croatia. *Forests*, 12, 1356. <https://doi.org/10.3390/f12101356>
4. Garland, J., Cedergren, J., Eliasson, L., van Hensbergen, H., McEwan, A., & Wästerlund, D. (2020). Occupational Safety and Health in Forest Harvesting and Silviculture. *A Compendium for Practitioners and Instructors; Forestry Working Paper No. 14*; FAO: Rome, Italy. Retrieved from: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca8773en>

5. Hogitashvili, H.G., Stepanyshyn, V.M., & Tysovsky, L.O. (2011). Analysis of statistical data on the causes and consequences of industrial injuries of employees of the State Forestry Committee of Ukraine (2000-2009). *The Bulletin of L'viv Polytechnic National University titled "Computer sciences and information technologies"*, 707, 42-45 [In Ukrainian]. Retrieved from: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/b571603e-0ea7-455f-92fb-7d73ab8e91b3/content>
6. Kruzhilko, O., Maystrenko, V., Polukarov, O., Kalinchyk, V.P., Shulha, A., Vasyliiev, A., & Kondratov, D. (2020). Improvement of the approach to hazard identification and industrial risk management, taking into account the requirements of current legal and regulatory acts. *Archives of Materials Science and Engineering*, 105(2). 65-79. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5763>
7. Radionov, M., & Gora, R. (2021). Analysis of the safety and health status at the work of workers of the forest industry of Ukraine and measures for its improvement. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 37(4), 50-56 [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.37-4.2021.50-56>
8. Tsymbal, B.M., Tkachenko, O.O. (2020). Prevention of professional risks in forestry of Ukraine. In *"Youth and technical progress in agricultural production". Innovative developments in the agricultural sphere: materials of the International Scientific and Practical Conference* (Vol. 2, pp. 281-284). Kharkiv: Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko [In Ukrainian]. Retrieved from: <http://29yjm06.257.cz/bitstream/123456789/12854/1/%D0%A2%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%9E.%D0%9E.pdf>
9. Makarenko, O.M. (2015). Analysis of the state of industrial injuries in forestry in the Rivne region. *Student Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management*, 3(5), 77-79 [In Ukrainian]. Retrieved from: <https://ep3.nuwm.edu.ua/4239>
10. Tsioras, P.A., Khooshdohbat, M., Nikooy, M., Naghdi, R., & Heidari, M. (2022). The Impact of Body Posture on Heart Rate Strain during Tree Felling. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 11198. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811198>
11. Grzywiński, W., Jelonek, T., Tomczak, A., Jakubowski, M., & Bembenek, M. (2017). Does body posture during tree felling influence the physiological load of a chainsaw operator?. *Annals of agricultural and environmental medicine: AAEM*, 24(3), 401-405. <https://doi.org/10.5604/12321966.1235177>
12. Dvořák, J., Natov, P., Natovová, L., Krilek, J., & Kováč, J. (2016). Operator's physical workload in simulated logging and timber bucking by harvester. *CAAS Agricultural Journals*, 62(5), 236-244. <https://doi.org/10.17221/21/2016-JFS>
13. Bont, L.G., Fraefel, M., Frutig, F., Holm, S., Ginzler, C., & Fischer, C. (2022). Improving forest management by implementing best suitable timber harvesting methods. *Journal of Environmental Management*, 302(Part B), 114099. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114099>
14. Borz, S.A., Iordache, E., & Marcu, M.V. (2021). Enhancing Working Posture Comparability in Forest Operations by the Use of Similarity Metrics. *Forests*, 12, 926. <https://doi.org/10.3390/f12070926>
15. Lundbäck, M., Häggström, C., Fjeld, D., Lindroos, O., & Nordfjell, T. (2022). The economic potential of semi-automated tele-extraction of roundwood in Sweden. *International Journal of Forest Engineering*, 33(3), 271-288. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1906617>
16. Zurita Vintimilla, M.C., Castro Pérez, S.N., & Borz, S.A. (2021). Processing Small-Sized Trees at Landing by a Double-Grip Machine: A Case Study on Productivity, Cardiovascular Workload and Exposure to Noise. *Forests*, 12, 213. <https://doi.org/10.3390/f12020213>
17. Spinelli, R., Aminti, G., Magagnotti, N., & De Francesco, F. (2018). Postural Risk Assessment of Small-Scale Debarkers for Wooden Post Production. *Forests*, 9, 111. <https://doi.org/10.3390/f9030111>

18. Cheberyachko, S., Deryugin, O., Tretyak, O., & Mukha, O. (2020). Evaluating ergonomic health risks to car service employees. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, 2(15), 155-164 [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.403>
19. Borodina, N., Cheberiyachko, S., Deryugin, O., Tretyak, O., & Bas, I. (2021). Occupational risk assessment of passenger bus drivers. *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*, 11(2), 81-90. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.2.8>
20. Laura Esteve-Matalí, Clara Llorens-Serrano, Jordi Alonso, Gemma Vilagut, Salvador Moncada, Albert Navarro-Giné. (2022). Mental health inequalities in times of crisis: evolution between 2005 and 2021 among the Spanish salaried population. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 77, 1, 38-43. <https://doi.org/10.1136/jech-2022-219523>
21. Truchon, M., Gilbert-Ouimet, M., Zahirihsini, A., Beaulieu, M., Daigle, G., & Langlois, L. (2022). Occupational Health and Well-being Questionnaire (OHWQ): an instrument to assess psychosocial risk and protective factors in the workplace. *Public Health*, 210, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2022.06.008>
22. Orekhova, O.V. (2009). Biological age of workers exposed to harmful factors of a modern metallurgical enterprise. *Ukrainian Journal of Occupational Health*, (2), 31-35 [In Ukrainian]. https://web.archive.org/web/20201105144036id_/https://ujoh.org/upload-files/doc/vydav/09-02/04.pdf
23. Korobeinikov, H., Adyrkhaiev, S., Medvydchuk, K. et al. (2007). Biologichnyi vik ta fizychna aktyvnist. *Teoriia i praktyka fizychnoho vykhovannia i sportu*, 1, 60-63 [In Ukrainian].
24. Baybutt, P. (2018). Guidelines for designing risk matrices. *Process Safety Progress*, 37, 49-55. <https://doi.org/10.1002/prs.11905>
25. Card, A.J., Ward, J.R., & Clarkson, J. (2014). Trust-level risk evaluation and risk control guidance in the NHS east of England. *Risk Analysis*, 34, 1469-1481. <https://doi.org/10.1111/risa.12159>
26. Bondarenko, V., Ryabukha, O., Martyshko, A., & Davigora, Yu. (2020). Restoration of physical capacity of employees of the National Police of Ukraine. Educational methodical manual. Kyiv: National Academy of Internal Affairs. Retrieved from: <http://elar.naiu.kiev.ua/handle/123456789/17666>
27. Lysenko, O.M. (2012). The changes of physiological reactivity of cardiorespiratory system to respiratory homeostasis with the use of complex stimulation of special work capacity. *Fiziologichnyi Zhurnal*, 58(5), 70-77 [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/fz58.05.070>
28. Manual for statistics on energy consumption in households. (2013). Eurostat. Retrieved from: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/ks-gq-13-003>
29. Romero-Jordán, D., & del Río, P. (2022). Analysing the drivers of the efficiency of households in electricity consumption. *Energy Policy*, 164, 112828. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112828>

The article was received 03.04.2023 and was accepted after revision 10.06.2023

Дерюгін Олег Валентинович

кандидат технічних наук, доцент кафедри управління на транспорті, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

Адреса робоча: пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2456-7664> **e-mail:** deryugin_o@ukr.net

Негрій Тетяна Олександрівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4239-3178> **e-mail:** tetiana.nehrii@gmail.com

Боровицький Олександр Миколайович

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Адреса робоча: пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-7960> **e-mail:** borovytskyi.o.m@nmu.one

Столбченко Олена Володимирівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Адреса робоча: пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2003-4382> **e-mail:** elena_aot@ukt.net

Архірей Михайло Михайлович

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Адреса робоча: пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6803-0703> **e-mail:** rkhirei@meta.ua

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 65.011.56

Stanislav Dovgii¹, Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, D. S. (Computer science), professor, Director-organizer

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1078-0162> *e-mail*: s.dovgii@gmail.com

Oleh Kopyika¹, D. S. (Computer science), professor, Head of department

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0189-3915> *e-mail*: okopyika@gmail.com

Oleksii Kozlov¹, Postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1889-3153> *e-mail*: alexey.ua84@gmail.com

Alina Lytvynenko², Postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-2001-0148> *e-mail*: Litvinenko_alina@outlook.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

²National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGIES OF APPLICATION ARCHITECTURE'S IT SERVICES

Abstract. *The development of the System Architecture of the IT infrastructure focused on the usage of modern Data Centers is considered. The purpose of the research is to develop a strategy for the development of the System Architecture of the IT infrastructure based on the usage of advanced methodologies and concepts of leading manufacturer's hardware and software. The following principle of IT infrastructure construction is formulated: IT infrastructure architectures define a set of services. IT services are provided to three groups of clients. IT services and clients are connected by 5 implementation scenarios. The integration of IT services is determined by 5 architectures. As IT services, we understand information technologies aimed at maintaining the following elements in technically good condition: network devices, computing equipment, data storage devices, automatic software deployment services, network services, perimeter protection services, directory services, file and print services, data management services, business application services, IT management services, archiving and recovery services, certificate management services, integration services. Architectures define the fundamental principles of building IT services and their relationship. One of the most important architectures is the architecture of software applications. The architecture of software applications is determined by the business needs of the corporation and the approaches, methods of creating applications by a specific developer. It defines the execution environment for applications, mechanisms of communication between applications and components, tools for controlling the application and managing its state, as well as storage for structured and unstructured data types. Tasks of the architecture: to provide an environment for*

the execution of application components; support dispatching mechanisms for communications between application components; implement tools for monitoring the level of services and diagnosing problems; provide storage of structured and unstructured information. Standardization of the application architecture allows you to minimize costs associated with the support of several types of architectures, each for a specific type of business application.

Keywords: *information technologies; system architecture; IT infrastructure; data centers.*

С.О. Довгий¹, О.В. Копійка¹, О.С. Козлов¹, А.О. Литвиненко²

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

²Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ІТ-СЕРВІСІВ АРХІТЕКТУРИ ДОДАТКІВ

Анотація. Розглянуто розвиток Системної Архітектури ІТ-інфраструктури, орієнтованої на використання сучасних Дата-центрів. Метою досліджень є вироблення стратегії розвитку Системної Архітектури ІТ-інфраструктури на основі застосування передових методологій та концепцій провідних виробників апаратного та програмного забезпечення. Сформульовано наступний принцип побудови ІТ-інфраструктури: архітектури ІТ-інфраструктури визначають набір сервісів. ІТ-сервіси надаються трьома групами клієнтів. ІТ-сервіси та клієнти пов'язані 5 сценаріями реалізації. Інтеграцію ІТ-сервісів визначають 5 архітектур. В якості ІТ-сервісів ми розуміємо інформаційні технології, спрямовані на підтримання в технічно справному стані таких елементів: мережні пристрої, обчислювальна техніка, пристрої зберігання даних, служби автоматичного розгортання програмного забезпечення, мережеві служби, служби захисту периметра, служби каталогу, служби файлів і друку, служби управління даними, служби бізнес-додатків, служби управління ІТ, служби архівування та відновлення, служби управління сертифікатами, служби інтеграції. Архітектури визначають фундаментальні принципи побудови ІТ-сервісів і їх взаємозв'язок. Однією з найважливіших архітектур є архітектура програмних додатків. Архітектура програмних додатків визначається бізнес-потребами корпорації та підходами, методами створення додатків конкретним розробником. Вона визначає середовище виконання для додатків, механізми комунікацій між додатками і компонентами, інструментарій контролю додатка і управління його станом, а також сховище для структурованих і неструктурованих типів даних. Завдання архітектури: забезпечувати середовище для виконання компонентів додатків; підтримувати механізми диспетчеризації для комунікацій між компонентами додатків; реалізувати інструментарій для моніторингу рівня сервісів і діагностики проблем; забезпечувати зберігання структурованої і неструктурованої інформації. Стандартизація архітектури додатків дозволяє мінімізувати витрати, пов'язані з підтримкою декількох типів архітектур, кожна для визначеного типу бізнес-додатків.

Ключові слова: *інформаційні технології; системна архітектура; ІТ-інфраструктура; дата-центри.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.75-93>

1. ВСТУП

Враховуючи сучасні вимоги до інформаційно-комунікаційних технологій, при реалізації проєктів для крупних підприємств, економічно доцільно використовувати «хмарні технології». Сучасним трендом при цьому є побудова єдиного інформаційного простору для підприємства з використанням сучасної ІТ-інфраструктури, орієнтованої на Дата-центри [1–22]. Основними складовими єдиного інформаційного простору є: єдине транспортне середовище (програмно-конфігуровані мережі SDN (software-defined networking)); сервісно-орієнтована архітектура інформаційних систем; інфраструктурні та функціональні сервіси Дата-центрів [23–25].

Основою сервісних Дата-центрів є набір ІТ-сервісів. В якості ІТ-сервісів ми розуміємо комплекс робіт, спрямований на підтримання в технічно справному стані таких елементів: мережа; дані; ІТ-інфраструктура; інфраструктура інформаційних систем; безпека [26–28].

У цій статті розглядатимемо розвиток Системної Архітектури ІТ-інфраструктури, орієнтованої на використання сучасних Дата-центрів.

Метою даних досліджень є вироблення стратегії розвитку Системної Архітектури ІТ-інфраструктури на основі застосування передових методологій та концепцій провідних виробників апаратного та програмного забезпечення (HP, SUN, EMC, CISCO, Microsoft, ORACLE, Veritas).

2. КОНЦЕПЦІЯ РОЗВИТКУ ІТ-ІНФРАСТРУКТУРИ

Реалізація концепції розвитку ІТ-інфраструктури за рахунок побудови Дата-центрів показана на рис. 1.

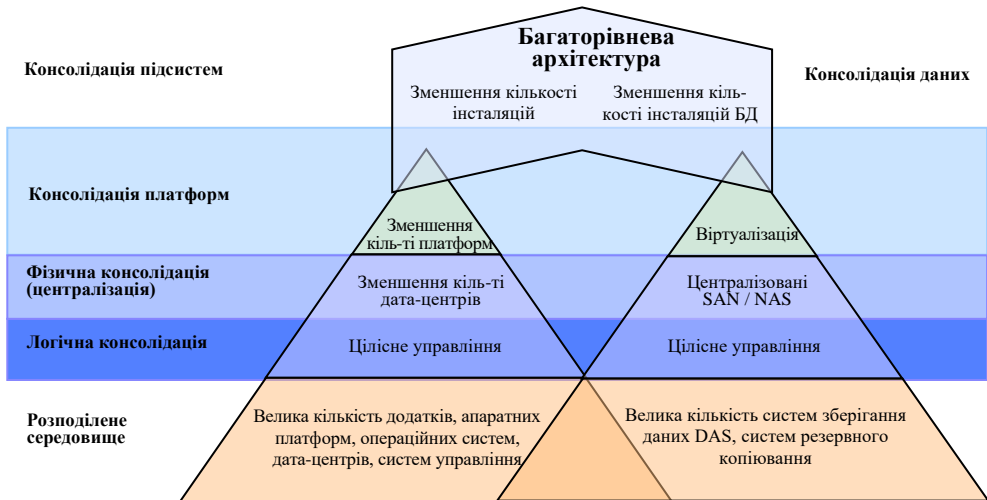


Рис. 1. Концепція розвитку ІТ-інфраструктури

Такий підхід дозволяє проаналізувати існуючу ІТ-інфраструктуру та визначити шляхи побудови нової на базі протестованої, еталонної архітектури MSA [29].

При цьому створюється система компонентів, що описують: загальні підходи побудови системної архітектури; IT-сервіси – технологічні системи, які вирішують завдання корпорації; логічну модель IT-інфраструктури.

Сформулюємо наступний принцип побудови IT-інфраструктури: архітектури IT-інфраструктури визначають набір сервісів. IT-сервіси надаються трьом групам клієнтів. IT-сервіси та клієнти пов'язані 5 сценаріями реалізації. Інтеграцію IT-сервісів визначають 5 архітектур.

В якості IT-сервісів ми розуміємо інформаційні технології, спрямовані на підтримання в технічно справному стані таких елементів: мережні пристрої, обчислювальна техніка, пристрої зберігання даних, служби автоматичного розгортання ПЗ, мережеві служби, служби захисту периметра, служби каталогу, служби файлів і друку, служби управління даними, служби бізнес-додатків, служби управління IT, служби архівування та відновлення, служби управління сертифікатами, служби інтеграції [30–32].

Всі клієнти підприємства діляться на три основні групи. При необхідності, клієнти діляться всередині кожної категорії окремо: співробітники, партнери та партнерські організації, зовнішні споживачі.

Сценарії реалізації: Дата-центр, департамент, віддалений офіс, екстранет, Інтернет Дата-центр.

Архітектури: безпеки, управління, зберігання даних, програмних додатків, мережева.

Архітектури визначають фундаментальні принципи побудови IT-сервісів і їх взаємозв'язок. Також, на базі архітектури формуються вимоги до створення IT-сервісів.

3. АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНИХ ДОДАТКІВ

Однією з найважливіших Архітектур є Архітектура програмних додатків.

Архітектура програмних додатків визначається бізнес-потребами корпорації та підходами, методами створення додатків конкретним розробником. Вона визначає середовище виконання для додатків, механізми комунікацій між додатками і компонентами, інструментарій контролю додатка і управління його станом, а також сховище для структурованих і неструктурованих типів даних.

Завдання архітектури:

1. Забезпечувати середовище для виконання компонентів додатків.
2. Підтримувати механізми диспетчеризації для комунікацій між компонентами додатків.
3. Реалізувати інструментарій для моніторингу рівня сервісів і діагностики проблем.

4. Забезпечувати зберігання структурованої і неструктурованої інформації.

Стандартизація архітектури додатків дозволяє мінімізувати витрати, пов'язані з підтримкою декількох типів архітектур, кожна для одного типу бізнес-додатків.

Зокрема, архітектура як одно-, так і багаторівневих додатків платформи включає в себе (рис. 2):

1. Операційну систему.
2. Середовище виконання – Framework.
3. Сервер додатків – Internet Information Server.
4. Компонентне середовище – COM +.
5. Службу асинхронного обміну повідомленнями – MSMQ.

Елементи Інфраструктури додатків, які є основними компонентами архітектури, не включають самі додатки. Корпорацією експлуатується значна кількість бізнес-додатків, кожен з яких вимагає своїх типів систем і компонентів на кожному рівні, і навіть різну кількість рівнів. Доцільно розглядати модернізацію поточних бізнес-систем і впровадження нових не тільки з боку необхідного функціоналу, але і з боку перспективи необхідної для них архітектури.

Формалізація архітектури додатків дозволить враховувати необхідні зміни ІТ-інфраструктури в цілому, а також мінімізувати витрати на впровадження нової технології шляхом використання вже існуючих компонентів (баз даних, серверів додатків, вебсерверів).

Для формування вимог до архітектури потрібно розглянути типові рівні та компоненти додатків. Типовий бізнес-додаток включає в себе до чотирьох рівнів і одинадцять основних компонентів (рис. 3).

Рівні:

1. Рівень даних – відповідає за управління даними і доступ до них.
2. Рівень додатків – відповідає за бізнес-логіку програми.
3. Рівень Web – відповідає за інтерфейс між додатком і користувачем або між додатком і іншим додатком.
4. Рівень клієнта – відповідає за встановлення інтерфейсу для користувача.

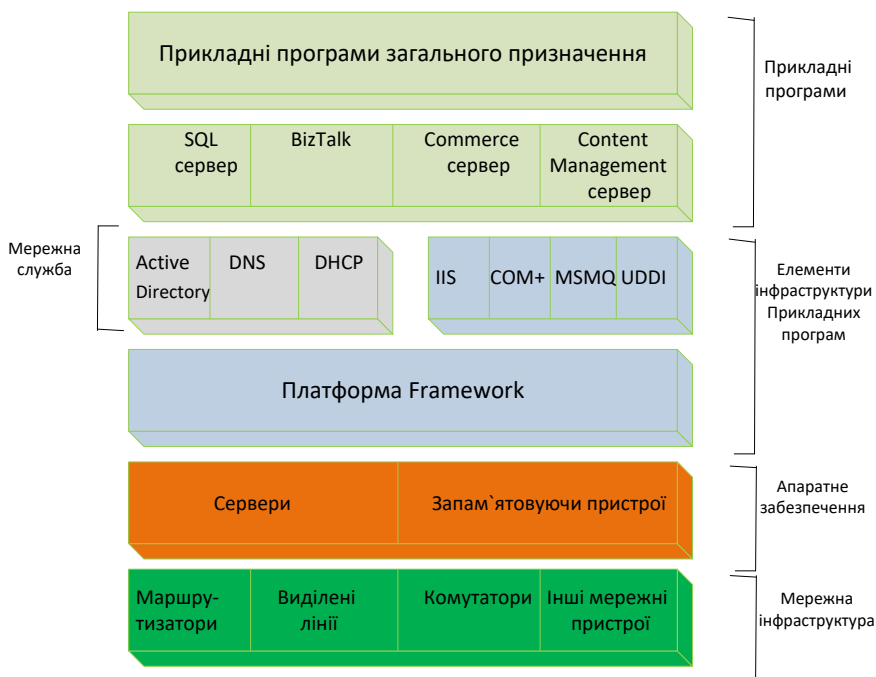


Рис. 2. Архітектура додатків

Додатки ставлять такі завдання перед інфраструктурою:

1. Мати можливість взаємодії з клієнтами – інтерактивними користувачами або іншими web-сервісами.
2. Отримати ресурси для обслуговування запитів від клієнтів.
3. Мати можливість для програмної взаємодії з іншими додатками.
4. Мати місце для надійного зберігання даних.

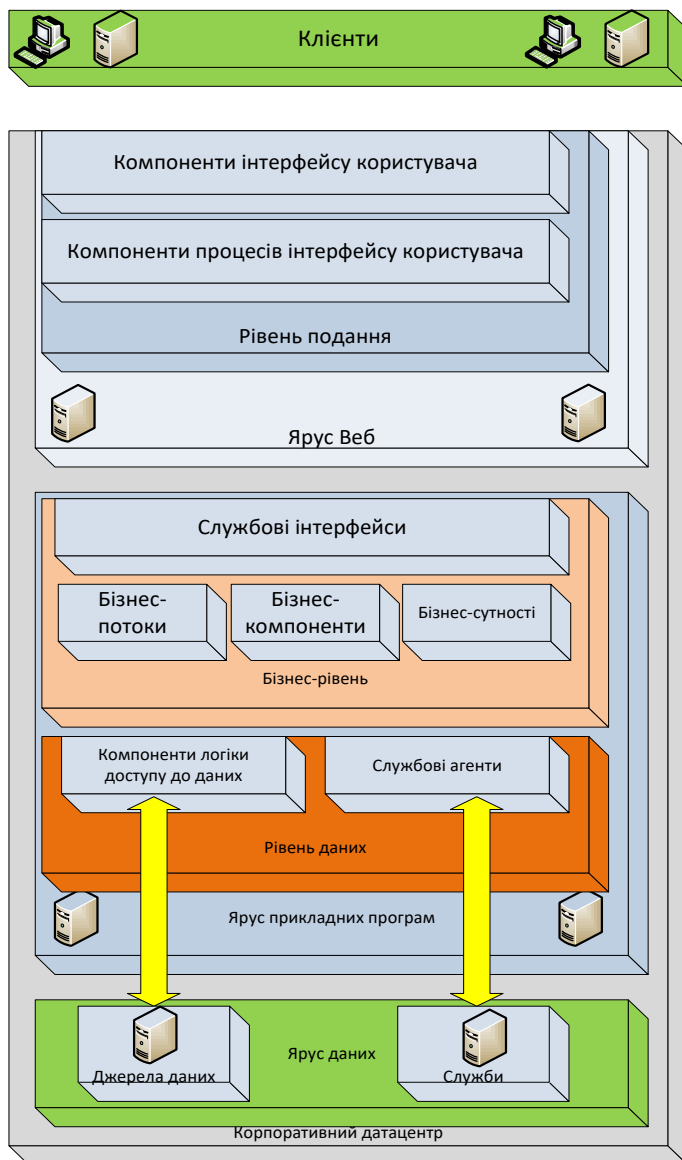


Рис. 3. Типові рівні та компоненти додатків

Розгортання додатків

Технології розгортання додатків повинні забезпечити необхідний рівень доступності, безпеки, керованості.

Доступність

Компоненти рівня програми, що вимагає найвищого рівня доступності (більше 99,90%), розміщуються в кластері з балансуванням навантаження (Load Balancing Cluster). Дана технологія прийнятна для компонентів з одним станом (stateless) або доступних тільки для читання, відключення в будь-який момент часу не приводить до втрати інформації або даних.

Компоненти рівня програми та рівня даних, що вимагають найвищого рівня доступності (більше 99,95%), розміщуються в Failover-кластері. Дана технологія забезпечує надмірність системних ресурсів з можливістю переміщати додаток з вузла, який відмовив, на резервний.

Захищеність

Компоненти програми можуть бути фізично рознесені на різні вузли мережі. Один додаток, один web-сервіс, може мати один, два або три рівні. Таким чином різні додатки можуть перебувати в різних зонах безпеки.

Кожна програма має надавати інформацію про свою підтримку технологій кластеризації та взаємодії своїх рівнів.

Типи клієнтів

Основні типи клієнтів, що використовуються Корпорацією, включають:

1. Тонкий клієнт (браузер). Логіка і дані зберігаються на серверах.
2. Товстий клієнт (Excel). Частина бізнес-логіки і профіль настройки користувача зберігаються на клієнті.
3. Програмний клієнт, який отримує доступ до Web-сервісу за допомогою протоколу SOAP. Один додаток є клієнтом іншого, при цьому інтерфейс користувача відсутній.

Інфраструктура життєвого циклу

Додаток протягом свого життєвого циклу всередині Дата-центру розгортається в п'яти інфраструктурних середовищах додатків (рис. 4):

1. Середовище розробки – виділене середовище, всередині якого створюються додатки. Менеджер розробки відповідає за роботу в цій зоні і за зміни і модифікації системи.
2. Середовище інтеграції – дана зона призначена для зібраного додатка, в ній шліфуються механізми комунікацій між компонентами програми.
3. Тестове середовище – зона відповідальності менеджера тестування або менеджера приймання в експлуатацію. У даній зоні проводяться набори функціональних, навантажувальних і інших тестів на додатку. Зміни додатка не допускаються.
4. Перед-експлуатаційне середовище – зона «зберігання» готового до впровадження релізу додатка. Зміни не допускаються. Дана зона вже входить у відповідальність менеджера експлуатації.
5. Середовище експлуатації – середовище з найвищим рівнем контролю.

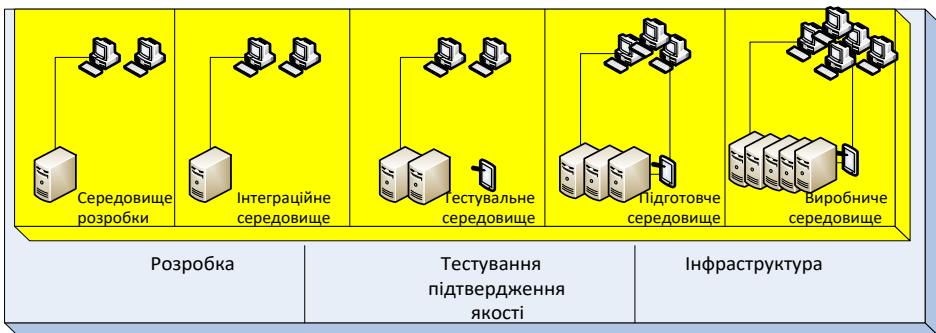


Рис. 4. Інфраструктурні середовища додатків Дата-центру

Логічний дизайн додатків

Стандарт 1: Дворівневий додаток для внутрішніх клієнтів (рис. 5 а)

Характеристики:

1. Прості міжкомпонентні зв'язки.
2. Проста схема розгортання програми.
3. Прості механізми контролю доступності.
4. Всі додатки знаходяться у Внутрішній Зоні Безпеки.

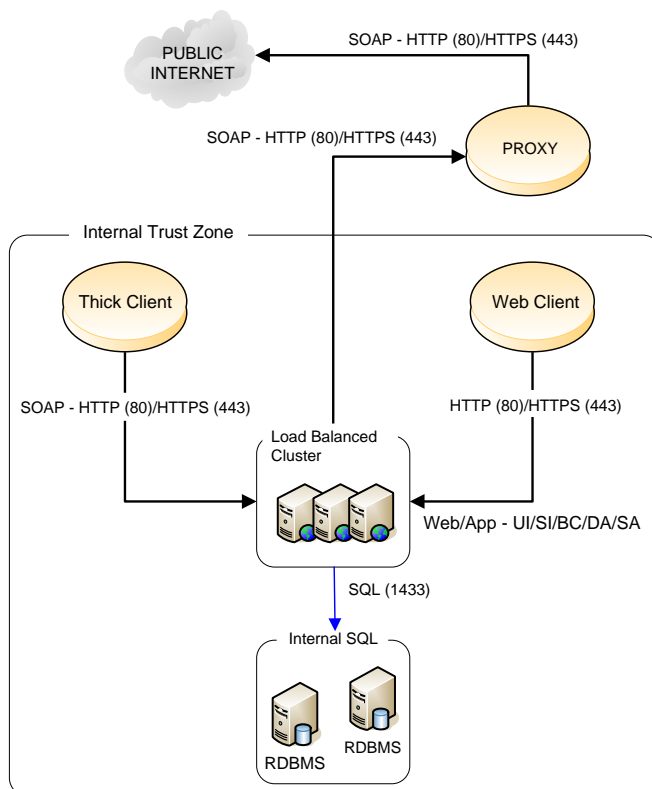


Рис. 5 а. Дворівневий додаток для внутрішніх клієнтів

Стандарт 2: Трирівневий додаток для внутрішніх клієнтів (рис. 5 б)

Характеристики:

1. Незалежне масштабування рівнів бізнес-логіки і уявлення.
2. Діагностика проблем складна.

Стандарт 3: Дворівневий додаток для зовнішніх клієнтів з внутрішнім джерелом даних (рис. 5 в)

Характеристики:

1. Системи контролю периметрів забезпечують додатковий рівень захисту.
2. Розгортання системи складне.

Стандарт 4: Трирівневий додаток для зовнішніх клієнтів з внутрішнім джерелом даних (рис. 5 г)

Характеристики:

1. Необхідна настройка комунікацій між рівнями бізнес-логіки і уявлення.
2. Необхідний сервіс хостингу компонентів.
3. Діагностика проблем складна.
4. Розгортання додатка складне.

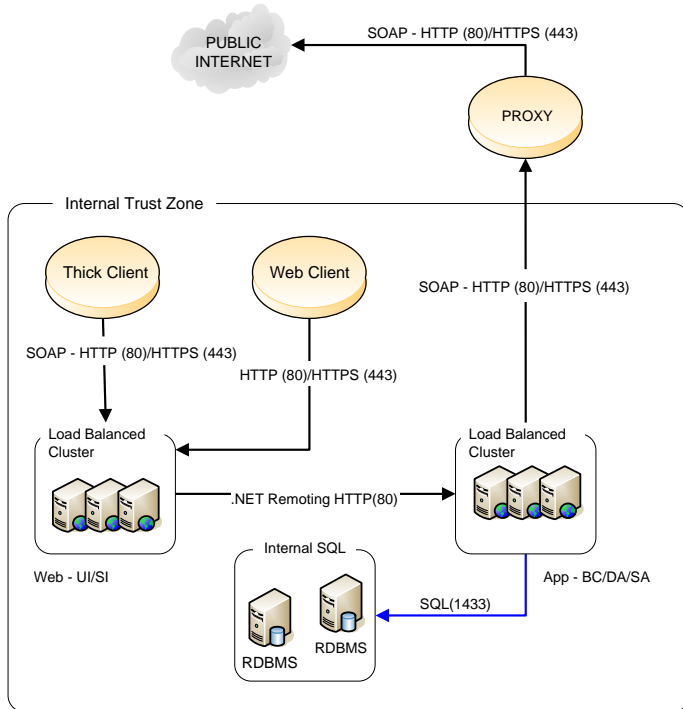


Рис. 5 б. Трівірневий додаток для внутрішніх клієнтів

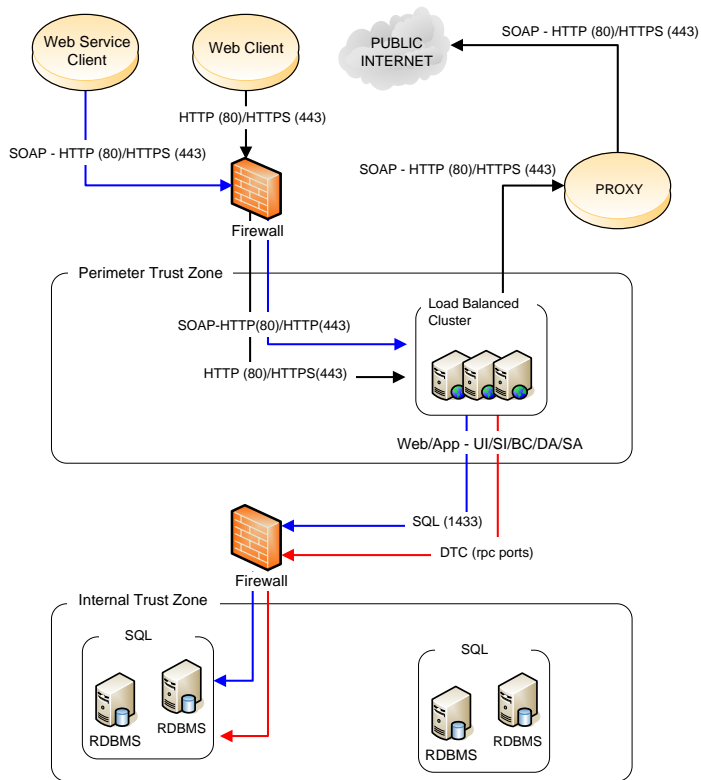


Рис. 5 в. Дворівневий додаток для зовнішніх клієнтів з внутрішнім джерелом даних

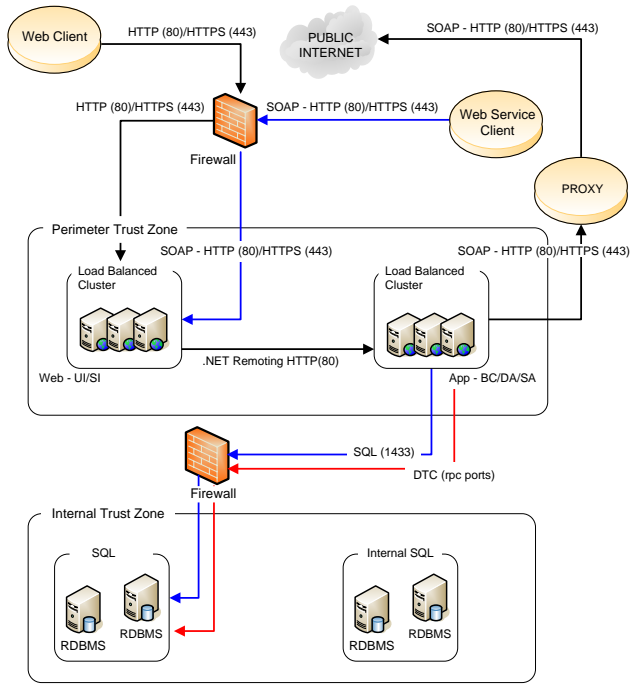


Рис. 5 г. Тривірневий додаток для зовнішніх клієнтів з внутрішнім джерелом даних

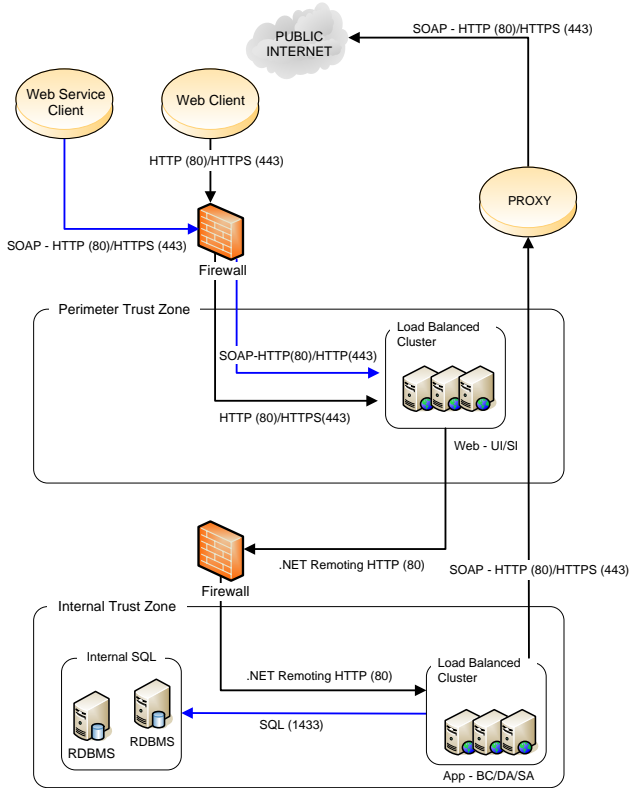


Рис. 5 д. Тривірневий додаток для зовнішніх клієнтів з внутрішнім джерелом даних і додатком

Стандарт 5: Трирівневий додаток для зовнішніх клієнтів з внутрішнім джерелом даних і додатком (рис. 5 д)

Характеристики:

1. Бізнес-логіка і дані розміщуються в більш захищеній зоні.
2. Діагностика проблем складна.
3. Розгортання додатка складне.

Архітектура додатків реалізується у вигляді наступних елементів і стандартів.

Табл. 1. Елементи й стандарти архітектури додатків

Елемент	Характеристика
.NET Framework	Забезпечує виконване середовище і бібліотеки класів для .NET коду
COM+	Середовище обслуговування та захисту компонентів додатка
Message Queuing	Технологія управління чергами повідомлень і асинхронними комунікаціями між компонентами додатка
Web Application Services	Обслуговування (hosting) Web-сервісів
Data Services	Обслуговування доступу до даних
File Services	Зберігання конфігураційних файлів (global.asax або Web.config, наприклад)
Networking Services	Забезпечення мережових комунікацій
Certificate Services	Забезпечення аутентифікації, авторизації та криптографічного шифрування
Infrastructure Management Services	Інструментарій моніторингу та управління додатком і його компонентами

Мережеві стандарти: TCP / IP; UDP / IP.

У якості мережі будемо використовувати програмно-конфігуровані мережі (software-defined networking SDN). SDN – це підхід до управління мережею, який забезпечує динамічну, програмно ефективну конфігурацію мережових елементів з метою покращення продуктивності мережі та моніторингу, що робить її більше схожою на хмарні обчислення, ніж на традиційне керування мережею [33]. SDN призначена для створення статичної архітектури традиційних мереж. SDN намагається централізувати дані про мережу в одному мережевому компоненті, відокремлюючи процес пересилання мережових пакетів (площина даних) від процесу маршрутизації (площина керування) [34, 35]. Площина управління складається з одного або кількох контролерів, які вважаються мозком мережі SDN, в якій об'єднано весь інтелект. Однак централізація має свої недоліки, коли йдеться про безпеку [36], масштабованість та гнучкість [33], і це головна проблема SDN [36].

SDN зазвичай асоціювалась з протоколом OpenFlow (для віддаленого зв'язку з елементами мережевої площини з метою визначення шляху мережових пакетів через мережеві комутатори) з моменту появи останнього в 2011 році. Однак з 2012 року цей термін також використовували власні

системи [37, 38]. До них належать відкрите мережеве середовище Cisco Systems і платформа віртуалізації мережі Nicira.

Web-стандарти: HTTP / HTTPS; XML; SOAP / WSDL; WSE (WS-Security, WS-Routing, WS-Coordination, and WS-Transaction).

СУБД стандарти: SQL.

4. ІНТЕГРАЦІЯ ІНФРАСТРУКТУРИ ДОДАТКІВ

Будь-який компонент інфраструктури додатків повинен надавати рішення, яке дозволяє його інтегрувати з іншими компонентами. Інтеграція необхідна на рівні мережевих комунікацій, на рівні базових сервісів (доступ до файлових систем), на рівні доступу до джерел даних, на рівні взаємодії додатків. Крім технологічної складності інтеграції різнорідних систем, значно підвищується складність управління такими комплексами [39].

Оскільки в реальних умовах неможливо і часто недоцільно забезпечити поставку всіх компонентів інфраструктури від одного виробника, питання інтеграції може бути вирішене трьома шляхами: використання стандартів, використання проміжних середовищ-«перекладачів» (application integration services), самостійна розробка конекторів.

Використання стандартів

Ключовою характеристикою взаємодії з операційними системами і службами інших виробників є підтримка стандартів TCP / IP, IPX, Kerberos, PKI (X.509, PKCS), LDAP, HTTP, WBEM, DNS, DHCP, XML, UDDI, SOAP і інш.

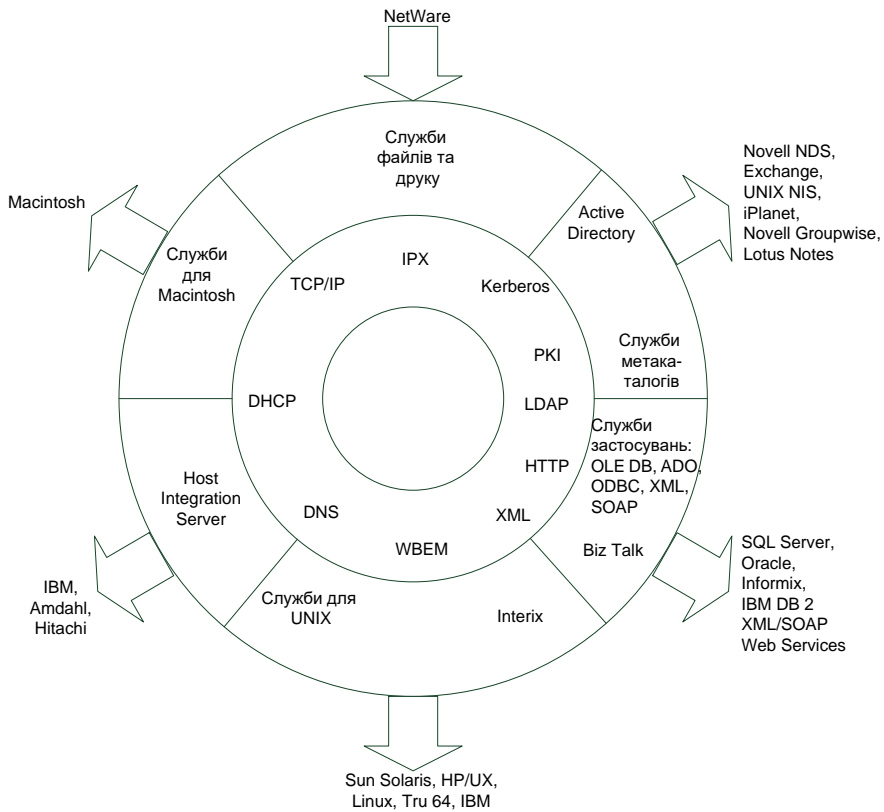


Рис. 6. Підтримка стандартів

Крім стандартів, треба забезпечити додатковими технологіями інтеграції, як наприклад підсистема Interix, яка дозволяє виконувати додатки UNIX середовища.

Табл. 2. Додаткові технології інтеграції

Платформа	Мережа	Дані	Додатки
UNIX	Services for UNIX	for Services for UNIX, Microsoft Interix	Microsoft Interix
IBM	Host Integration Server	Host Integration Server	Host Integration Server
Macintosh	Services for Macintosh	for Services for Macintosh	N/A

Сервіс-орієнтована архітектура додатків (Service Oriented Architecture) спирається на Web-стандарти і дозволяє створити інфраструктуру додатків, здатних до безшовної інтеграції.

Стандарти Web Services Enhancements (WSE) описують схеми маршрутизації, посилальних зв'язків, інспекції, безпеки, транзакційних механізмів та інші компоненти інфраструктури SOA. Інфраструктура додатків повинна підтримувати набір стандартів WSE.

Табл. 3. Підтримка стандартів WSE Windows Server

Вимога	Приклад реалізації
Безпосередня підтримка XML Web Services	Забезпечення безпосередньої підтримки стандартів XML Web service, включаючи XML, SOAP, Universal Description, Discovery, і Integration (UDDI), і Web Services Description Language (WSDL).
Підтримка Enterprise UDDI	Включає Enterprise UDDI Services, динамічну та гнучку інфраструктуру для XML Web-сервісів. Даний компонент дозволяє компаніям отримати свою внутрішню UDDI службу.
Підтримка успадкованих систем	XML Web-сервіси інтегровані в Windows Server; існуючі компоненти COM + і Message Queuing можуть працювати спільно з Web-сервісами. COM + додатки можуть використовувати XML / SOAP. Message Queuing використовує SOAP і XML в якості основних протоколів.
Федеративна Інфраструктура	XML Web-сервіси забезпечують фундамент для безшовної інтеграції додатків.

Використання сервісів інтеграції

Сервіси інтеграції дозволяють грати роль транспорту і перекладача інформації. Сервіс інтеграції має бути створений у вигляді єдиної шини, брокера, інтегруючого системи відповідно до розроблених бізнес-процесів. Сервіс інтеграції може використовувати власну бізнес-логіку і забезпечувати інтеграцію в один бізнес-процес багатьох (більше двох) додатків.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Розглянуто розвиток Системної Архітектури ІТ-інфраструктури, орієнтованої на використання сучасних Дата-центрів.

2. Представлена стратегія розвитку Системної Архітектури ІТ-інфраструктури на основі застосування передових методологій та концепцій провідних виробників апаратного та програмного забезпечення (HP, SUN, EMC, CISCO, Microsoft, ORACLE, Veritas). Для системної архітектури представлені компоненти, що описують: загальні підходи побудови системної архітектури; ІТ-сервіси – технологічні системи, які вирішують завдання корпорації; логічну модель ІТ-інфраструктури.

3. Сформульовано наступний принцип побудови ІТ-інфраструктури: архітектури ІТ-інфраструктури визначають набір сервісів. ІТ-сервіси надаються трьома групами клієнтів. ІТ-сервіси та клієнти пов'язані 5 сценаріями реалізації. Інтеграцію ІТ-сервісів визначають 5 архітектур.

4. В якості ІТ-сервісів представлені інформаційні технології, спрямовані на підтримання в технічно справному стані таких елементів: мережні пристрої, обчислювальна техніка, пристрої зберігання даних, служби автоматичного розгортання ПЗ, мережеві служби, служби захисту периметра, служби каталогу, служби файлів і друку, служби управління даними, служби бізнес-додатків, служби управління ІТ, служби архівування та відновлення, служби управління сертифікатами, служби інтеграції.

5. Архітектури систем визначають фундаментальні принципи побудови ІТ-сервісів і їх взаємозв'язок.

6. На базі архітектури формуються вимоги до створення ІТ-сервісів.

7. Однією з найважливіших архітектур є архітектура програмних додатків.

8. Архітектура програмних додатків визначається бізнес-потребами корпорації та підходами, методами створення додатків конкретним розробником. Вона визначає середовище виконання для додатків, механізми комунікацій між додатками і компонентами, інструментарій контролю додатка і управління його станом, а також сховище для структурованих і неструктурованих типів даних. Завдання архітектури: забезпечувати середовище для виконання компонентів додатків; підтримувати механізми диспетчеризації для комунікацій між компонентами додатків; реалізувати інструментарій для моніторингу рівня сервісів і діагностики проблем; забезпечувати зберігання структурованої і неструктурованої інформації.

9. Стандартизація архітектури додатків дозволяє мінімізувати витрати, пов'язані з підтримкою декількох типів архітектур, кожна для визначеного типу бізнес-додатків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. "Data Centres and Data Transmission Networks – Analysis". IEA. Retrieved 2022-03-06: веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> (Last accessed: 30.08.2023).

2. The European Commission H2020 EURECA Data Centre Project - Data centre energy efficiency guidelines, extensive online training material, case studies/lectures (under events page), and tools: веб-сайт. URL: <https://www.dceureca.eu/> (Last accessed: 30.08.2023).

3. "An Oregon Mill Town Learns to Love Facebook and Apple". *The New York Times*. March 6, 2018: веб-сайт. URL: <https://www.nytimes.com/2018/03/06/business/apple-facebook-data-center.html> (Last accessed: 30.08.2023).
4. "Google announces London cloud computing data centre". *BBC.com*. July 13, 2017: веб-сайт. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-40590080> (Last accessed: 30.08.2023).
5. "Cloud Computing Brings Sprawling Centers, but Few Jobs". *The New York Times*. August 27, 2016. *data center .. a giant .. facility .. 15 of these buildings, and six more .. under construction*: веб-сайт. URL: <https://www.nytimes.com/2016/08/27/technology/cloud-computing-brings-sprawling-centers-but-few-jobs-to-small-towns.html> (Last accessed: 30.08.2023).
6. Holusha, J. (2000). "Commercial Property/Engine Room for the Internet; Combining a Data Center With a 'Telco Hotel'". *The New York Times*. Retrieved June 23, 2019: веб-сайт. URL: <https://www.nytimes.com/2000/05/14/realestate/commercial-property-engine-room-for-internet-combining-data-center-with-telco.html> (Last accessed: 30.08.2023).
7. "Data center staff are aging faster than the equipment". *Network World*. August 30, 2018: веб-сайт. URL: <https://www.networkworld.com/article/3301883/data-center-staff-are-aging-faster-than-the-equipment.html> (Last accessed: 30.08.2023).
8. "This Wave of Data Center Consolidation is Different from the First One". February 8, 2018: веб-сайт. URL: <https://www.datacenterknowledge.com/manage/wave-data-center-consolidation-different-first-one> (Last accessed: 30.08.2023).
9. Kantor, A. (2021-05-18). "Big Tech races to clean up act as cloud energy use grows". *Financial Times*. Retrieved 2022-03-06: веб-сайт. URL: <https://www.ft.com/content/c719f655-149c-4ce0-a7a5-18527c7776cf> (Last accessed: 30.08.2023).
10. Bashroush, R. (2018). A Comprehensive Reasoning Framework for Hardware Refresh in Data Centres. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*. 3 (4), 209–220.
11. Noormohammadpour, M. & Raghavendra, C. (2018). Datacenter Traffic Control: Understanding Techniques and Tradeoffs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 20 (2). 1492–1525. arXiv:1712.03530. doi:10.1109/comst.2017.2782753
12. Беркман, Л. Н. (2014). Теоретичні основи методології синтезу інформаційно-комунікаційних систем. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, №4, 12–20.
13. Довгий, С. (2000). Стан та проблеми розвитку телекомунікаційної мережі України. *Наука та наукознавство*.
14. Волошин, О. Ф., & Мащенко, С. О. (2010). *Моделі та методи прийняття рішень : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., 2-ге вид., перероб. та допов., К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"*.
15. Rubinstein, A. (2013). *Lecture Notes in Microeconomic Theory*, 2nd., Princeton University Press. ISBN 978-0-691-15413-8.
16. Балашов, В.А., Копийка, О.В., & Ляховецький, Л.М. (2005) VDSL – ближайшее будущее цифрового абонентского доступа. *Зв'язок*, № 4, 10-16.
17. Довгий, С.О. (2001). Приватизація, інвестиції та фондовий ринок: правові засади та практика. У 4 т., Відкрите акціонерне товариство «Укртелеком», К.: Укртелеком.
18. Jew, J. (2010). BICSI Data Center Standard: A Resource for Today's Data Center Operators and Designers. *BICSI News Magazine*.
19. Niles, S. (2011). Standardization and Modularity in Data Center Physical Infrastructure. *Schneider Electric*.
20. *Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers*. (2005). TIA STANDARD TIA-942. TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY ASSOCIATION.
21. ANSI/BICSI 002-2011 Data Center Design and Implementation Best Practices. (2011). Committee Approval - January 2011 First Published.
22. TIA is accredited by the American National Standards Institute (ANSI) as a standards developing organization (SDO). URL: <http://www.tiaonline.org/standards/> (Last accessed: 07.04.2022).

23. Концепции сетцентрического боевого управления ВС США, Великобритании и ОВС НАТО. Общее и различия. URL: http://factmil.com/publ/strana/velikobritanija/konceptii_setecentricheskogo_boevogo_upravlenija_vs_ssha_velikobritanii_i_ovs_nato_obshhee_i_razlichija_2010/9-1-0-420 (Last accessed: 30.08.2023).
24. Kopeika, O., Tarasenko, I., Kisselevskiy, A., Karichenskiy, A. & Valiulin, T. (2007). Softline applies TMF standards as a guide when building Resource Inventory solution for nation-wide carrier Ukraine Telecom. TM Forum Case Study Handbook, Volume 3.
25. Barabash, O., Open'ko, P., Kopeika, O., Shevchenko, H., & Dakhno, N. (2019). Target Programming with Multicriterial Restrictions Application to the Defense Budget Optimization. *Advances in Military Technology*, 14, no. 2, 213-229. DOI: 10.3849/aimt.01291.
26. Choi, M.-J., Ju, H.-T., Hong, J. W.-K., & Yun, D.-S. (2008). Design and Implementation of Web Services-based NGOSS Technology Specific Architecture, *Annals of Telecommunications. Special Issue on "Next Generation Network and Service Management"*, Vol. 63, No. 3-4, 195-206.
27. Копейка, О. В. (2014). Архитектура системы управления ИТ-инфраструктурой в современных Дата-центрах. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*, № 29, 29-37.
28. Копійка, О.В. (2014). Методологія синтезу інформаційно-комунікаційних систем на базі єдиної інформаційної платформи. Автореф. докт. тех. наук, К.: Національна академія наук України, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору.
29. Еталонні архітектури MSA. (2005). К.: Майкрософт Україна; К.: Видавнича група BHN.
30. Копейка, О.В. (2014). Проектирование сервисов инфраструктуры приложений в дата-центрах. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, No 1, 19–27.
31. Копейка, О.В. (2014). Архитектура системы безопасности ИТ-инфраструктуры в дата-центрах. *Сучасний захист інформації*, No 1, 48–57.
32. Копейка, О.В. (2013). Сетевые службы и службы сетевых устройств в дата-центрах. *Системи управління, навігації та зв'язку: наукове періодичне видання*, №4(28), 98-104.
33. Benzekki, K., El Fergougui, A., & Elbelrhiti Elalaoui, A. (2016). Software-defined networking (SDN): A survey. *Security and Communication Networks*, 9 (18): 5803–5833. doi:10.1002/sec.1737.
34. Montazerolghaem, A. (2020). Software-defined load-balanced data center: design, implementation and performance analysis. *Cluster Computing*. Vol. 24 (2), 591–610. doi:10.1007/s10586-020-03134-x. ISSN 1386-7857. S2CID 220490312.
35. Довгий, С.О., Воробієнко, П.П., & Гуляев, К.Д. (2013) *Сучасні телекомунікації: Мережі, технології, безпека, економіка, регулювання*. Видання друге (доповнене). Київ: «Азимут-Україна».
36. Montazerolghaem, A. (2020). Software-defined Internet of Multimedia Things: Energy-efficient and Load-balanced Resource Management. *IEEE Internet of Things Journal*. Vol.9 (3), 2432–2442. doi:10.1109/IIOT.2021.3095237. ISSN 2327-4662. S2CID 237801052.
37. Software-defined networking is not OpenFlow, companies proclaim. URL: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/> (Last accessed: 30.08.2023).
38. InCNTRE's OpenFlow SDN testing lab works toward certified SDN product. URL: <https://www.techtarget.com/news/> (Last accessed: 30.08.2023).
39. Довгий, С.О., & Копійка О.В. (2023) *ІТ-інфраструктура як базова складова цифрової трансформації*. Київ: ТОВ Видавництво «Юстон».

Стаття надійшла до редакції 03.07.2023 і прийнята до друку після рецензування 08.09.2023

REFERENCES

1. "Data Centres and Data Transmission Networks – Analysis". IEA. Retrieved 2022-03-06 from <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> (Last accessed: 30.06.2023).
2. The European Commission H2020 EURECA Data Centre Project - Data centre energy efficiency guidelines, extensive online training material, case studies/lectures (under events page), and tools. Retrieved from <https://www.dceureca.eu/> (Last accessed: 30.06.2023).
3. "An Oregon Mill Town Learns to Love Facebook and Apple". *The New York Times*. March 6, 2018. Retrieved from <https://www.nytimes.com/2018/03/06/business/apple-facebook-data-center.html> (Last accessed: 30.06.2023).
4. "Google announces London cloud computing data centre". *BBC.com*. July 13, 2017. Retrieved from <https://www.bbc.com/news/technology-40590080> (Last accessed: 30.06.2023).
5. "Cloud Computing Brings Sprawling Centers, but Few Jobs". *The New York Times*. August 27, 2016. *data center.. a giant .. facility .. 15 of these buildings, and six more .. under construction*. Retrieved from <https://www.nytimes.com/2016/08/27/technology/cloud-computing-brings-sprawling-centers-but-few-jobs-to-small-towns.html> (Last accessed: 30.06.2023).
6. Holusha, J. (2000). "Commercial Property/Engine Room for the Internet; Combining a Data Center With a "Telco Hotel"". *The New York Times*. Retrieved June 23, 2019 from <https://www.nytimes.com/2000/05/14/realestate/commercial-property-engine-room-for-internet-combining-data-center-with-telco.html> (Last accessed: 30.06.2023).
7. "Data center staff are aging faster than the equipment". *Network World*. August 30, 2018. Retrieved from <https://www.networkworld.com/article/3301883/data-center-staff-are-aging-faster-than-the-equipment.html> (Last accessed: 30.06.2023).
8. "This Wave of Data Center Consolidation is Different from the First One". February 8, 2018. Retrieved from <https://www.datacenterknowledge.com/manage/wave-data-center-consolidation-different-first-one> (Last accessed: 30.06.2023).
9. Kantor, A. (2021-05-18). "Big Tech races to clean up act as cloud energy use grows". *Financial Times*. Retrieved 2022-03-06 from <https://www.ft.com/content/c719f655-149c-4ce0-a7a5-18527c7776cf> (Last accessed: 30.06.2023).
10. Bashroush, R. (2018). A Comprehensive Reasoning Framework for Hardware Refresh in Data Centres. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*. 3 (4), 209–220.
11. Noormohammadpour, M. & Raghavendra, C. (2018). Datacenter Traffic Control: Understanding Techniques and Tradeoffs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 20 (2). 1492–1525. arXiv:1712.03530. <https://doi.org/10.1109/comst.2017.2782753>
12. Berkman, L.N. (2014). Theoretical bases of methodology of synthesis of information and communication systems. *Telecommunication and information technologies*, 4, 12-20 [in Ukrainian].
13. Dovgyi, S. (2000). The state and problems of the development of the telecommunications network of Ukraine. *Science and scientific studies* [in Ukrainian].
14. Voloshyn, O.F., & Mashchenko, S.O. (2010). Decision-making models and methods. education manual for students higher education acc., 2nd ed., revision. and added. K.: Kyiv University Publishing and Printing Center [in Ukrainian].
15. Rubinstein, A. (2013). *Lecture Notes in Microeconomic Theory*, 2nd., Princeton University Press. ISBN 978-0-691-15413-8.
16. Balashov, V.A., Kopyika, O.V., & Lyakhovetsky, L.M. (2005). VDSL – near future of digital subscriber access. *Communication*, 4, 10-16 [in Russian].
17. Dovgyi, S.O. (2001). Privatization, Investment and the Stock Market: Legal Principles and Practice. In the 4th grade: *Ukrtelecom* [in Ukrainian].
18. Jew, J. (2010). *BICSI Data Center Standard: A Resource for Today's Data Center Operators and Designers*. BICSI News Magazine.

19. Niles, S. (2011). Standardization and Modularity in Data Center Physical Infrastructure. Schneider Electric.
20. Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers. (2005). TIA STANDARD TIA-942. TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY ASSOCIATION.
21. ANSI/BICSI 002-2011 Data Center Design and Implementation Best Practices. (2011). Committee Approval - January 2011 First Published.
22. TIA is accredited by the American National Standards Institute (ANSI) as a standards developing organization (SDO). Retrieved from <http://www.tiaonline.org/standards/> (Last accessed: 07.04.2022).
23. Concepts of network-centric combat control of the US, UK and NATO Armed Forces. Generalities and differences. Retrieved from http://factmil.com/publ/strana/velikobritanija/koncepcii_setecentricheskogo_boevogo_upravlenija_vs_ssha_velikobritanii_i_ovs_nato_ob_shhee_i_razlichija_2010/9-1-0-420 (Last accessed: 30.06.2023).
24. Kopeika, O., Tarasenko, I., Kisselevskiy, A., Karichenskiy, A. & Valiulin, T. (2007). Softline applies TMF standards as a guide when building Resource Inventory solution for nation-wide carrier Ukraine Telecom. TM Forum Case Study Handbook, Volume 3.
25. Barabash, O., Open'ko, P., Kopeika, O., Shevchenko, H., & Dakhno, N. (2019). Target Programming with Multicriterial Restrictions Application to the Defense Budget Optimization. *Advances in Military Technology*, 14, no. 2, 213-229. <https://doi.org/10.3849/aimt.01291>
26. Choi, M.-J., Ju, H.-T., Hong, J. W.-K., & Yun, D.-S. (2008). Design and Implementation of Web Services-based NGOSS Technology Specific Architecture, *Annals of Telecommunications. Special Issue on "Next Generation Network and Service Management"*, Vol. 63, No. 3-4, 195-206.
27. Kopeika, O. V. (2014). The architecture of the IT infrastructure management system in modern data centers. *Scientific Notes of the Ukrainian Scientific Research Institute of Communications*, No. 29. 29-37 [in Ukrainian].
28. Kopeika, O. V. (2014). Methodology of the synthesis of information and communication systems based on a single information platform. Abstract of Doctor of Technical Sciences, K.: National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Telecommunications and Global Information Space.
29. Reference architectures MSA. (2005). K.: Microsoft Ukraine; K.: Publishing group BHN.
30. Kopeika, O. V. (2014). Designing application infrastructure services in data centers. *Telecommunications and information technologies*, No 1, 19–27 [in Russian].
31. Kopeika, O. V. (2014). The architecture of the IT infrastructure security system in data center. *Modern information protection*, No 1, 48–57 [in Russian].
32. Kopeika, O.V. (2013). Network services and network device services in Data Centers. *Control, navigation and communication systems*, 4 (28), 98-104 [in Russian].
33. Benzekki, K., El Fergougui, A., & Elbelrhiti Elalaoui, A. (2016). Software-defined networking (SDN): A survey. *Security and Communication Networks*, 9 (18): 5803–5833. <https://doi.org/10.1002/sec.1737>
34. Montazerolghaem, A. (2020). Software-defined load-balanced data center: design, implementation and performance analysis. *Cluster Computing*. Vol. 24 (2), 591–610. <https://doi.org/10.1007/s10586-020-03134-x>. ISSN 1386-7857. S2CID 220490312.
35. Dovgiy, S.O., Vorobienko, P.P., & Gulyaev, K.D. (2013) *Modern Telecommunications: Networks, Technologies, Security, Economics, Regulation*. Second edition (supplemented). Kyiv: "Azimuth-Ukraine" [in Ukrainian].
36. Montazerolghaem, A. (2020). Software-defined Internet of Multimedia Things: Energy-efficient and Load-balanced Resource Management. *IEEE Internet of Things Journal*. Vol. 9 (3), 2432–2442. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3095237>. ISSN 2327-4662. S2CID 237801052.
37. Software-defined networking is not OpenFlow, companies proclaim. Retrieved from <https://www.techtarget.com/searchnetworking/> (Last accessed: 30.06.2023).

38. InCNTRE's OpenFlow SDN testing lab works toward certified SDN product. Retrieved from <https://www.techtarget.com/news/> (Last accessed: 30.06.2023).
39. Dovgii, S.O., & Kopyika, O. V. (2023). IT infrastructure as a basic component of digital transformation. Kyiv: Yuston Publishing House LLC [in Ukrainian].

The article was received 03.07.2023 and was accepted after revision 08.09.2023

Довгий Станіслав Олексійович

академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, Почесний директор, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1078-0162> **e-mail:** s.dovgii@gmail.com

Копійка Олег Валентинович

доктор технічних наук, професор, завідувач відділу, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0189-3915> **e-mail:** okopiyka@gmail.com

Козлов Олексій Сергійович

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1889-3153> **e-mail:** alexey.ua84@gmail.com

Литвиненко Аліна Олегівна

аспірантка, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Адреса робоча: 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-2001-0148> **e-mail:** Litvinenko_alina@outlook.com

УДК 504.062+556:528.8

Oleksandr Trofymchuk¹, Corresponding member of the National Academy of Sciences of Ukraine, doctor of technical sciences, professor, Director of the Institute
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274>

Snizhana Zahorodnia^{1,2}, PhD, Senior Research Scientist
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4332-4211> *e-mail*: zagorodnya.s@gmail.com

Viacheslav Vishnyakov¹, PhD, Senior Research part-time work
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2057-0505> *e-mail*: wishnya_dzz@ukr.net

Viktoriya Klymenko¹, PhD, Senior Researcher, Scientific Secretary
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8911-5773>

Natalia Sheviakina¹, PhD, Senior Research Scientist
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5984-5580> *e-mail*: n.a.sheviakina@gmail.com

Ihor Radchuk^{1,2}, PhD, Senior Research Scientist
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4999-1258> *e-mail*: igor.radchuk.v@gmail.com

Olha Tomchenko³, PhD, Senior Research Scientist
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6975-9099> *e-mail*: olhatomch@gmail.com

Serhii Slastin⁴, Chief of the Satellite Data Processing Group
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4173-265X> *e-mail*: sergeyslastin@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

²Academic Visiting Department of Geography in the University of Cambridge, Cambridge, Great Britain

³State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

⁴Information and Analytical Center of the National Space Facilities Control and Test Center, Kyiv, Ukraine

SPACE MONITORING OF VIOLATION OF THE ECOSYSTEM CONDITION OF THE BLACK SEA BIOSPHERE RESERVE AS A RESULT OF MILITARY ACTIONS

***Abstract.** This work is devoted to the study of the impact of military actions on the environment of Ukraine based on the materials of remote sensing of the Earth. The authors proposed a methodology for determining the scale of fires and the degree of damage to nature conservation objects using the example of the Black Sea Biosphere Reserve. In particular, fires are identified with the help of the FIRMS service, which subsequently allows establishing the causes of their occurrence and predicting their direction of spread, as well as estimating the affected areas. The paper presents the results of satellite monitoring of the determination of thermal anomaly centers, their dynamics and extent of damage; a study of the areas flooded due to the lowering of the reservoir is presented; an approach to comprehensive monitoring of the disturbance of the state of ecosystems of nature-protected territories of Ukraine is proposed. The research was conducted in the period from February 2022 to February 2023. Temperature activity was determined in the Black Sea Biosphere Reserve and its adjacent territories, and areas of disturbance of the*

surface layer of the soil as a result of military operations were identified. The facts of fires, the presence of enemy military equipment, the construction of various fortification structures (trenches, trenches, shelters for equipment), the presence of firing positions, the location and movement of automobiles and other large vehicles have been proven. The proposed research can be used to monitor and document environmental crimes caused by military actions. The obtained results provide information to state authorities for decision-making regarding the preservation and restoration of valuable natural reserves and objects, and also allows forecasting changes in environmental risk due to military actions.

Keywords: impact of war; nature-protected areas; russian invasion; fires; remote sensing data.

О. Трофимчук¹, С. Загородня^{1,2}, В. Вишняков¹, В. Клименко¹, Н. Шевякіна¹, І. Радчук^{1,2}, О. Томченко³, С. Сластін⁴

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, Київ, Україна

²Факультет географії Кембриджського університету, Кембридж, Великобританія

³Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ, Україна

⁴Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Київ, Україна

КОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ПОРУШЕННЯ СТАНУ ЕКОСИСТЕМИ ЧОРНОМОРСЬКОГО БІОСФЕРНОГО ЗАПОВІДНИКА ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Анотація. Дана робота присвячена вивченню впливу військових дій на навколишнє середовище України на основі матеріалів дистанційного зондування Землі. Авторами запропоновано методіку визначення масштабів пожеж та ступеня шкоди природоохоронним об'єктам на прикладі Чорноморського біосферного заповідника. Зокрема, пожежі ідентифікуються за допомогою сервісу FIRMS, що в подальшому дозволяє встановити причини їх виникнення та спрогнозувати їх напрям поширення, і оцінити площі ураження. У роботі представлено результати супутникового моніторингу визначення осередків теплових аномалій, їх динаміку та масштаби ураження; представлено дослідження території затоплень внаслідок спуску водосховища; запропоновано підхід до комплексного моніторингу порушення стану екосистем природоохоронних територій України. Дослідження проводились в період з лютого 2022 року по лютий 2023 року. Визначено температурну активність у Чорноморському біосферному заповіднику та його прилеглих територіях, виявлено ділянки порушення поверхневого шару ґрунту внаслідок військових дій. Доведено факти пожеж, присутності ворожої військової техніки, будівництва різноманітних фортифікаційних споруд (траншей, окопів, укриття для техніки), наявності воєнних позицій, знаходження і пересування автомобільних та інших габаритних транспортних засобів. Запропоновані дослідження можуть бути використані для моніторингу та документування злочинів проти довкілля, спричинених військовими діями. Отримані результати надають інформацію державним органам для прийняття рішень щодо збереження та відновлення цінних природних заповідників і об'єктів, а також дозволяють прогнозувати зміни екологічного ризику внаслідок військових дій.

Ключові слова: вплив війни; природоохоронні території; російське вторгнення; пожежі; дані дистанційного зондування.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.94-112>

Вступ

Війна, яка триває в Україні, стала найбільшим збройним конфліктом у світі за останнє десятиліття, що спричинив безпрецедентні руйнування та спустошення природних ландшафтів країни. Використання важкої артилерії, авіаційного бомбардування та іншої зброї під час інтенсивних боїв призвело до знищення цінних природних заповідників і середовищ існування. Наразі, на території України є потенційні глобальні екологічні катастрофи, які можуть мати довготривалі наслідки та призвести до погіршення стану навколишнього середовища в майбутньому та знищення цінних унікальних екосистем, які відіграють вирішальну роль у функціонуванні природних систем.

Війна в Перській затоці між Іраком і Кувейтом була однією з перших великомасштабних екологічних катастроф, які ретельно спостерігалися за допомогою технологій дистанційного зондування, таких як AVHRR, Landsat і дані SPOT, щоб оцінити вплив розвитку міст, рослинності, прибережних водно-болотних угідь і піску, зміни дюни. У світлі цього, дослідження екологічних наслідків поточного конфлікту в Україні та винесення уроків з війни в Перській затоці є надзвичайно важливими для запобігання майбутнім екологічним катастрофам, спричиненим збройними конфліктами [1]. Одним з найбільш помітних наслідків збройного конфлікту є раптові зміни земного покриву. Розвиток ерозійних процесів внаслідок впливу лісових пожеж на природоохоронних територіях викликає велике занепокоєння. Такі зміни можуть призвести до зменшення біорізноманіття та втрати природних ресурсів. Крім того, збройний конфлікт може мати негативний вплив на здоров'я людей та тварин, а також на стан ґрунту та якість води. Зважаючи на це, необхідно приділяти більше уваги екологічним наслідкам збройних конфліктів та розробляти стратегії запобігання майбутнім екологічним катастрофам на світовому рівні. Це можна зробити шляхом збільшення уваги до екологічних проблем в процесі прийняття рішень з питань національної безпеки та розробки міжнародних договорів, спрямованих на зменшення впливу збройних конфліктів на навколишнє середовище. Внаслідок збройних конфліктів раптові зміни земного покриву є одними з найрізкіших повторюваних потрясінь в міжнародному масштабі.

Огляд літературних джерел. Згубний вплив лісових пожеж на більшість екосистемних послуг висвітлено в публікації [2]. В публікації [3] досліджено тему питання збереження біорізноманіття в зонах бойових дій, потенціал наукової та природоохоронної діяльності для зменшення негативного впливу на нього. За офіційними даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів [4] через військові дії 900 заповідних територій України сьогодні перебувають в небезпеці. Сюди увійшли 1,2 млн га або близько 30% площі всіх природоохоронних територій України. Під загрозою знищення наразі знаходяться 14 Рамсарських об'єктів площею 397,7 тис. га, близько 200 територій Смарагдової мережі площею 2,9 млн га, біосферні заповідники [5]. Особливою природоохоронною територією, яка зазнає впливу війни, є Чорноморський біосферний заповідник, що є унікальною надморською територією та найбільшим природним об'єктом, який перебуває під охороною в Україні. У 2014 році росія анексувала Крим, що призвело до зміни території Чорноморського біосферного заповідника. Космічний моніторинг змін території заповідника внаслідок військових дій проводили різні наукові

організації та установи. Міжнародний союз охорони природи (IUCN) провів оцінку стану Чорноморського біосферного заповідника, в якій було зазначено, що територія заповідника зазнала значних змін внаслідок військових дій та незаконної забудови [6]. З початком повномасштабного вторгнення росії на територію України Чорноморський біосферний заповідник зазнає ще більших руйнувань від війни. Близько 86% території заповідника знаходиться в акваторії Чорного моря, яка також зазнає негативних наслідків війни. У статті [7] авторами зазначено, що війна має серйозний вплив на природоохоронні об'єкти України, включаючи Чорноморський заповідник, зокрема, вони наводять приклади забруднення водних ресурсів та зниження рівня ґрунтових вод у зоні конфлікту.

Публікація [8] висвітлює результати соціально-екологічного моніторингу під час бойових дій в Україні з використанням супутникової інформації. У публікації [9] наведено використання даних ДЗЗ для вивчення екологічних наслідків російського вторгнення в Україну у 2022 році. Пожежі, що виникають у природних системах, є явищем з певними властивостями, серед яких підвищення температури поверхні та наявність (у більшості випадків) диму. Такі температурні аномалії можна відстежувати за допомогою методів дистанційного зондування [10]. Наприклад, точне виявлення активної пожежі і її картографування на супутникових зображеннях все ще є складним завданням для спільноти дистанційного зондування, яка в основному використовує традиційні методи. Методи глибокого навчання дали потужні результати в застосуванні дистанційного зондування [11].

Отже, метою роботи є дослідження екологічного стану територій Чорноморського біосферного заповідника, за допомогою супутникового моніторингу з використанням оптичних та радіолокаційних даних дистанційного зондування Землі. Основним завданням дослідження є отримання високоякісних тематичних карт, які дозволять оцінити екологічний стан природно-заповідних територій, ідентифікувати можливі загрози та розробити рекомендації щодо їх збереження та відновлення. Авторами запропоновано використання геоінформаційних технологій. Також пропонується використовувати інструменти ArcGIS ArcMap з модулями Spatial Analyst. Ефективним є врахування статистичних атрибутивних даних у табличному і текстовому форматах на досліджуваній області. Результати дослідження можуть бути використані для планування та прийняття рішень щодо управління природними ресурсами та охорони довкілля.

Територія досліджень. Автори досліджують територію Чорноморського біосферного заповідника (далі ЧБЗ), який розташований на території Херсонської та частково Миколаївської областей та акваторії Чорного моря. ЧБЗ є одним з найбільших та найважливіших заповідників України, що знаходиться в зоні конфлікту. Це найбільший морський заповідник України, один із найстаріших і найцінніших в нашій державі, який має статус біосферного і включений до Всесвітньої мережі біосферних резерватів ЮНЕСКО. Чорноморський заповідник був створений у 1927 році з метою вивчення та охорони природного середовища, зокрема масового гніздування та міграції птахів. На момент створення заповідник займав площу 27 тис. га. До 1976 року площа зросла до 64 806 га. Наразі, загальна площа складає 109 254 га [13, 14]. Територія заповідника охоплює північне узбережжя

Чорного моря, деякі острови та акваторію та складається з трьох ділянок: лісостепової, прибережної та острівної. Невеликі острови в Тендрівській та Ягорлицькій затоках, такі як Орлов, Смалений, Бабин, Довгий та інші, утворюють унікальні водно-болотні угіддя (рис. 1). На території ЧБЗ знаходяться водно-болотні угіддя міжнародного значення «Тендрівська затока», «Ягорлицька затока», а також території Смарагдової мережі Європи UA0000017 «Чорноморський біосферний заповідник», UA0000097 Національний природний парк «Білобережжя Святослава» та UA0000215 «Кінбурнська коса». Окрім зазначених природоохоронних об'єктів, в межах ЧБЗ розташовано ботанічні заказники, загальнозоологічний заказник, Національний історико-археологічний заповідник, ландшафтні заказники, лісові заказники, орнітологічний заказник. На рисунку 2 позначено розташування всіх об'єктів ПЗФ в межах ЧБЗ та на прилеглих територіях.



Рис. 1. Функціональне зонування Чорноморського біосферного заповідника

ЧБЗ – унікальний природоохоронний об'єкт, що є межею степу і моря, де знаходяться піщані кучугури, праліси та найбільші солончаки. Вздовж південного узбережжя зруйнованої війною країни, у колись захищеному місці, відомому як Біосфера Чорного моря, екологічні втрати війни вважаються приголомшливими та, можливо, найгіршими. Багато видів флори та фауни знаходяться під загрозою зникнення. У ЧБЗ мешкає понад 3 тис. видів безхребетних, близько 80 видів риб та більш як 60 видів тварин. Особливу роль заповідник відіграє у збереженні птахів, яких 306 видів. Заповідник не тільки значний пункт на шляху міграції, але й місце гніздування для таких унікальних видів, як дрохва, орлан-білохвіст, хохітва та інші.



Рис. 2. Карта розташування об'єктів ПЗФ в межах ЧБЗ та на прилеглих територіях. Цифрами на карті позначені наступні об'єкти ПЗФ:

1. Ботанічний заказник «Шаби»
2. Ботанічний заказник «Хрестова Сага»
3. Ботанічний заказник «Широка балка»
4. Ботанічний заказник «Софіївський»
5. Загальнозоологічний заказник «Бакайський жолоб»
6. Національний історико-археологічний заповідник «Ольвія»
7. Ландшафтний заказник «Боброве озеро»
8. Ландшафтний заказник «Станіславський»
9. Ландшафтний заказник «Олександрівський»
10. Лісовий заказник загальнодержавного значення «Березові колки»
11. Лісовий заказник «Бакайський»
12. Орнітологічний заказник «Ягорлицький»
13. Національний природний парк «Білобережжя Святослава»

Військові дії можуть мати широкий спектр негативних наслідків, які стосуються як прямого, так і непрямого впливу на екосистему заповідника. Прямий вплив війни на ЧБЗ включає пошкодження природних територій, втрату рослинності, знищення життєвих просторів для тварин та руйнування екосистем. Активні бойові дії можуть призвести до безпосереднього знищення різноманітних форм життя та природних біотопів, що є невід'ємною частиною біосферного заповідника. Непрямий вплив війни може включати забруднення навколишнього середовища через виливи нафти, хімічних речовин або інших небезпечних речовин. Це може призвести до серйозного забруднення ґрунту, водних джерел та морського середовища. Крім того, військові дії можуть спричинити переривання природних процесів, таких як міграція птахів та морських ссавців, порушення балансу харчування, зруйнування гніздових місць та місць розмноження різних видів. Через російську окупацію ЧБЗ найбільше страждає від пожеж, що впливають на гніздування птахів в тому числі. Птахи змушені шукати інші місця для проживання і гніздування, а це призводить до суттєвих екосистемних змін. Іншою вразливою групою птахів

від військових дій є види, що гніздяться в лісах. Найбільшими ризиками в таких екосистемах для птахів є розлякування в результаті бойових дій, вирубування лісу, пожежі (внаслідок обстрілів та свідоме підпалювання) тощо. Внаслідок обстрілів у 2022 році на території Кінбурнської коси періодично виникали пожежі. За період з березня по червень 2022 року вогонь знищив 1640 гектарів насаджень у межах Національного природного парку «Білобережжя Святослава» та 200 гектарів на території Регіонального ландшафтного парку «Кінбурнська коса» [14]. Через підлив росіянами 6 червня 2023 року Каховської ГЕС під удар потрапили території, що мають міжнародні природоохоронні статуси, зокрема Рамсарські угіддя, об'єкти Смарагдової мережі. Окрім ЧБЗ, постраждали три національні природні парки – Нижньодніпровський, «Білобережжя Святослава» та Олешківські піски. У біді й велика кількість малих об'єктів: заказники, пам'ятки природи й садово-паркового мистецтва, регіональний ландшафтний парк «Кінбурнська коса» [15]. Дослідження [9, 16] підтверджують той факт, що військові дії мають значний вплив на територію Чорноморського біосферного заповідника та природні ресурси в цілому. Для здійснення якісного моніторингу, контролю та оперативного прийняття рішень необхідно мати достовірну, точну та своєчасну інформацію про виникнення надзвичайних ситуацій. З точки зору отримання уніфікованої та базової інформації, найбільш перспективним та ефективним є спостереження за природними територіями з космосу. Картографічне моделювання та геоінформаційні інструменти дозволяють не лише відображати вже відомі просторові закономірності, але й проводити аналіз, виявляти та візуалізувати взаємозв'язки між джерелами забруднення та якістю ґрунтів і вод, визначати джерела забруднення, здійснювати поділ територій за факторами їх забруднення, в тому числі в умовах недостатньої кількості даних [17].

Методи досліджень. Супутникові зображення широко використовуються для активного виявлення пожеж через їх глобальне покриття. Проте точне виявлення початку локалізації активної пожежі під час її картографування на супутникових зображеннях все ще є складним завданням для науковців/дослідників, які в основному використовують традиційні методи. У світі найбільш ефективним є моніторинг температурних явищ [18] на основі даних про місцезнаходження пожеж, отриманих за допомогою сервісу FIRMS (Fire Information for Resource Management System), розробленого в Університеті Меріленда і підтримуваного Національним управлінням з авіонавтики і дослідження космічного простору США (NASA). Ця система (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>) надає дані про пожежі, виявлені супутниковими датчиками MODIS та VIIRS за поточну добу або за останні 24 години, на вибір користувача, для будь-якої частини світу. Вищезазначені системи зазвичай використовують інформацію з космічних апаратів: Sentinel-2 (MSI), NOAA (AVHRR), TERRA/AQUA (MODIS), SUOMI NPP(VIIRS), Landsat (TIR) [19–20]. Супутники проходять над кожною точкою земної поверхні двічі на день, і їхні інфрачервоні датчики можуть виявити джерела тепла на площі приблизно 400 на 400 метрів. Дані можна отримати в різних форматах, включаючи формат KML, який є найпростішим для більшості користувачів. Оперативні та архівні дані з 2000 року представлені на сайті і доступні для завантаження в різних форматах, їх також можна отримати через електронну пошту [19]. Дані багатоспектрального приладу Sentinel-2 (MSI)

демонструють великий потенціал розширеного просторового і часового покриття для моніторингу горіння біомаси, що може доповнити інші грубі продукти активного виявлення пожеж. Таким чином, супутниковий моніторинг території ЧБЗ здійснювався з використанням оптичних даних дистанційного зондування Землі високої та надвисокої просторової розрізненості – Sentinel-2A (10 м), SkySat (0,5 м), WorldView 01-03 (0,5 м), радіолокаційних даних ДЗЗ – Sentinel-1A, Capella, CSM, RCM1, ICEYE.

Методи детектування пожеж базуються на використанні аномальних теплових характеристик поверхні, які визначено рівнянням (1). Тому, методи детектування за даними ДЗЗ мають базуватися на аналізі температур яскравості в окремих спектральних каналах. Температура поверхні, відповідно до калібрувальних умов більшості супутникових сенсорів, визначається з виразу [21]:

$$T = \frac{hc}{k\lambda} \cdot \frac{1}{\ln(2hc^2\lambda^{-5}L^{-1}+1)c_1}, \quad (1)$$

де h – постійна Планка (Дж·с);

c – швидкість світла у вакуумі (м/с);

k – газова константа Больцмана (Дж/К);

λ – довжина хвилі (м);

T – яскравісна температура (К);

L – яскравість ділянки ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\text{стер}^{-1}\text{м}^{-1}$), яка визначається коефіцієнтом відбиття r_λ .

Важливим показником для обробки даних ДЗЗ є температура насичення, що є максимально можливою температурою, яку можна практично зафіксувати на певній довжині хвилі. Не менш важливим чинником є температура яскравості, яка відповідає умовам горіння і може бути зафіксована в окремих спектральних каналах.

Для обробки даних ДЗЗ використовують наступні методи визначення показників температурних явищ з метою визначення осередків пожеж [21, 22]:

1) Кауфмана (1991 рік):

$$T3 > 316, T3-T4 > 10, T4 > 250, \quad (2)$$

де $T3, T4, T5$ – яскравісна температура в 3-, 4- і 5-му каналах апаратури AVHRR відповідно;

2) Франса (1993 рік):

$$T3 > 320, T3-T4 > 15,0 < (T3 - T4) < 5, A1 > 9\%, \quad (3)$$

де $A1$ – значення альbedo в 1-му каналі;

3) Кеннеді (1994 рік):

$$T3 > 320, T3-T4 > 10, A2 < 16\%, \quad (4)$$

де $A2$ – значення альbedo в 2-му каналі.

Алгоритм виявлення пожежі базується на значній різниці температур між поверхнею землі (зазвичай не вище 10–25°C) і джерелом пожежі (300–900°C) [22].

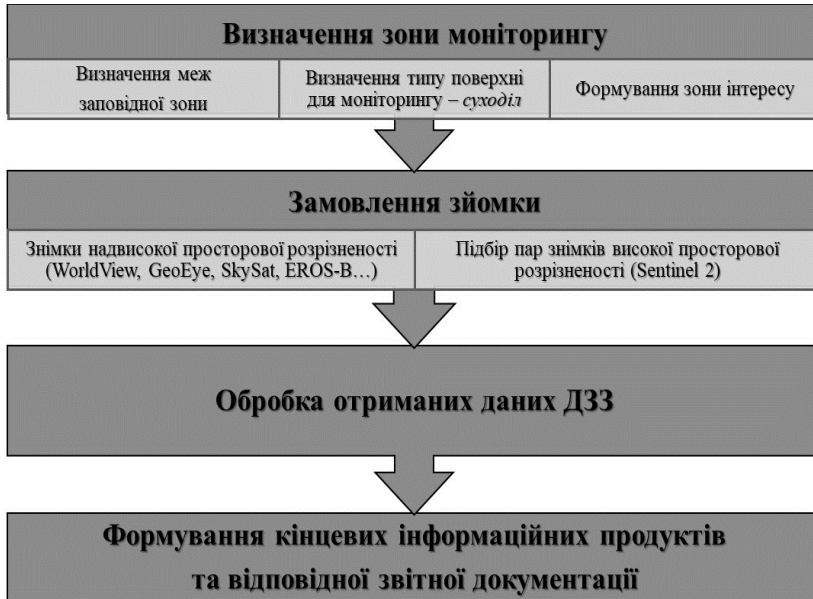


Рис. 3. Схема методології дослідження

Таким чином, у дослідженні щодо виявлення порушень стану екосистеми ЧБЗ внаслідок військових дій було залучено методи космічного моніторингу за методологією, що представлена на рисунку 3. Авторами було проведено моніторинг стану підстильної поверхні та виявлено зони порушення поверхневого шару ґрунту внаслідок військових дій на території заповідних зон за наступною методологією:

1. Визначити зону моніторингу:

- визначення меж заповідної зони таких природоохоронних об'єктів, як ЧБЗ та НПП «Білобережжя Святослава»;
- визначення типу поверхні для моніторингу – суходіл;
- формування зони інтересу.

2. Замовлення зйомки:

- надвисокої просторової розрізненості (WorldView, GeoEye, SkySat, EROS-B...);
- підбір пар знімків високої просторової розрізненості (Sentinel-2).

3. Оброблення даних ДЗЗ.

4. Формування кінцевих інформаційних продуктів та відповідної звітної документації.

Використана методологія надає змогу аналізувати природоохоронні території, які постраждали від військових дій. Вона забезпечить можливість отримання даних ДЗЗ із низькою та середньою просторовою дисперсією з певними температурними аномаліями та негайної їх обробки. Отримані інформаційні результати надаються користувачам в зручних форматах та забезпечують можливість отримання детальних даних ДЗЗ. За їх допомогою

можна фіксувати чи ідентифікувати зміни у лісових насадженнях, пов'язані з пожежами, виявити ділянки порушення поверхні ґрунту внаслідок бойових дій та створити тематичні карти.

Результати та їх обговорення

Для дослідження температурної активності на території України за описаною вище методикою авторами були використані дані FIRMS за період з лютого 2022 року по лютий 2023 року. Супутниковий моніторинг здійснювався з використанням оптичних даних ДЗЗ високої та надвисокої просторової розрізненості – Sentinel-2A (10 м), SkySat (0,5 м), WorldView 01-03 (0,5 м), радіолокаційних даних ДЗЗ – Sentinel-1A, Capella, CSM, RCM1, ICEYE. За результатами проведеної роботи було сформовано 2 тематичних карти та 38 ситуаційних карт. Наявність такої кількості ситуаційних карт надає можливість проводити якісний моніторинг та визначити стан зазначених територій, при цьому довести факти порушень екосистеми ЧЗБ внаслідок військових дій.

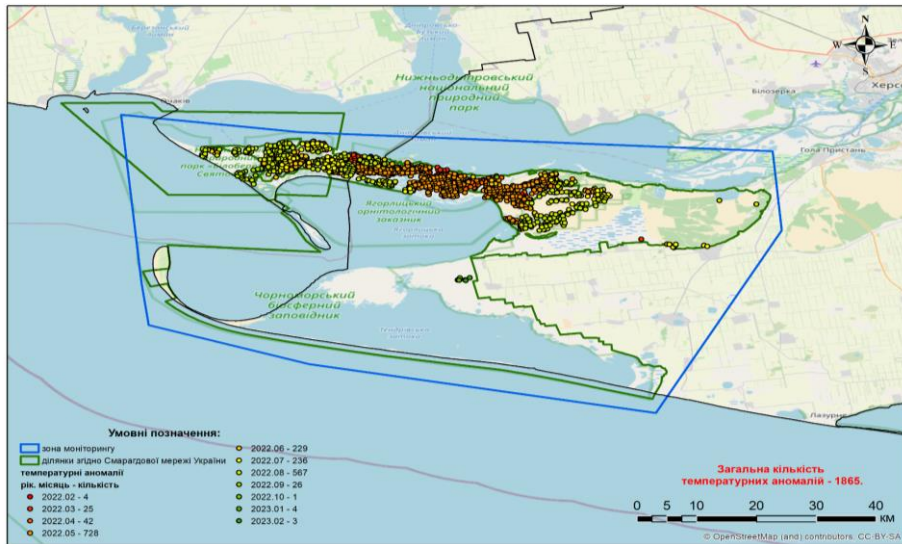


Рис. 4. Тематична карта температурних аномалій на території зони моніторингу в Херсонській та Миколаївській областях у період з 02.2022 по 02.2023

На рисунку 4 представлено розташування виявлених температурних аномалій на території дослідження, а саме природоохоронних територіях та акваторії Чорноморського біосферного заповідника та Національного природного парку «Білобережжя Святослава» у Херсонській та Миколаївській областях. Визначено місця виникнення пожеж, зокрема в межах заповідної зони на території Кінбурнського півострова, центральна частина якої була у вогні перші місяці повномасштабного вторгнення. У травні 2022 року було виявлено наймасштабніші пожежі та найбільша їх кількість, а саме – 728 теплових аномалій. Протягом літа та осені 2022 року територіальний розподіл температурних аномалій був рівномірним по всій території дослідження.

За даними системи моніторингу температурних аномалій з використанням даних ДЗЗ на території України в зоні моніторингу (рис. 4) за період з лютого 2022 року по лютий 2023 року всього було зафіксовано 1865 температурних аномалій і визначено їх кількості відповідно по місяцях. Діаграма виявлених ймовірних пожеж (рис. 5) показує розподіл теплових аномалій за місяцями з лютого 2022 року по лютий 2023 року, максимальна кількість яких була зафіксована у період з травня по серпень 2022 року. Так, у травні 2022 року зафіксовано 728 теплових аномалій, у червні – 229, у липні – 236 та у серпні відповідно 567 теплових аномалій. Це свідчить про активні бойові дії на території дослідження саме в період з травня по серпень 2022 року. Літній період сприяв масштабному поширенню пожеж, заблокований доступ до осередків вогню та неможливість вчасно зупинити поширення пожежі відповідними службами катастрофічно вплинули на стан екосистеми досліджуваної території. В результаті втрачено осередки рідкісних екосистем, під загрозою знищення знаходиться велика кількість рідкісних видів рослин і тварин, що населяють заповідник.



Рис. 5. Діаграма теплових аномалій в зоні моніторингу за даними FIRMS з лютого 2022 року по лютий 2023 року

Всі виявлені теплові аномалії проаналізовано та встановлено їхні координати. Отримано KML-файл активних пожеж, знайдено та завантажено супутникові знімки (Sentinel-2, WorldView 03 та Landsat 9) на територію за встановленими координатами теплових аномалій, що зроблені у визначені дати. Наступним кроком було опрацювання отриманих космічних зображень.

Так, для визначення динаміки поширення наймасштабнішої пожежі у травні 2022 року на території Чорноморського біосферного заповідника було проаналізовано космічні знімки Landsat 9 за 5.05.2022, Sentinel-2 за 9.05.2022, Sentinel-2 за 12.08.2022, Sentinel-2 за 23.06.2023, зображення яких представлено на рисунку 6. В результаті обробки зазначених космічних знімків проведено оцінку постраждалих територій Солоозерної ділянки Чорноморського біосферного заповідника. Внаслідок пожежі, яка сталася 5-9 травня 2022 року, на ділянці «Солоозерний» Чорноморського біосферного

заповідника згоріло 12 км² рідкісної степової рослинності. Серед вигорілої рослинності дуб звичайний, береза дніпровська ендемічна, груша звичайна, зарості степових чагарників. Загалом у транскордонній зоні заказника втрачено близько 35 км² лісу.

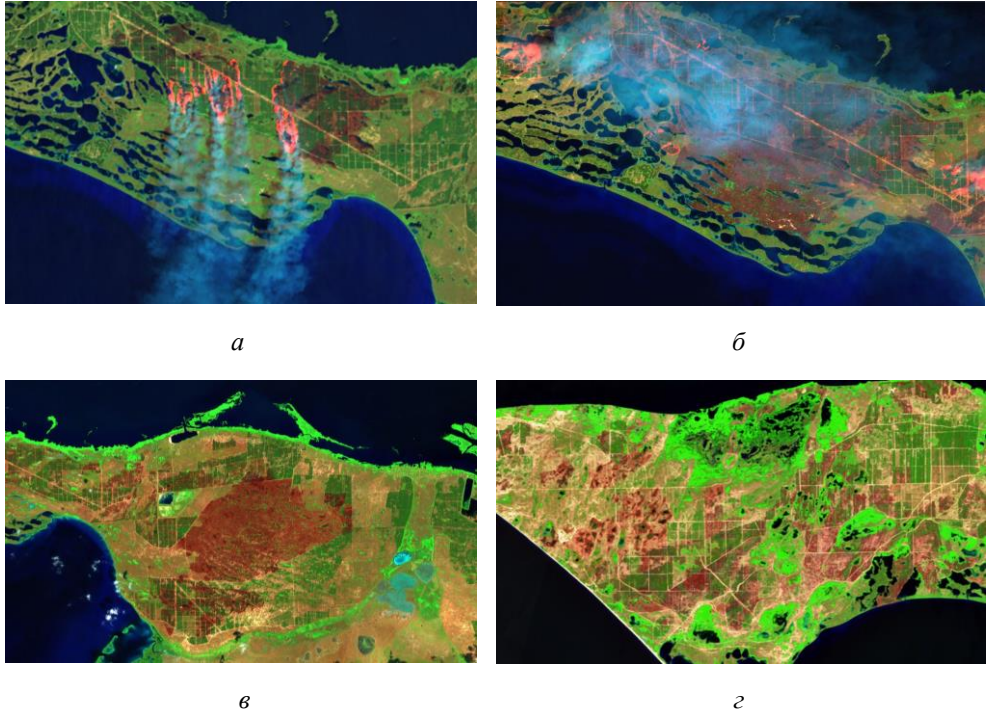


Рис. 6. Приклади поширення пожежі на території Чорноморського біосферного заповідника, де свіжовигоріла степова рослинність має коричневий колір, на фрагментах космічних знімків: *а* – Landsat 9 за 5.05.2022; *б* – КЗ Sentinel-2 за 9.05.2022; *в* – Sentinel-2 за 12.08.2022; *z* – Sentinel-2 за 23.06.2023

Окрім виявлення теплових аномалій на супутникових знімках, що свідчить про численні пожежі, авторами було проаналізовано космічні зображення для виявлення присутності ворожої військової техніки, будівництва різноманітних фортифікаційних споруд (траншей, окопів, укриття для техніки), наявності вогневих позицій, знаходження і пересування автомобільних та інших габаритних транспортних засобів, а також надводних та затоплених плавзасобів для встановлення доказів впливу військових дій на природно-заповідну територію ЧБЗ.

Так, було проаналізовано дані супутникової зйомки з космічного апарату WorldView 03 станом на 14:41 год. (за київським часом) 3 червня 2022 року на ділянку території Кінбурнського півострова (рис. 7). В зоні зйомки ідентифіковано більше 2100 га знищеної поверхні природно-заповідної зони внаслідок будівництва різноманітних фортифікаційних споруд (траншей, окопів, укриття для техніки), вогневих позицій, вирв, зруйнованих будівель та згарищ. В результаті обробки даних дистанційного зондування Землі були виявлені факти присутності військової (499 од.) та автомобільної (45 од.) техніки та численні ознаки її пересування по пересіченій місцевості.

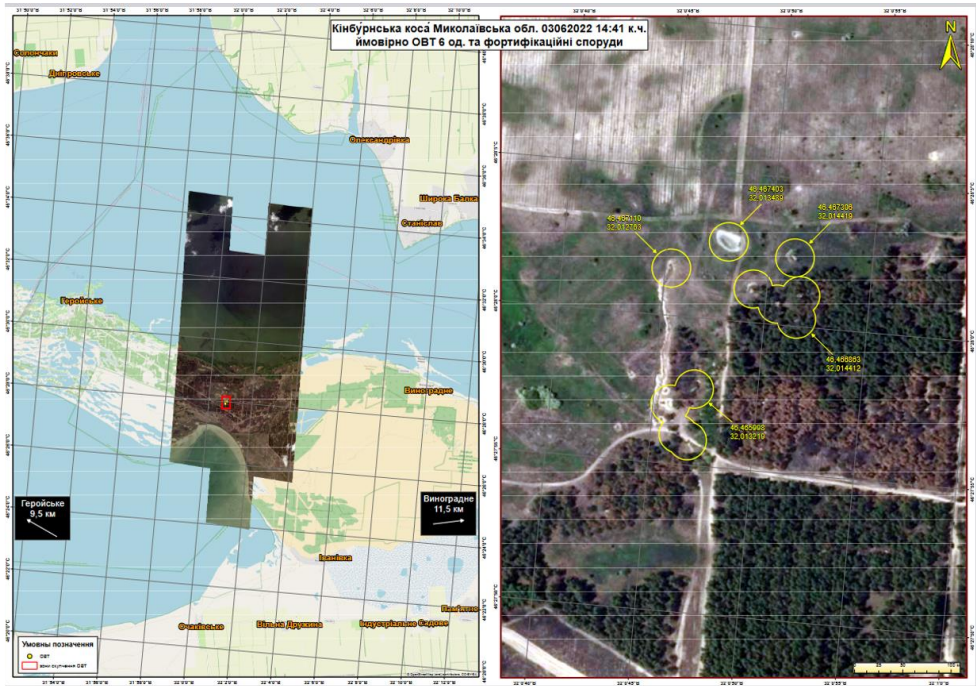


Рис. 7. Виявлення фортифікаційних споруд і військової техніки на території Кінбурнського півострова. Супутникові знімки WorldView 03, станом на 14:41 год. (за київським часом) 3 червня 2022 року

Для визначення динаміки військового впливу та виявлення змін на досліджуваній території було проаналізовано космічні знімки, зроблені у березні 2023 року. За даними супутникової зйомки з космічного апарату WorldView 03 станом на 10:58 (за київським часом) 13.03.2023 в зоні зйомки було ідентифіковано 22,2 км траншей, 21 км² згарищ, 159 вирв від снарядів загальною площею 6 406 м² та 60 од. військових транспортних засобів. Загалом, за наявними даними супутникової зйомки поблизу території суходолу Чорноморського біосферного заповідника було виявлено розташування 1751 од. різноманітних військових об'єктів, з них: зразків ОіВТ – 499 од., фортифікаційних споруд обладнання місцевості – 1189 од., засобів автомобільної та габаритної техніки – 45 од., вогневих позицій ОіВТ і, зокрема, РСЗВ – 11 од.

Розташування значної кількості окупаційної військової техніки та особового складу військ у природно-заповідних зонах веде до призупинення гніздування рідкісних видів птахів, призводить до порушення місць їх оселення, знищення причорноморських ландшафтів і, як наслідок, кормової бази для рідкісних та червонокнижних видів тварин, комах, паукоподібних тощо.

Окупаційними силами російської федерації близько 2:50 ночі (за київським часом) 6 червня 2023 року було здійснений черговий акт екоциду, а саме знищення греблі Каховської гідроелектростанції [15]. В зоні підтоплення опинилося м. Гола Пристань, де знаходиться адміністрація ЧБЗ. Площа з підвищеним рівнем води в межах Кінбурнської коси на 9 травня становила близько 23 км² (рис. 8), зокрема техногенного впливу зазнала природоохоронна ділянка ЧБЗ «Волжин ліс».

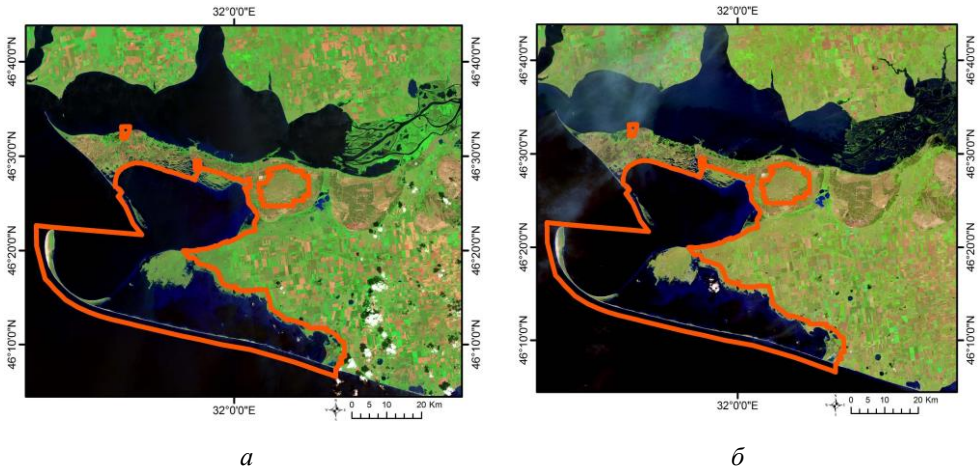


Рис. 8. Вигляд Чорноморського біосферного заповідника на космічних знімках Landsat-8-9 до, за 01.06.2023 (а), та під час, за 09.06.2023 (б), спуску Каховського водосховища

Підрив Каховської греблі матиме негативні наслідки і для Чорного моря. В море потрапляє велика кількість прісної води, забрудненої паливно-мастильними матеріалами, добривами, стічними водами із затоплених населених пунктів та полів. Додатково джерелом вторинного забруднення можуть стати і донні відклади Каховського водосховища, де десятиліттями накопичувалися викиди промислових підприємств [22]. Все це негативно впливатиме на всі живі організми в Чорноморському регіоні, змінюючи екосистеми і порушуючи харчові ланцюги. Нижче за течією знаходяться території і акваторії, що охороняються на національному рівні та є територіями міжнародного значення: Дніпровсько-Бузький лиман, Кінбурнська коса, національні природні парки «Білобережжя Святослава», «Олешківські піски» та інші.

На основі отриманих у статті результатів авторами доведено ефективність застосування методів дистанційного зондування Землі для проведення моніторингових досліджень з виявлення ділянок порушення поверхневого шару ґрунту внаслідок військових дій. Подібні дослідження вказують на необхідність збільшити періодичність дослідження зазначених територій. Постійний моніторинг буде сприяти якісному аналізу впливу військових дій та доводить факти присутності ворожої військової техніки, будівництва різноманітних фортифікаційних споруд, наявності вогневих позицій, знаходження і пересування автомобільних та інших габаритних транспортних засобів. У представленій публікації особливу увагу приділено дослідженню природно-заповідних комплексів з урахуванням цінності заповідної території. Авторами було досліджено територію одного з постраждалих заповідних регіонів України. А саме, досліджено території та акваторії Чорноморського біосферного заповідника та Національного природного парку «Білобережжя Святослава» у Херсонській та Миколаївській областях.

Висновки

Вплив війни, яка триває в Україні, на цінні природоохоронні об'єкти, такі як Чорноморський біосферний заповідник, викликає серйозні занепокоєння щодо можливості збереження природи та біологічного різноманіття. За результатами супутникового моніторингу заповідних територій Чорноморського біосферного заповідника та національного природного парку «Білобережжя Святослава» у Херсонській та Миколаївській областях, у період з лютого 2022 року по лютий 2023 року зафіксовано 1865 температурних аномалій, максимальна кількість яких зафіксована у травні, влітку та на початку осені 2022 року. Загалом в зоні моніторингу за наявними супутниковими знімками встановлено місцезнаходження 1751 одиниці різноманітних військових об'єктів, у тому числі: зразків озброєння та військової техніки – 499 одиниць, фортифікацій місцевої техніки – 1189 одиниць, транспортної та великогабаритної техніки – 45 одиниць, вогневих позицій озброєння та військової техніки і, зокрема, РСЗВ – 11 одиниць. Доведено, що розв'язана росією війна завдає великої шкоди природоохоронним територіям України. Дослідження підтверджує необхідність вжиття невідкладних заходів для захисту Чорноморського біосферного заповідника від військових дій. Важливими є моніторинг стану природних територій та біорізноманіття, встановлення заходів контролю за забрудненням та реконструкція пошкоджених екосистем. Оцінки супутникових спостережень свідчать про те, що ситуація з цих питань змінюється на гірше. Оскільки в Україні триває війна, проведення космічного моніторингу для виявлення порушень стану екосистеми ЧБЗ внаслідок військових дій є надзвичайно актуальним та вкрай необхідним. Надважливо оцінювати шкоду, яку завдала і продовжує завдавати російська армія внаслідок повномасштабної війни на території України. Представлені результати дослідження сприяють ефективному плануванню відповідних заходів для оцінки змін у навколишньому середовищі та прийняття рішень щодо його захисту та відновлення. В майбутньому ці дані будуть необхідні для рекреаційної та пов'язаної з нею додаткової діяльності зі збереження довкілля.

Acknowledgments. The authors S. Zahorodnia, I. Radchuk express their gratitude to the Department of Geography of the University of Cambridge for their support in continuing research with the aim of improving academic qualifications.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Stephens, George, and Michael Matson. "Monitoring the Persian Gulf War with NOAA AVHRR Data." *International Journal of Remote Sensing* 14.7 (1993): 1423-429. DOI: 10.1080/01431169308953976
2. Pereira, Paulo, Igor Bogunovic, Wenwu Zhao, and Damia Barcelo. "Short-term Effect of Wildfires and Prescribed Fires on Ecosystem Services." *Current Opinion in Environmental Science & Health* 22 (2021): 100266. DOI: 10.1016/j.coesh.2021.100266
3. Hanson, Thor "Biodiversity Conservation and Armed Conflict: A Warfare Ecology Perspective." *Annals of the New York Academy of Sciences* 1429.1 (2018): 50-65. DOI: 10.1111/nyas.13689

4. Дайджест ключових наслідків російської агресії для українського довкілля 20 травня 2022 р. Офіційний портал Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України 2022 р. <https://mepr.gov.ua/news/39218.html>
5. Шкода довкіллю від війни. <https://mepr.gov.ua/topics/novyny/zbytky-dovkillyu-vid-vijny/> [дата звернення 10.06.23].
6. Війна між Росією та Україною – екологічна катастрофа. <https://www.iucn.org/news/commission-environmental-economic-and-social-policy/202203/war-between-russia-and-ukraine-environmental-disaster> [дата звернення 04.05.23].
7. Rawtani, Deepak, Gunjan Gupta, Nitasha Khatri, Piyush K. Rao, and Chaudhery Mustansar Hussain. "Environmental Damages Due to War in Ukraine: A Perspective." *The Science of the Total Environment* 850 (2022): 157932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932>
8. Yelistratova, L.O., O.A. Apostolov, A.Ya. Khodorovskiy, A.V. Khyzhniak, O.V. Tomchenko, and V.I. Lialko. "Use of satellite information for evaluation of socio-economic consequences of the war in Ukraine." *Ukrainian Geographical Journal* 2022.2 (2022): 11-18. DOI: 10.15407/ugz2022.02.011
9. Trofymchuk, Oleksandr, Vyacheslav Vishnyakov, Natalia Sheviakina, Viktoriia Klymenko, and Olha Tomchenko. "Detection of thermal anomalies as a result of military actions in Ukraine by remote sensing methods." *International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM 22.2* (2022): 303-13. DOI: 10.5593/sgem2022/2.1/s10.35
10. Belenok, Vadym, Liliia Hebryn-Baidy, Nataliia Bielousova, Valeriy Gladilin, Sergiy Kryachok, Andrii Tereshchenko, Sofiia Alpert, and Sergii Bodnar. "Machine Learning Based Combinatorial Analysis for Land Use and Land Cover Assessment in Kyiv City (Ukraine)." *Journal of Applied Remote Sensing*, 17.1 (2023): 014506. DOI: 10.1117/1.JRS.17.014506
11. Kaplan, Gordana, Tatjana Rashid, Mateo Gasparovic, Andrea Pietrelli, and Vincenzo Ferrara. "Monitoring War-generated Environmental Security Using Remote Sensing: A Review." *Land Degradation & Development* 33.10 (2022): 1513-526. DOI: 10.1002/ldr.4249
12. Serhii, A. Shevchuk, Viktor I. Vyshnevskiy, and Olena P. Bilous. "The Use of Remote Sensing Data for Investigation of Environmental Consequences of Russia-Ukraine War." *Journal of Landscape Ecology (Berlin, Germany)* 15.3 (2022): 36-53. DOI:10.21203/rs.3.rs-1770802/v1
13. Чорноморський біосферний резерват. <https://wownature.in.ua/oberihaymo/biosferni-rezervaty-v-ukraini/chornomorskuu-biosfernyu-rezervat/> [дата звернення 04.05.23].
14. Чорноморський біосферний заповідник. Перлина Північного Причорномор'я: науково-популярне видання. – Херсон: Наддніпряночка, 2013. 148 с.
15. Підriv Каховської ГЕС. https://uk.wikipedia.org/wiki/Підriv_Каховської_ГЕС#cite_note-24 [дата звернення 10.06.23].
16. <https://wownature.in.ua/u-berezni-vykraly-odnoho-pratsivnyka-mynuloho-tyzhnia-shchednoho-iak-pratsiuie-natsionalnyu-pryrodnyu-park-biloberezhzhia-sviatoslava-pid-chas-viyny/> [дата звернення 04.06.23].
17. Trofymchuk O., Zahorodnya S., Sheviakina N., Radchuk I., Tomchenko O. "Remote Sensing Monitoring of Biotopes Distribution within Nature Reserve Area". *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*. Vol. 76. No. 3. p. 109-120, 2020. DOI: 10.5755/j01.ere.m.76.3.25204
18. Belenok, Vadim, Tomasz Noszczyk, Liliia Hebryn-Baidy, and Sergiy Kryachok. "Investigating Anthropogenically Transformed Landscapes with Remote Sensing." *Remote Sensing Applications* 24 (2021): 100635. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100635
19. Scorched Earth: Using NASA Fire Data to Monitor War Zones 2022. <https://www.bellingcat.com/resources/2022/10/04/scorched-earth-using-nasa-fire-data-to-monitor-war-zones/> [accessed 04.06.23].
20. Overview. ESA Sentinel Online. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-%20msi/overview> [дата звернення 04.06.23].

21. Kostyuchenko Yu.V., Yushchenko M.V., Kopachevskiy I.M., Levynsky S. A procedure for integrated assessment of landscape fire risk using remote sensing data. *Space science and technology*, 17(6), 30–44, 2011. DOI: 10.15407/knit2011.06.030
22. Justice, C. O., L. Giglio, S. Korontzi, J. Owens, J. T. Morisette, D. Roy, J. Descloitres, S. Alleaume, F. Petitcolin, and Y. Kaufman. "The MODIS Fire Products". *Remote Sensing of Environment* 83.1-2 (2002): 244-62. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00076-7
23. <https://ecoaction.org.ua/vplyv-viiny-na-moria.html> [дата звернення 10.06.23].

Стаття надійшла до редакції 16.05.2023 і прийнята до друку після рецензування 01.09.2023

REFERENCES

1. Stephens, G., & Matson M. (1993). Monitoring the Persian Gulf War with NOAA AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 14.7, 1423-429. <https://doi.org/10.1080/01431169308953976>
2. Pereira, P., Bogunovic, I., Zhao, W., & Barcelo, D. (2021). Short-term Effect of Wildfires and Prescribed Fires on Ecosystem Services. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 22, 100266. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100266>
3. Hanson, T. (2018). Biodiversity Conservation and Armed Conflict: A Warfare Ecology Perspective. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1429.1, 50-65. <https://doi.org/10.1111/nyas.13689>
4. Digest of the key consequences of Russian aggression for the Ukrainian environment. (May 20, 2022). Official portal of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine 2022. Retrieved from: <https://mepr.gov.ua/news/39218.html>
5. Damage to the environment from war. Retrieved June, 10, 2023 from: <https://mepr.gov.ua/topics/novyny/zbytky-dovkillyu-vid-vijny/>
6. The war between Russia and Ukraine is an ecological disaster. Retrieved May, 04, 2023 from: <https://www.iucn.org/news/commission-environmental-economic-and-social-policy/202203/war-between-russia-and-ukraine-environmental-disaster>
7. Rawtani, Deepak, Gunjan Gupta, Nitasha Khatri, Piyush K. Rao, & Chaudhery Mustansar Hussain. (2022). Environmental Damages Due to War in Ukraine: A Perspective. *The Science of the Total Environment*, 850, 157932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932>
8. Yelistratova, L.O., Apostolov, O.A., Khodorovskiy, A.Ya., Khyzhniak, A.V., Tomchenko, O.V., & Lialko, V.I. (2022). Use of satellite information for evaluation of socio-economic consequences of the war in Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*, 2, 11-18. <https://doi.org/10.15407/ugz2022.02.011>
9. Trofymchuk, Oleksandr, Vyacheslav Vishnyakov, Natalia Sheviakina, Viktoriia Klymenko, and Olha Tomchenko. "Detection of thermal anomalies as a result of military actions in Ukraine by remote sensing methods." *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM 22.2* (2022): 303-13. <https://doi.org/10.5593/sgem2022/2.1/s10.35>
10. Belenok, V., Hebryn-Baidy, L., Bielousova, N., Gladilin, V., Kryachok, S., Tereshchenko, A., Alpert, S., & Bodnar, S. (2023). Machine Learning Based Combinatorial Analysis for Land Use and Land Cover Assessment in Kyiv City (Ukraine). *Journal of Applied Remote Sensing*, 17.1, 014506. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.17.014506>
11. Kaplan, G., Rashid, T., Gasparovic, M., Pietrelli, A., & Ferrara, V. (2022). Monitoring War-generated Environmental Security Using Remote Sensing: A Review. *Land Degradation & Development*, 33.10, 1513-526. <https://doi.org/10.1002/ldr.4249>
12. Shevchuk, S.A., Vyshnevskiy, V.I., & Bilous O.P. (2022). The Use of Remote Sensing Data for Investigation of Environmental Consequences of Russia-Ukraine War. *Journal of Landscape Ecology (Berlin, Germany)*, 15.3, 36-53. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1770802/v1>

13. Black Sea Biosphere Reserve. Retrieved May, 04, 2023 from: <https://wownature.in.ua/oberihaymo/biosferni-rezervaty-v-ukraini/chornomorskyi-biosfernyi-rezervat/>
14. Black Sea Biosphere Reserve. Pearl of the Northern Black Sea: popular science publication. (2013). Kherson: Naddniproianochka.
15. Undermining Kakhovskaya HPP. Retrieved June, 10, 2023 from: https://uk.wikipedia.org/wiki/Підрив_Каховської_ГЕС#citenote-24
16. Retrieved May, 04, 2023 from: <https://wownature.in.ua/u-berezni-vykraly-odnoho-pratsivnyka-mynuloho-tyzhnia-shche-odnoho-iaak-pratsiuie-natsionalnyy-pryrodnyy-park-biloberezhzhia-sviatoslava-pid-chas-viyny/>
17. Trofymchuk, O., Zahorodnya, S., Sheviakina, N., Radchuk, I., & Tomchenko, O. (2020). Remote Sensing Monitoring of Biotopes Distribution within Nature Reserve Area. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 76 (3), 109-120. <https://doi.org/10.5755/j01.arem.76.3.25204>
18. Belenok, V., Noszczyk, T., Hebryn-Baidy, L., & Kryachok, S. (2021). Investigating Anthropogenically Transformed Landscapes with Remote Sensing. *Remote Sensing Applications*, 24, 100635. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100635>
19. Scorched Earth: Using NASA Fire Data to Monitor War Zones. (2022). Retrieved June, 4, 2023 from: <https://www.bellingcat.com/resources/2022/10/04/scorched-earth-using-nasa-fire-data-to-monitor-war-zones/>
20. Overview. ESA Sentinel Online. Retrieved June, 4, 2023 from: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-%20msi/overview>
21. Kostyuchenko, Yu.V., Yushchenko, M.V., Kopachevskyi, I.M., & Levynsky, S. (2011). A procedure for integrated assessment of landscape fire risk using remote sensing data. *Space science and technology*, 17(6), 30–44. <https://doi.org/10.15407/knit2011.06.030>
22. Justice, C.O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J. T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., & Kaufman, Y. (2002). The MODIS Fire Products. *Remote Sensing of Environment*, 83.1-2, 244-62. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00076-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00076-7)
23. Retrieved June, 10, 2023 from: <https://ecoaction.org.ua/vplyv-viyny-na-moria.html>

The article was received 16.05.2023 and was accepted after revision 01.09.2023

Трофимчук Олександр Миколайович

член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, Директор Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274>

Загородня Сніжана Анатоліївна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України, Академічний факультет географії Кембриджського університету, Кембридж, Великобританія

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4332-4211> **e-mail:** zagorodnya.s@gmail.com

Вишняков В'ячеслав Юрійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник за сумісництвом відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2057-0505> **e-mail:** wishnya_dzz@ukr.net

Клименко Вікторія Ігорівна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Учений секретар Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8911-5773>

Шевякіна Наталя Анатоліївна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5984-5580> **e-mail:** n.a.sheviakina@gmail.com

Радчук Ігор Валентинович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України, Академічний факультет географії Кембриджського університету, Кембридж, Великобританія

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4999-1258> **e-mail:** igor.radchuk.v@gmail.com

Томченко Ольга Володимирівна

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України»

Адреса робоча: вул. О. Гончара 55-б, 01601 Київ 54, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6975-9099> **e-mail:** olhatomch@gmail.com

Сластін Сергій Олександрович

начальник групи обробки супутникової інформації Інформаційно-аналітичного центру Національного центру управління та випробувань космічної техніки

Адреса робоча: вул. Князів Острозьких, 8, 02000 Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4173-265X> **e-mail:** sergeyslazin@gmail.com

UDC 519.1,514.128

Vasyl Ustimenko^{1,2}, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the information security department

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2138-2357> **e-mail:** vasulustimenko@yahoo.pl

Oleksandr Pustovit², Candidate of Technical Sciences, Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3232-1787> **e-mail:** sanyk_set@ukr.net

¹University of Royal Holloway, London, Great Britain

²Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ON SECURITY OF GIS SYSTEMS WITH N-TIER ARCHITECTURE AND FAMILY OF GRAPH BASED CIPHERS

Abstract. *Discovery of q -regular tree description in terms of an infinite system of quadratic equations over finite field Fq had an impact on Computer Science, theory of graph based cryptographic algorithms in particular. It stimulates the development of new graph based stream ciphers. It turns out that such encryption instruments can be efficiently used in GIS protection systems which use N-Tier Architecture. We observe known encryption algorithms based on the approximations of regular tree, their modifications defined over arithmetical rings and implementations of these ciphers. Additionally new more secure graph based ciphers suitable for GIS protection will be presented.*

Algorithms are constructed using vertices of bipartite regular graphs $D(n,K)$ defined by a finite commutative ring K with a unit and a non-trivial multiplicative group K^ . The partition of such graphs are n -dimensional affine spaces over the ring K . A walk of even length determines the transformation of the transition from the initial to the last vertex from one of the partitions of the graph. Therefore, the affine space Kn can be considered as a space of plaintexts, and walking on the graph is a password that defines the encryption transformation.*

With certain restrictions on the password the effect when different passwords with $K^)2s$, $s < [(n+5)/2]/2$ correspond to different ciphertexts of the selected plaintext with Kn can be achieved.*

In 2005, such an algorithm in the case of the finite field $F127$ was implemented for the GIS protection. Since then, the properties of encryption algorithms using $D(n, K)$ graphs (execution speed, mixing properties, degree and density of the polynomial encryption transform) have been thoroughly investigated.

The complexity of linearization attacks was evaluated and modifications of these algorithms with the resistance to linearization attacks were found. It turned out that together with $D(n, K)$ graphs, other algebraic graphs with similar properties, such as $A(n, K)$ graphs, can be effectively used.

The article considers several solutions to the problem of protecting the geological information system from possible cyberattacks using stream ciphers based on graphs. They have significant advantages compared to the implemented earlier systems.

Keywords: *Stream ciphers; GIS protection; Multivariate Cryptography; Graph Based Cipher; graphs given by equations; regular tree approximations.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.113-132>

1. Introduction

Graph Based Cryptography (GBC) area is moving with great speed into the main stream of computer design, Information sciences, Information and Computer programming, Artificial Intelligence and design, Artificial Intelligent and various field of research. Application of GBC is in diverse area such as Data structures, Communication networks and their security. A Graph-based approach centres on conserving the environment of security events by breaking down factors of observable data into a graph representation of all cyber vestiges, from all data aqueducts, counting for all once and present data. For secret communication, Ciphers can be converted into graphs. The Application of Graph Theory plays a vital role in various field of Engineering and Sciences. GBC is used for the key exchange, development of Multivariate Public Keys, key dependent message authentication codes and algorithms of Noncommutative Cryptography (see [30]-[47]).

Especially Graph theory is commonly used as a tool of symmetric encryption. First cryptographical applications of Graph Theory appeared in the areas of Symmetric Cryptography and Network Security. This paper reflects some results in the area of applications of families of algebraic graphs of large girth of Extremal Graph Theory to the development of fast and secure encryption tools to process Big Data files. The vertices and edges of algebraic graphs form algebraic varieties defined over the field. The girth is the length of the minimal cycle in the graph. This parameter defines the size of the key space of corresponding cipher. The girth of several known families of algebraic graphs of large girth is not computed. It just evaluated via the lower bounds.

Observed and presented new ciphers have a multivariate nature. The space of plaintexts is an affine variety K^n defined over finite commutative ring K . Bijective encryption map F can be given by nonlinear multivariate polynomials f_1, f_2, \dots, f_n from the multivariate commutative ring $K[x_1, x_2, \dots, x_n]$. It acts on the affine space accordingly the rule $(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow (f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_n(x_1, x_2, \dots, x_n))$, where f_i are given via corresponding list of monomial terms. Trapdoor accelerator (see [27]) is a piece of information A such that the knowledge of A allows to compute the reimage of F in time $O(n^2)$.

In presented ciphers correspondents Alice and Bob shares file A (the password) and encrypt according to the robust procedure in time $O(n)$ or $O(n^2)$. The adversary does not have a password he/she can intercept large amount of pairs plaintext/corresponding ciphertext and try to approximate maps F^{-1} and F . So degree of F is an important parameter for the cryptanalytical studies. The most important (active) part of password are is the information about the walk in the algebraic graph.

Section 2 is dedicated to discussion of the applications of algebraic graphs to protection of Geological Information Systems. We discuss the known successful example [2] of such application in 2005. It was based on idea of usage walks on regular graphs approximating infinite 127 -regular. In fact the first description of selected graph based stream cipher based on approximations of q -regular tree where q is a prime power was presented at the beginning of 2001. During last twenty years many new results on the construction of new encryption tools and there cryptanalysis were obtained. They lead to understanding of multivariate nature of these algorithms and necessity of usage of infinite algebraic graphs defined over infinite commutative rings of kind $F_q[x_1, x_2, \dots, x_n]$ or more general $K[x_1, x_2, \dots, x_n]$ where K is a finite commutative ring. Implemented in [2] encryption map is a polynomial map of

degree 3 such that their inverse is also cubical transformation. So, adversary can use linearisation attacks and after the interception of $O(n^3)$ pairs of kind plaintexts/corresponding ciphertext he/she can approximate the encryption map in time $O(n^0)$. So, Section 2 is dedicated to observation of ciphers based on algebraic graphs and resistant to such linearisation attacks.

The general scheme of flexible encryption algorithm based on special family of algebraic graphs defined over commutative ring is presented there. The theory of approximations of regular trees is presented in Section 3 which contains description of q -regular forest approximation $D(n, q)$, $n \rightarrow \infty$ and tree approximations $CD(n, q)$ and $A(n, q)$, $n=2,3,\dots$. Analogues of these families of graphs over an arbitrary commutative ring are presented there together with the known results on their properties and applications.

Precise description of observed graph based algorithm is given in the Section 4 together with evaluation of the degrees of encryption map and its inverse.

The special case of $A(n, 256)$ defined over the finite field F_{256} is selected for an implementation. Parameters of corresponding computer simulations are given at the end of Section 4.

Last Section 5 is the conclusion.

2. On GIS and approximations of infinite regular trees

Security aspects of using geospatial data and Geographical Information Systems (GIS) are vital topics for current research. A number of publications on applications of GIS to Cybersecurity, National security, and Intelligence operations are rapidly growing (see [1], [2], [3]). Currently, GIS is an essential instrument of Decision Making. Despite these facts, questions on the security of GIS are relatively unexplored topics. Grows in the community of GIS users and the area of GIS applications search for new security solutions, a critical research direction. One of the first surveys [1], [2] with analyses of the quality and efficiency of such solutions published in 2005. The authors suggested using N -Tier GIS architecture.

This paper observes the application of the primary database security categories for managing spatial data. These categories are analyzed from the point of view of application within GIS in the Global Information Space. A File System within a Database (FSDB) with traditional and new encryption algorithms has been proposed as a new GIS Security solution. An FSDB provides more safe and secure storage for spatial files and supports centralized authentication and access control mechanism in legacy DBMS. Cryptography solutions, as a topic of central importance to many aspects of network security, are observed in detail.

The paper describes several traditional and new symmetric, fast and nonlinear encryption algorithms' implementation with fixed and adjustable key sizes, which uses methods of graph-based cryptography. This article is well cited during 2005-2018 (see proceedings of conferences on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management – GISTAM). Several authors agree on the effectiveness of N -Tier architecture [2] and suggested methods of its usage. They implemented one case from the family of graph based stream ciphers defined in [4]. It is the case of finite field F_{127} .

This is a family of graph based ciphers based on the well-known algebraic graphs $D(n, q)$ of Extremal Graph Theory (see [5], [6]) defined over the finite field F_q where q is a prime power. The space of plaintexts is a vector space (F_q) . Used in [1], [2]

case of $q = 127$ demonstrated that corresponding DBMS is capable enough to provide sufficient security to spatial files. This encryption procedure can provide additional security to confidential and sensitive GIS information. Oracle Advanced Security of the Oracle DBMS supports industry-standard encryption algorithms, including RSA's RC4, DES and 3DES and can be used for spatial data encryption with graph based algorithms.

Custom external encryption algorithms can be integrated into that security schema as well. The data encryption can significantly degrade system performance and application response time. For performance testing, the Oracle DBMS_OBFUSCATION.TOOLKIT was investigated [2]. Different key length gives different time results, e.g. difference in time between 16 and 24-byte keys is about 10-20%, but the time difference between 24 and 32-byte keys is only about 5%. It means that the new graph based stream cipher for GIS has to be compared well with ciphers DES, 3DES, stream ciphers RC4. Particular approaches were developed to encrypt large files in Oracle DBMS for the GIS objects.

The procedure splits the data into smaller binary chunks to encrypt large data objects, then encrypts and appends them back to the large data object (LDO). Once the encrypted spatial data files have been allocated into LDO segments, they can be decrypted by chunks and written back to LDO. Additional LOB objects, once encrypted, should always be kept for the read-only spatial data files. It will save time for the encryption procedure during log-off. The decrypted spatial data files will be replaced by read-only encrypted spatial data files in the permanent primary storage during log-off. The implanted cipher gives a more robust binary and text file encryption algorithm than DES, 3DES.

We have to report that the implemented case of $D(n, q)$ based encryption $E(n, q)$ is far from being optimal. As it was showed in [7] the increase of parameter q leads to faster encryption of files of the same size. Noteworthy that the usage of loaded multiplication tables makes immaterial the difference between case of prime q and composed prime powers. Such tables allow to use $q=128$ corresponding to the alphabet ASCEE with the essential speed increase comparably to implemented in [1], [2] $q=127$, where operator of taking modulo 127 is used cn times where constant c depends on the length of the password. The multivariate nature of $D(n, q)$ encryption was noticed in [7] (see also [28] for the case of arbitrary ring K), described their symbolic computations turned out to be cubic.

This fact was mathematically proved in [8] for arbitrary parameters n and q . The standard usage of multivariate transformation $E(n, q)$ with two affine transformation T_1 and T_2 in the form $T_1 E(n, q) T_2$ allow us to improve drastically the mixing properties of the cipher. Noteworthy that in the implemented case of $E(n, 127)$ encryption the change of single characters of the plaintext leads to the change of 48-52 percents of characters of corresponding ciphertexts. The experiment with special linear transformations T_1 and T_2 was described in [9, Ustim Kotorowicz]. To preserve linear time $O(n)$ of the encryption we have to select sparse transformations, i. e. those with $O(n)$ nonzero entries of corresponding matrices. Special sparse transformations allow us to improve drastically mixing properties of $E(n, q)$ encryption. For selected in [9, Ust Kotorow] cases the single change of a plaintext character leads to the change of more than 98 percents of characters of corresponding ciphertext. As it was shown in [ust linguistic] transformation $E(n, q)$ with the password of length less than $[(n+5)]$ has no fixed points. This property holds for the case of ciphers of kind $T_1 E(n, q) (T_1)^{-1}$.

More general graphs $D(n, K)$ defined over arbitrary commutative ring K can be obtained via simple change of F_q for K (see [10]). Investigation of dynamical systems corresponding to these graphs showed the similarity of general graphs $D(n, K)$ of the graphs defined for the case of fields (see [11], [12] and [13]). If passwords corresponds to tuples of characters from the multiplicative group K^* of the ring K then different passwords of length $< [(n+5)/2]$ produce distinct ciphertext from the selected plaintext. It means that case of arithmetic rings Z_m of integers of modulo m is attractive for the implementations.

Noteworthy that the cases of fields F_q , $q = 2^m$ of characteristic two and rings Z_q , $q=2^m$ are most convenient for implementations because of files in the computer are presented in the form 0, 1-sequences.

Recall that the girth of a graph is the length of its minimal cycle. The connected components $CD(n, q)$, $n=2, 3, \dots$ of algebraic graphs $D(n, q)$, $q>1$ form a family of tree approximations, i. e well defined projective limit of them is an infinite q -regular tree. Graphs $D(n, q)$ are edge transitive. So, their connected components are isomorphic. The system of quadratic equations which defines $CD(n, q)$ were presented in [14]. The union of these equations gives an algebraic description of q -regular tree. Existence of such description is very important for Computer Science because a q -regular tree is the deterministic part of branching process.

Noteworthy that the plaintext and the ciphertext of $E(n, q)$ encryption are located in the same connected component of $D(n, q)$. Graphs $CD(n, q)$ have a natural analogue $CD(n, K)$ defined over arbitrary commutative ring K with at least two elements, $CD(n, K)$ is an induced subgraph of $D(n, K)$ (see [10]). The description of $CD(n, K)$ in terms of the system of recurrent quadratic equations is given in [10] together with the description of $CD(n, K)$ based encryption $CE(n, K)$.

It works with the space of plaintexts K^m , $m=3/4n + c$ where c , $c<3$ is some nonnegative integer constant. It is important that group of transformations of $CE(n, K)$ corresponding to various passwords acts transitively on the space of plaintexts while the group generated by various transformations of kind $E(n, K)$ is intransitive. It leads to better mixing properties of $CE(n, K)$ in comparison with those of $E(n, K)$. In fact we have to use $T_1 CE(n, K) (T_1)^{-1}$ where T_1 is a special sparse transformation of $AGL_m(K)$.

Another q -regular tree approximation $A(n, q)$, $q=2, 3, \dots$ were defined in [15]. It has some advantages in comparison with graphs $CD(n, q)$. For instance the graphs are defined by simple homogeneous equation with two linear and one quadratic monomial terms. Finite field F_q can be substituted by general commutative ring K and graphs $A(n, K)$ can be obtained this way (see [15] or Extremal [13]). The girth $g(A(n, q))$ of the graphs $A(n, q)=A(n, F_q)$ can be bounded from below via inequality $g(A(n, q)) \geq [(n+2)/2]$ [16]. The computer simulation support the conjecture that $A(n, Z_m)$ based encryption with passwords from $((Z_m)^*)^t$, $m>2$, t is an even parameter $< [(n+2)/4]$ is such that different passwords produce distinct ciphertext from the selected plaintext. We will use notation $AE(n, K)$ for the $A(n, K)$ based ciphers.

To summarise written above we discuss some properties of three graph based steam ciphers $E(n, K)$, $CE(n, K)$ and $AE(n, K)$ defined in the case $K=F_q$, $q>m$ and $K=Z_m$, $m>2$. All of them can be used for GIS protection with described above N -tier architecture. For practical implementation case of large finite fields and arithmetic rings Z_t , $t=2^m$ is preferable.

The families of graphs $D(n, K)$, $A(n, K)$ defined over arbitrary commutative ring K are bipartite graphs of type $(I, I, n-I)$ with partition sets which are two copies of K^n (see [17] or [11]), i.e. graphs with the incidence $I=I(K)={}^nI(K)$ between points (x_1, x_2, \dots, x_n) and lines $[y_1, y_2, \dots, y_n]$ given by the system of equations $a_2x_2-b_2y_2=f_2(x_1, y_1)$, $a_3x_3-b_3y_3=f_2(x_1, x_2, y_1, y_2), \dots, a_nx_n-b_ny_n=f_2(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, y_1, y_2, \dots, y_{n-1})$ where parameters a_2, a_3, \dots, a_{n-1} and b_2, b_3, \dots, b_{n-1} are taken from the multiplicative group K^* of the commutative ring K . Parameters $\rho((x_1, x_2, \dots, x_n))=x_1$ and $\rho([y_1, y_2, \dots, y_n])=y_1$ serve as colours of the point and the line. The following linguistic property holds. Each vertex of the graph has a unique neighbour of the chosen colour.

Graph $CD(n, K)$ after the elimination of computed recurrently parameters also can be written as linguistic graphs of type $(I, I, m-I)$ where $m=[3/4n]+c$.

In fact the architecture require a partition of information into blocks of the same size. So, parameters n and m equals to some selected constant. the length of the password is another even constant which has an impact on the speed of encryption. Other option to increase speed of execution is the increase the cardinality of the ground field or ring. Let us consider the general scheme of creating the cipher based on the family of linguistic graphs ${}^nI(K)$, $n=2, 3, \dots$

Noteworthy that we can expand defined above $I(K)$ to the infinite linguistic graph $I(K[x_1, x_2, \dots, x_n])$ defined over the ring $K[x_1, x_2, \dots, x_n]$ of all multivariate polynomials with coefficients from K and the variables $x_i, i=1, 2, \dots, n$. So points and lines of this graph are $X=(X_1(x_1, x_2, \dots, x_n), X_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, X_n(x_1, x_2, \dots, x_n))$ and $Y=[Y_1(x_1, x_2, \dots, x_n), Y_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, Y_n(x_1, x_2, \dots, x_n)]$. The incidence of this bipartite graph is given by equations $a_2X_2-b_2Y_2=f_2(X_1, Y_1)$, $a_3X_3-b_3Y_3=f_2(X_1, X_2, Y_1, Y_2), \dots, a_nX_n-b_nY_n=f_2(X_1, X_2, \dots, X_{n-1}, Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1})$, where parameters a_2, a_3, \dots, a_{n-1} , b_2, b_3, \dots, b_{n-1} and polynomials $f_i, i=2, 3, \dots, n$ with coefficients from K are taken from the equations in the definition of the linguistic graph $I(K)$.

We define the polynomial map F from K^n to K^n via the following scheme (see [29]). Take the special point $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ of $I(K[x_1, x_2, \dots, x_n])$ and consider the list of colours $g_1(x_1), g_2(x_1), \dots, g_t(x_1)$. We compute the path $v_0Iv_1v_2\dots Iv_t$ where $v_0=X$ and v_{i+1} is the neighbour of v_i with the colour $g_i(x_1), i=1, 2, \dots, t$ and $I=I(K[x_1, x_2, \dots, x_n])$. Then the destination point v_t of this path can be written as $(g_t(x_1), F_2(x_1, x_2), \dots, F_n(x_1, x_2, \dots, x_n))$. The map F is given by the rule $x_1 \rightarrow g_t(x_1), x_2 \rightarrow F(x_1, x_2), \dots, x_n \rightarrow F(x_1, x_2, \dots, x_n)$. It is easy to see that $F=F(g_1, g_2, \dots, g_t)$ is a bijective map if and only if the equations of kind $g_t(x_1)=b$ have unique solutions for unknown x_1 for each b from K .

So family of linguistic graphs ${}^nI(K)$, $n=2, 3, \dots$ together with family of affine transformations $T_n \in AGL_n(K)$ can be used as a cipher with the space of plaintexts K^n and the password $g_1(x), g_2(x), \dots, g_t(x)$ and the encryption map $T_n(F(g_1, g_2, \dots, g_t)(T_n)^{-1})$.

Correspondents Alice and Bob share the password given by g_1, g_2, \dots, g_t and the sequence of transformations $T_n, n=2, 3, \dots$. We assume that inverse maps $(T_n)^{-1}$ are computed and presented explicitly. For the encryption of potentially infinite plaintext $(p)=(p_1, p_2, \dots, p_n)$ they will use transformation $T_nF(g_1, g_2, \dots, g_t)(T_n)^{-1}$. One of them creates the plaintext (p) and computes the ciphertext $T_n(F(g_1, g_2, \dots, g_t)(T_n)^{-1})(p)=c$ recurrently. The procedure is the sequence of the following steps.

S₁. He/she computes $(T_n)^{-1}(p_1, p_2, \dots, p_n)=(r(1), r(2), \dots, r(n))=(r)$.

S₂. He/she computes $a(1)=g_1(r_1), a(2)=g_2(r_1), \dots, a(t)=g_t(r_1)$.

S₃. Let $N_a(x_1, x_2, \dots, x_n)$ be the operator of taking the neighbour of point (x_1, x_2, \dots, x_n) with the colour a in the linguistic graph ${}^n I(K)$ and ${}^a N(y_1, y_2, \dots, y_n)$ be an operator of taking the neighbour of line $[y_1, y_2, \dots, y_n]$ with the colour a . He/she executes the following operation. Computation of $v_1 = N_{a(1)}(r)$, $v_2 = {}^{a(2)}N(v_1)$, $v_3 = N_{a(3)}(v_2)$, $v_4 = {}^{a(4)}N(v_3), \dots, v_{t-1} = N_{a(t-1)}(v_{t-2})$, $v_t = {}^{a(t)}N(v_{t-1}) = u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$.

S₄. He/she computes ciphertext as $T(u) = c$.

DECRYPTION PROCEDURE.

Assume that one of correspondents received the ciphertext c . He/she decrypts via the following steps.

D₁. Computation of u as $(T_n)^{-1}(c) = u$ and getting the solution $x = r(I)$ of equation $g(x) = u_1$.

D₂. Computation of parameters $a(1) = g_1(r(I))$, $a(2) = g_2(r(I))$, $\dots, a(t-1) = g_{t-1}(r(I))$ and the completion of the recurrent procedure $v_{t-1} = N_{a(t-1)}(u)$, $v_{t-2} = {}^{a(t-2)}N(v_{t-1})$, $v_{t-3} = N_{a(t-3)}(v_{t-2})$, $v_{t-4} = {}^{a(t-4)}N(v_{t-3}), \dots, v_1 = N_{a(1)}(v_{t-2})$, $r^{(1)}N(v_{4t-1}) = r$.

D₃. Computation of the plaintext (p) as $T(r)$.

OBFUSCATION OF THE ALGORITHM.

Let us consider the colour jump operator J_a which transforms point (p_1, p_2, \dots, p_n) of the graph $I(K)$ to the point $(a, p_2, p_3, \dots, p_n)$.

We can change the encryption map $T_n F(g_1, g_2, \dots, g_t)(T_n)^{-1}$ for the $T_n F(g_1, g_2, \dots, g_t) J_g(T_n)$, where J_g is a colour jump operator acting on points of $I(K[x_1, x_2, \dots, x_n])$ with the colour $g(x_i) \in K(x_i)$ such that the equation of kind $g(x_i) = b$ has a unique solution for each parameter b from K .

After this change assumption the bijection of g_t on K is immaterial.

Encryption procedure requires computation of $(T_n)^{-1}(p_1, p_2, \dots, p_n) = (r(1), r(2), \dots, r(n)) = (r)$, the computation of u accordingly step S₂. the computation of $J_g(u) = u'$ and application of affine transformation T_n to the tuple u' .

For the decryption of ciphertext c the user has to compute $u' = (u'_1, u'_2, \dots, u'_n)$ as $(T_n)^{-1}(c)$, solve for x the equation $g(x) = u'_1$, use the solution $x = r(I)$ of this equation for the computation of $a(1) = g_1(r(I))$, $a(2) = g_2(r(I)), \dots, a(t) = g_t(r(I))$, compute $J_a(t)(u') = (u) = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ in the graph $I(K)$ and execute procedures D₃ and D₄ to get the original plaintext.

3. On families of algebraic graphs of large girth

3.1. General remarks

Girth and diameter of a graph are the minimal length of its cycle and the maximal distance of the graph. We can consider girth indicator $Cind(v)$ of vertex v of the graph Γ as the minimal length the cycle through v and introduce cycle indicator $Cind(T)$ of the graph as the maximal value of $Cind(v)$ for its vertices.

The constructions of finite or infinite graphs with prescribed girth and diameter is an important and difficult task of the Graph Theory. Noteworthy that the incidence of classical projective geometry over various fields is a graph of girth 6 and diameter 3. J. Tits defined generalised m -gons as bipartite graphs of girth $2m$ and diameter m . Feit and Higman proved that finite generalised m -gons with bi-degrees > 2 exist only in the cases of $m=3, 4, 6, 8$ and 12 . Geometries of finite simple groups of rank 2 are natural examples of generalised m -gons for $m=3,4,6, 8$. Classification of flag transitive generalised m -gons of Moufang type were obtained by J. Tits and R. Weiss.

Infinite families of graphs of large girth of bounded degree are important objects of Extremal Graph Theory which were introduced by P. Erdős'. He proved the existence of such families via his well-known probabilistic method. Nowadays few explicit constructions of such families are known. The concept of infinite family of small world graphs of bounded degree turns out to be very important for various applications of graph theory.

Noteworthy that only one family of small world graphs of large girth is known. This is the family $X(p, q)$ of Ramanujan graphs introduced by Gregory Margulis [18] and investigated via the computation of their girth, diameter and the second largest eigenvalue by A. Lubotsky, R. Phillips and P. Sarnak [19].

We have to admit that studies of families of graphs Γ_i with well defined projective limit Γ , which is isomorphic to infinite tree, is well motivated.

We refer to such family as tree approximation. There is only one approximation by finite graphs which is a family of large girth. This is the mentioned above family of $CD(n, q)$ defined by F. Lazebnik, V. Ustimenko and A. Woldar. The question whether or not $CD(n, q)$ form a family of small world graphs has been still open since 1995.

In 2013 the tree approximation by finite graphs $A(n, q)$ which is a family of small world graphs was presented (see [15]). It was proven that the graph from the family has maximal known cycle indicator (in fact $Cind(A(n, q)) \geq 2n+2$).

One of the main statements of this paper is $A(n, q)$ where $n=2, 3, \dots$ is a family of large girth.

We generalise these results in terms of the theory of algebraic graphs defined over arbitrary field and consider properties and applications of above mentioned graphs.

3.2. On graphs $A(n, q)$, their properties and generalisations

All graphs we consider are simple, i. e. undirected without loops and multiple edges. Let $V(\Gamma)$ and $E(\Gamma)$ denote the set of vertices and the set of edges of Γ , respectively. The parameter $|V(\Gamma)|$ is called the order of Γ , and $|E(\Gamma)|$ is called the size of Γ . A path in Γ is called simple if all its vertices are distinct. When its convenient we shall identify Γ with the corresponding antireflexive binary relation on $V(\Gamma)$, i.e. $E(\Gamma)$ is a subset of $V(\Gamma) \times V(\Gamma)$. The length of a path is a number of its edges. The girth of a graph Γ , denoted by $g=g(\Gamma)$, is the length of the shortest cycle in Γ . Let $k \geq 3$ and $g \geq 3$ be integers. The distance between vertices v and u of the graph Γ is a minimal length of the path between them. The diameter of the graph is maximal distance between its vertices.

Graph is connected if its diameter is finite. Graph is k -regular if each vertex of the graph is incident exactly to k other vertexes. A tree is a connected graph which does not contain cycles.

(1) An infinite family of simple regular graphs Γ_i of constant degree k and order v_i such that $diam(\Gamma_i) \leq c \log_{k-1}(v_i)$, where c is the independent of i constant and $diam(\Gamma_i)$ is diameter of Γ_i , is called a *family of small world graphs*.

(2) Recall that infinite families of simple regular graphs Γ_i of constant degree k and order v_i such that $g(\Gamma_i) \geq c \log_{k-1}(v_i)$, where c is the independent of i constant and $g(\Gamma_i)$ is a girth of Γ_i are called *families of graphs of large girth*.

Let Γ be a simple graph. Assume that $Cind(x)$ is the minimal length of cycle through vertex x of the graph Γ . Let $Cind(G)$ stand for the maximal value of $Cind(x)$ via all vertices x of Γ . We refer to parameter $Cind(G)$ as a cycle indicator of Γ .

One of the main purposes of the paper is to present a special interpretations of q -regular tree (q -regular simple graph without cycles) in terms of algebraic geometry over finite field F_q .

Theorem 1 [16]. *For each prime power q , $q > 2$ there is a family of q -regular graphs Γ_i satisfying following properties*

- (i) Γ_i is a family of small world graphs,
- (ii) Γ_i is a family of large girth,
- (iii) Projective limit of graphs Γ_i is well defined and coincides with q -regular tree T_q .
- (iv) $Cind \Gamma_i \geq 2 \log_q(v_i/2) + 2$.

We refer to family of graphs Γ_i satisfying condition (iii) as *tree approximation*. The prove of Theorem 1 is given via explicit construction of graphs $\Gamma_i = A(i, q)$, $i \geq 2$ satisfying requirements of the statement. Noteworthy that $A(i, q)$ is a unique known example of the family satisfying conditions (i), (ii) and (iii).

In fact, there is exactly one other known construction of the q -regular family satisfying (i) and (ii), i.e. explicit construction of the family of regular simple small world graphs of large girth and with an arbitrarily large degree q .

This family $X(p, q)$ formed Cayley graphs for $PSL_2(p)$, where p and q are primes, had been defined by G. Margulis [18] and investigated by A. Lubotzky, Sarnak and Phillips [19]. As it is easy to see the projective limit of $X(p, q)$ does not exist.

The construction of $A(n, q)$.

Let K be a finite field F_q . We define $A(n, K) = A(n, q)$ as bipartite graph with the point set $P = K^n$ and line set $L = K^n$ (two copies of a Cartesian power of K are used). We will use brackets and parenthesis to distinguish tuples from P and L .

So $(p) = (p_1, p_2, \dots, p_n) \in P_n$ and $[l] = [l_1, l_2, \dots, l_n] \in L_n$.

The incidence relation $I = A(n, K)$ (or corresponding bipartite graph I) is given by condition $p I l$ if and only if the equations of the following kind hold.

$$\begin{aligned}
 p_2 - l_2 &= l_1 p_1, \\
 p_3 - l_3 &= p_1 l_2, \\
 p_4 - l_4 &= l_1 p_3, \\
 p_5 - l_5 &= p_1 l_4, \\
 &\dots, \\
 p_n - l_n &= p_1 l_{n-1} \text{ for odd } n \text{ and } p_n - l_n = l_1 p_{n-1} \text{ for even } n.
 \end{aligned}$$

We can consider an infinite bipartite graph $A(K)$ with points $(p_1, p_2, \dots, p_n, \dots)$ and lines $[l_1, l_2, \dots, l_n, \dots]$.

Proposition 1 [16]. *If $K = F_q$, $q > 2$ then $A(n, F_q)$ is a family of small world graphs and tree approximation with $Cind(A(n, F_q)) \geq 2n + 2$.*

Let K be an arbitrary field. We define $A(n, K)$ via simple change of F_q on K and announce the following statement.

Proposition 2 [16]. *Let K be a field. Then the girth of $A(n, K)$ is $\geq 2\lfloor n/2 \rfloor + 2$.*

Symbol $[x]$ stands for the flow function from x . Theorem 1 follows from propositions 1 and 2.

3.3. On homogeneous algebraic graphs of large girth

Let F be a field. Recall that a projective space over F is a set of elements constructed from a vector space over F such that a distinct element of the projective space consists of all non-zero vectors which are equal up to a multiplication by a non-zero scalar. Its subset is called a quasiprojective variety if it is the set of all solutions of some system of homogeneous polynomial equations and inequalities.

An algebraic graph φ over F consists of two things: the vertex set Q being a quasiprojective variety over F of nonzero dimension and the edge set being a quasiprojective variety φ in $Q \times Q$ such that (x, x) is not element of φ for each $x \in Q$ and $x\varphi y$ implies $y\varphi x$ ($x\varphi y$ means $(x, y) \in \varphi$). The graph φ is homogeneous (or M -homogeneous) if for each vertex $v \in Q$ the set $\{x \mid v\varphi x\}$ is isomorphic to some quasiprojective variety M over F of nonzero dimension. We further assume that M contains at least 3 elements.

Theorem 2 [20]. *Let Γ be homogeneous algebraic graph over a field F of girth g such that the dimension of neighborhood for each vertex is N , $N \geq 1$. Then $\lfloor (g - 1)/2 \rfloor \leq \dim(V)/N$.*

The following corollary is an analog of Even Circuit Theorem by Erdős' for finite simple graphs.

Corollary 1. *Let Γ be a homogeneous graph over a field F and $E(\Gamma)$ be a variety of its edges. Then $\dim(E(\Gamma)) \leq \dim V(\Gamma)(1 + \lfloor (g - 1)/2 \rfloor)^{-1}$.*

We refer to a family of homogeneous algebraic graphs φ_n for which dimension of neighborhood for each vertex is independent constant N , $N \geq 1$ as a family of *small world graphs* if diameter of each graph φ_n is bounded from above by linear function $an + \beta$ defined by constants α and β .

We refer to a family of homogeneous algebraic graphs φ_n for which the dimension of neighborhood for each vertex is independent constant N , $N \geq 1$ as a *family of large girth* if girth of each graph φ_n is bounded from below by linear function $an + \beta$ defined by constants α and β .

We refer to a homogeneous algebraic graph as algebraic forest if it does not contain cycles. Their term algebraic tree stands for the connected algebraic forest.

We say that family of homogeneous algebraic graphs φ_n is a forest (tree) approximation if projective limit of φ_n is an algebraic forest (tree) and formulate thaw following statement.

Theorem 3 [16]. *For each field F , $F \neq F_2$ there exists a tree approximation which is a family φ_n of small world algebraic graphs of large girth with the vertex set of dimension n and cycle indicator $\geq 2n + 2$.*

Family of graphs $\varphi_n = A(n, F)$ provides explicit construction of objects described in the theorem. As it follows from Theorem 2 homogeneous algebraic graphs $A(n, F)$ form a family with maximal possible girth indicator.

Remark 1. Graphs $A(n, F_2)$ are disconnected. So they are disjoint union of cycles. Graph $A(F_2)$ is 2-regular forests with trees presented on the following diagram
 $\dots \text{---}^* \text{---}^* \text{---}^* \text{---} \dots$. Girth indicator of $A(n, F_2)$ coincides with its girth of size $\geq 2n + 2$. So, formally $A(n, 2)$ are algebraic graphs of large girth. Noteworthy that cycles can be defined via the system of equations.

3.4. Graphs $A(n,K)$ as homomorphic images of $D(n,K)$

Graphs $A(n,q)$ obtained as homomorphic images of graphs $D(n,q)$ which defines projective limit $D(q)$ with points

$$(p) = (p_{01}, p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}, p'_{22}, \dots, p'_{ii}, p_{i+1}, p_{i+1,i}, p_{+i+1,i+1} \dots),$$

lines

$$[l] = [l_{10}, l_{11}, l_{12}, l_{21}, l_{22}, l'_{22}, \dots, l'_{ii}, l_{i+1}, l_{i+1,i}, l_{+i+1,i+1} \dots]$$

and incidence relation given by equations

$$l_{ii} - p_{ii} = l_{10} p_{i-1,i};$$

$$l'_{ii} - p'_{ii} = l_{i,i-1} p_{01};$$

$$l_{i,i+1} - p_{i,i+1} = l_{ii} p_{01};$$

$$l_{i+1,i} - p_{i+1,i} = l_{10} p'_{ii}.$$

This four relations are defined for $i \geq 1$, ($p'_{11} = p_{11}$, $l'_{11} = l_{11}$).

Remark 2. You can see that indexes of vectors correspond to coordinates of positive roots of root system A_1 with a wave.

Historically graph $D(q)$ is not the first example of description of q -regular forest in terms of Algebraic Geometry. Geometries of buildings (see [21] and further references) corresponding to extended Dynkin diagram A_l as incidence structures are $q+1$ -regular trees or $q+1$ -regular forests. As a result we get a description of a tree in group theoretical terms.

In [22] it was noticed that the restriction of this incidence relation on orbits of Borel subgroup B acting on maximal parabolics are q -regular bipartite graphs. So we get a description of a q -regular tree in terms of positive roots of A_l with a wave.

In [5] authors proved that $D(n,q)$ defined via first $n-1$ equations of $D(q)$ form a family of graphs of large girth. The general point and line of these graphs are projections of (p) and $[l]$ onto the tuples of their first n coordinates.

Unexpectedly it was discovered that these graphs are disconnected if $n \geq 6$. So forest $D(q)$ contains infinitely many trees and the diameter is an infinity. F. Lazebnik conjectured that connected components of graphs $D(n,q)$, $n = 3, 4, \dots$ form a family of small world graphs. This conjecture is still open.

In 1994 it was found out how to describe connected components $CD(n, q)$ of graphs $D(n, q)$ in terms of equations (see [14], [6]).

Graphs $A(n, q)$ were obtained in 2007 as homomorphic images of graphs $D(n, q)$ ([11]). Corresponding homomorphism $\hat{\eta}$ is a procedure to delete coordinates of points and lines with indexes $(i+1, i)$ and $(i, i)'$.

The self importance of these graphs have been justified in joint research with U. Romanczuk (see [13] and further references) and M. Polak [23] via applications to Cryptography and Coding Theory.

In the case of families of graphs of large girth we would like to have "speed of growth" c of the girth "as large as it is possible".

P. Erdos' proved the existence of such a family with arbitrary large but bounded degree k with $c=1/4$ by his probabilistic method.

In the case of families $X(p,q)$ and $CD(n,q)$ the constant c is $4/3$. In the case of $A(n,q)$ we just get inequality $1 \leq c < 2$. So exact computation of the girth is the area of the future research.

There are essential differences between family of graphs $X(p, q)$ and tree approximations. Recall that the projective limit of $X(p, q)$ does not exist.

It was proved that bipartite graphs $A(n, q)$ are not edge-transitive and not vertex transitive (transitivity on points and intransitivity on lines). Noteworthy that their projective limit T (the tree) is obviously an edge-transitive infinite graph.

The usage of generalizations and modifications of graphs $A(n, q)$ allows us to construct postquantum cryptosystem of El Gamal type with encryption procedure for potentially infinite vector from F_q with the execution speed $O(n^{1+2/n})$ (see [24]).

In fact the diameter of $A(n, q)$ is growing slower than diameter of $X(p, q)$. So, $A(n, q)$ are the best known small world graphs among known families of large girth. Recall the girth of $A(n, q)$ is not yet computed precisely.

So, the comparison of growth of the girth for $A(n, q)$ and $X(p, q)$ is the interesting task for the future research.

In the case of finite fields both families are expanding graphs, the second largest eigenvalue of $A(n, q)$ tends to $2q^{1/2}$, they are not Ramanujan graphs for which the second largest eigenvalue has to be bounded above by $2(q-1)^{1/2}$.

The family $X(p, q)$ is formed by Ramanujan graphs, so they are better expanding graphs than $A(n, K)$.

Families $X(p, q)$, $CD(n, q)$ and $A(n, q)$ can be used for the constructions of LDPC codes for noise protection in satellite communications. D. MacKay and M. Postol [25] proved that $CD(n, q)$ based LDPC codes have better properties than those from $X(p, q)$ for the constructions of LDPC codes.

Together with Monika Polak we proved that $A(n, q)$ based LDPC codes even better than those from $CD(n, q)$ (see [23]).

Cayley nature of $X(p, q)$ does not allow to use these graphs in multivariate cryptography. Various applications of graphs $D(n, q)$, $CD(n, q)$ and $A(n, q)$ have been known since 1998.

The most recent postquantum cryptosystem based on noncommutative multivariate group associated with $A(n, q)$ is described in [24], IACR e-print Archive 2021/1466.

3.5. On the equations for graphs $CD(n, K)$

Let K stand for an arbitrary commutative ring. Noteworthy that graphs $A(n, K)$ and $D(n, K)$ are defined over arbitrary commutative ring K have been already presented.

To facilitate notation in the future results on "connectivity invariants" of $D(n, K)$, it will be convenient for us to define $p_{-1,0} = l_{0,-1} = p_{1,0} = l_{0,1} = 0$, $p_{0,0} = l_{00} = -1$, $p'_{0,0} = l'_{0,0} = -1$, $p_{1,1} = p'_{1,1}$, $l_{1,1} = l'_{1,1}$ and to assume that our equations are defined for $i \geq 0$.

Graphs $CD(k, K)$ with $k \geq 6$ were introduced in [11] for as induced subgraphs of $D(k, K)$ with vertices u satisfying special equations $a_2(u)=0$, $a_3(u)=0$, ..., $a_t(u)=0$, $t = [(k+2)/4]$, where $u = (u_0, u_{11}, u_{12}, u_{21}, \dots, u_{r,r}, u'_{r,r}, u_{t+1} u_{r,r+1}, u_{r+1,r}, \dots)$, $2 \leq r \leq t$, $a \in \{(1, 0), (0, 1)\}$ is a vertex of $D(k, K)$ and $a_r = a_r(u) = \sum_{i=0}^r (u_{ii} u'_{r-i, r-i} u_{i+1} u_{r-i, r-i-1})$ for every r from the interval $[2, t]$ for every r from the interval $[2, t]$.

We set $a = a(u) = (a_2, a_3, \dots, a_t)$ and assume that $D(k, K) = CD(k, K)$ if $k = 2, 3, 4, 5$.

As it was proven in [11] graphs $D(n, K)$ are edge transitive. So their connected components are isomorphic graphs. Let ${}^v CD(k, K)$ be a solution set of system of equations $a(u) = (v_2, v_3, \dots, v_t) = v$ for certain $v \in K^{t-1}$. It is proven that each ${}^v CD(k, K)$ is the disjoint union of some connected components of graph $D(n, K)$.

It is easy to see that sets of vertices of ${}^vCD(k, K)$, $v \in K^{t-1}$ form a partitions of the vertex set of $D(n, K)$.

The concept of quasiprojective variety over commutative ring K can be introduced via simple substitution of K instead of field F . It leads to concepts of homogeneous algebraic graphs over K , forest and tree approximations and families of graphs of large girth over K . It was proven that for the case of commutative ring K with unity of odd characteristic graphs $CD(n, K)$ are connected (see [26]). So graph $CD(n, q) = CD(n, F_q)$ for odd q is a connected component of $D(n, q)$.

As it follows from definitions the image of restriction of homomorphism η from $D(n, K)$ onto $CD(n, K)$ coincides with $A(n, K)$.

So graphs $A(n, K)$ are connected for the case of K with unity of an odd characteristic.

Theorem 4 [16]. *For each commutative integrity ring K the families of graphs $CD(n, K)$, $n=2,3,\dots$ and $A(n, K)$, $n=2,3,\dots$ are forest approximations and families of graphs of large girth.*

4. On the description of selected algorithms based on algebraic graphs of large girth

To achieve linear speed $O(n)$ of the encryption described in Section 1 functions g_i , $i=1,2,\dots,t$ are selected in the form $x_i + c(i)$, $c(i) \in K$ and the parameter t will be selected within the interval $[2, [(n+5)/2]]$ when $I(K) = D(n, K)$ or $I(K) = CD(n, K)$ and interval $[2, [n/2] + 1)$ in the case when $I(K) = A(n, K)$.

Additionally we take parameters $b(1), b(2), \dots, b(k)$, $a(1), a(2), \dots, a(k)$, $k=t/2$ from K^* to construct $c(i)$ recurrently via the following rules $c(1) = b(1)$, $c(2) = a(1)$, $c(i) = c(i-2) + b(i)$ if $i, i \geq 3$ is odd n and $c(i) = c(i-2) - a(i)$ if $i, i \geq 4$ is even. We refer to the tuple $(b(1), b(2), \dots, b(k), a(1), a(2), \dots, a(k))$ as active password and affine transformation T as passive password.

Our choice insures that in the case of constant passive password the single change of a single character of active password leads to a change of the ciphertext produced from the selected plaintext.

We choose an affine transformation T in the form of linear map given by the following rule

$T(x_1) = x_1 + m(1)x_2 + \dots + m(n-1)x_{n-1}$ where $m(i)$, $i=1,2,\dots,n-1$ are elements of K^* . $T(x_i) = x_i$ for $i=2,3,\dots,n$. So $T^{-1}(x_1) = x_1 - m(1)x_2 - m(2)x_3 - \dots - m(n-1)x_n$. $T^{-1}(x_i) = x_i$ for $i=2,3,\dots,n$.

Recall that explicit description of linguistic graphs $D(n, K)$ and $A(n, K)$ is given in the previous section and general encryption algorithm is described in section 2. So, ciphers $TE(n, K)$ T^{-1} and $TEA(n, K)$ T^{-1} have full description.

In the case of graph $CD(n, K)$ we will use in fact the induced subgraph ${}^hCD(n, K)$, $h = (h_2, h_3, \dots, h_t)$, $t = [(n+2)/4]$ of $D(n, K)$ of all points and lines $u = (u_{00}, u_{11}, u_{12}, u_{21}, \dots, u_{r,r}, u'_{r,r}, u_{t+1}, u_{r,r+1}, u_{r+1,r}, \dots)$ satisfying conditions $a_i(u) = h_i$.

Linguistic graph ${}^hCD(n, K)$ can be thought as bipartite graph with points

$$(p) = (p_{01}, p_{11}, p_{12}, p_{21}, \dots, p_{i+1}, p_{i+1,i}, p_{i+1,i+1} \dots), i=2,3,\dots,t-1$$

and lines

$$[l] = [l_{10}, l_{11}, l_{12}, l_{21}, l_{22}, \dots, l_{i+1}, l_{i+1,i}, l_{i+1,i+1} \dots], i=2,3,\dots,t-1$$

of length $n-t$.

Their incidence is given by the following system of equations

$$\begin{aligned} l_{ii} \cdot p_{ii} &= l_{10} p_{i-1,i}; \\ l_{i,i+1} - p_{i,i+1} &= l_{ii} p_{0i}; \\ l_{i+1i} - p_{i+1,i} &= l_{10} p'_{ii}, \end{aligned}$$

where p'_{22} is defined by the equation $a_2(p_{01}, p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}, p'_{22}) = h_2$ and can be written as $p'_{22} = a_2(p_{01}, p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}, p'_{22}) - h_2 + p'_{22} = b_2(p_{01}, p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22})$, other parameters are $p'_{33} = a_3(p_{01}, p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}, p'_{22}, p_{2,3}, p_{3,2}, p_{3,3}, p'_{3,3}) - h_3 + p'_{33} = b_3(p_{01}, p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}, p'_{22}, p_{2,3}, p_{3,2}, p_{3,3}, \dots, p'_{ii} = a_i(p_{01}, p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}, p'_{22}, \dots, p'_{t-1,t-1}, p_{t-1,t}, p_{t,t-1}, p_{t,t}, p'_{t,t}) - h_t + p'_{t,t} = b_i(p_{01}, p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}, p'_{22}, \dots, p'_{t-1,t-1}, p_{t-1,t}, p_{t,t-1}, p_{t,t})$.

The computation of symbolic expressions $p'_{i,i}$ recurrently and their explicit substitution in the system of equations give us the equations of the linguistic graph.

We assume that corresponding cipher has the space of *plaintexts* K^{n^t} . We use active passwords $(b(1), b(2), \dots, b(k), a(1), a(2), \dots, a(k))$ an linear transformations T of K^{n^t} constructed via described above rules. We assume that parameters h_2, h_3, \dots, h_t will be considered as part of active password and denote the cipher as $TCE(n, K)T^{-1}T_n F(g_1, g_2, \dots, g_t)J_g(T_n)$.

We will use presented in Section 2 obfuscation scheme for each cipher $TE(n, K)T^{-1}$ $TAE(n, K)T^{-1}$ and $TCE(n, K)T^{-1}$ in the case $K = F_q, q > 2$. We use special disturbance function g of I_g selected as $x \rightarrow x^e + b$ where $b \in F_q, e \in Z_d, d = q - 1$ and $(e, d) = 1$. So, the notations $DE(n, K) = TE(n, K)I_g T^{-1}$ and $DA(n, K) = TAE(n, K)I_g T^{-1}$ and $DC(n, K) = TCE(n, K)I_g T^{-1}$ will be used for these encryption schemes with the disturbance.

Algorithms with the encryption maps $TE(n, K)T^{-1}$ and $TAE(n, K)T^{-1}$ independently on the choice of active and passive passwords have multivariate encryption and decryption functions of degree 3. In [45] the linearisations attacks on these ciphers with the interception of $O(n^3)$ pairs plaintext/cipher text are presented. They can be executed in polynomial time $O(n^{10})$.

The ciphers $DE(n, K)$ and $DA(n, K)$ use cubical encryption maps as well but the usage of disturbance map $D: x \rightarrow x^e$ lead to the increase of the degree r of inverse maps. Parameter r can be evaluated from below by the polynomial degree of transformation D^{-1} acting on the elements of multiplicative group K^* . So, if $K = F_q, q = 2^{3^2}$ then the order of polynomial decryption map is at least 2^{3^1} . It justifies that direct linearisation attacks are not feasible.

Case $TCE(n, K)T^{-1}$ is principally different. As it follows the results of [46] the encryption function corresponding to selected active password has degree $[(n+2)/4]+2$. Recall that active password is formed by tuples $(b(1), b(2), \dots, b(k), a(1), a(2), \dots, a(k))$ and (h_2, h_3, \dots, h_t) where h_i are internal parameters of subgraph ${}^h CD(n, K)$. If k is less than half of the girth then different active passwords produce distinct ciphertexts.

High degree of the transformation insures that a generation of standard form for the encryption function can not be done in polynomial time.

So the directed linearisation attacks are theoretically impossible. Principle difference of $DC(n, K)$ and $TCE(n, K)T^{-1}$ is the fact that the usage of disturbance implies the fact that the degree of inverse function is essentially higher than those for encryption function.

The implemented case

For the first implementation we select *the case of encryption function of* $DA(n,K) = TAE(n, K)I_g T^{-1}$ for finite field F_{256} with g of kind $g = x^2 + b$. In this case the degree of encryption map will be at least 128 (see [27]). The linearisation attacks by adversary requires the interception $O(n^3)$ pairs of kind plaintext/ciphertext. After that he/she need approximate the map of degree ≥ 128 with the possibility to choose the plaintext and get corresponding ciphertext. In practical case of $n \geq 64$ such linearisation attacks are unfeasible.

CRYPTALL 4 software is written in C++ programming language and therefore it is portable and runs in many platforms such as Unix/Window. The context diagram is depicted in Fig. 1. The interface is friendly. It allows users to enter active and passive password of selected length. The program is supported by key exchange protocol based on Eulerian transformations of (F_{256}^*) . It allows the elaboration of tuple of nonzero field elements of sufficient length to form both passwords.

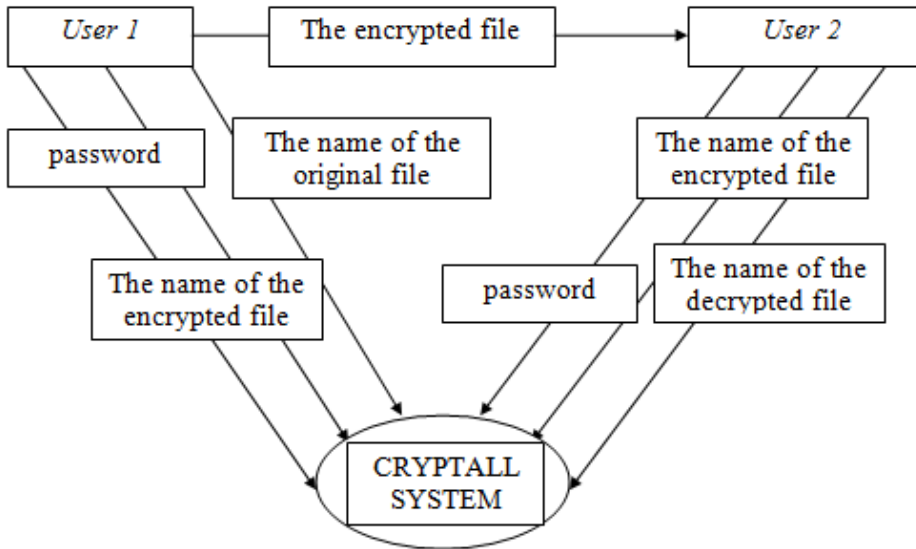


Fig. 1. Context Diagram of CRYPTALL 4

Experimental Measurements. To evaluate the performance of our algorithm, we use with different size of files. We denote by $t(k, L)$ the time (in millisecond) that is needed to encrypt or decrypt (because of symmetry). The file size is in kilobytes for passwords of length L . Then the value of $t(k, L)$ can be represented by the following matrix (Fig. 2).

$L \backslash k$	3000	4000	5000	6000
4	1143	1535	1755	2120.75
8	2162.25	2999.75	3452.5	4150
12	3070.5	4108	5061.25	6053
16	4090.5	5429.25	6673.5	7945.75
20	5131.75	6778.75	8303	9873.75

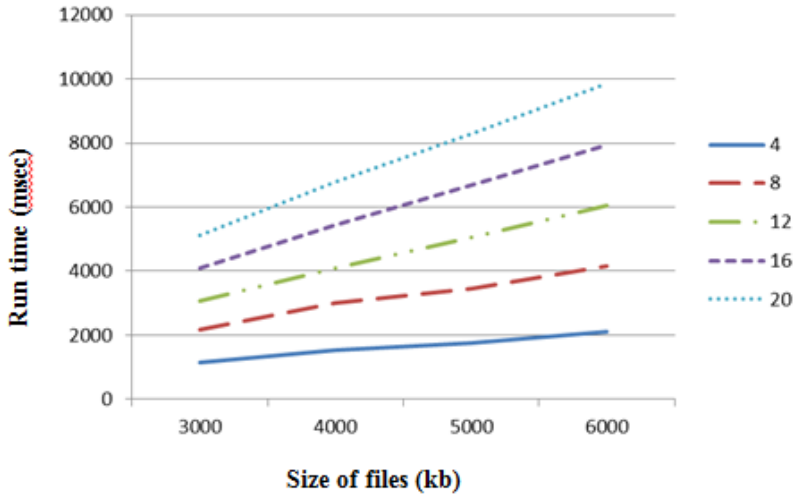


Fig. 2. Run time for CRYPTALL 4 System

Computer experiment justifies that in implemented case the speed of execution of decryption or encryption procedures are essentially higher than in the case of stream cipher of [2] used for GIS protection. New algorithm has essentially better mixing properties (see [47]).

5. Conclusion

The main theoretical result of the paper is explicit construction of the family of multivariate map of affine maps F_n with the trapdoor accelerator of linear degree cn , $c=3/4$ acting on affine space K^n defined over arbitrary commutative ring K with at least 3 elements. Corresponding cipher has execution speed of kind $\frac{1}{4} n^2 + O(n)$ which is proportional to the length of active password of size $O(1)$. The decryption procedure takes the same time with the encryption process. In the case of choice of special linear conjugation T it has nice mixing properties: change of single character of the plaintext or active password leads to the change of $\geq 98\%$ of characters of corresponding ciphertext.

So F_n based cipher can provide essentially better security than the cipher selected in [2]. The disadvantage of F_n is speed of encryption $O(n^2)$ but not $O(n)$. So the usage of F_n will drastically improve the security level of GIS protection but essentially slow down of speed of spatial information processing.

Noteworthy that speed of processing is very important parameter. That is why we suggest usage of ciphers $DE(n, K)$ and $DA(n, K)$ for GIS protection which are more robust in the comparison of cipher chosen in [2], they have essentially better mixing properties and practically resistant against linearisation attacks. Ciphers $DE(n, K)$ and $CE(n, K)$ can be chosen in the case of tasks where security aspects are more important than the execution speed.

ACKNOWLEDGEMENTS. This research is partially supported by the Fellowship of British Academy for RaR.

REFERENCES

1. S. Dhanjal, Y. Khmelevsky, M. Govorov, V. A. Ustymenko, P. N. Sharma, Security solutions for spatial data in storage - (Implementation case within oracle 9iAS), *8th World MultiConference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Vol II, Proceedings*, pp. 318–323, 2004.
2. M. Govorov, Y. Khmelevsky, V. Ustimenko, A. Khorev, Security for GIS N-tier architecture, *Developments in Spatial Data Handling*, pp. 71–83, 2005.
3. Y. Khmelevsky, S. Dhanjal, Information Security and Data Protection in Computer Science Education, in *12th Western Canadian Conference Education on Computing Education (WCCCE-2007)*, Thompson Rivers University, Kamloops, Canada, May, 2007, pp. 3–5.
4. V. Ustimenko, CRYPTIM: Graphs as tools for symmetric encryption, in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 2227, 2001.
5. F. Lazebnik, V. Ustimenko (1993). Some Algebraic Constructions of Dense Graphs of Large Girth and of Large Size, DIMACS series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, 10, p. 75-93. <https://doi.org/10.1090/dimacs/010/07>
6. Lazebnik F., Ustimenko V. A. and Woldar A. J. (1995). New Series of Dense Graphs of High Girth // Bull (New Series) of AMS, 32, No. 1, p. 73-79. <https://doi.org/10.1090/S0273-0979-1995-00569-0>
7. V. Ustimenko, On graph-based cryptography and symbolic computations, *Serdica Journal of Computing*, vol. 1, no. 2, pp. 131–156, 2007.
8. Aneta Wroblewska, On some properties of graph based public keys, *Albanian Journal of Mathematics*, Albanian J. Math. 2(3), 229-234, (2008).
9. J. S. Kotorowicz and V. A. Ustimenko, On the implementation of cryptoalgorithms based on algebraic graphs over some commutative rings, in *Condensed Matter Physics*, vol. 11, no. 2, 2008.
10. V. Ustimenko (1998), Coordinatisation of Trees and their Quotients, in the Voronj's Impact on Modern Science, Kiev, Institute of Mathematics, 2, p. 125-152.
11. V. Ustimenko (2007). Linguistic Dynamical Systems, Graphs of Large Girth and Cryptography, *Journal of Mathematical Sciences*, Springer, 140, No. 3, p. 412-434. <https://doi.org/10.1007/s10958-007-0453-2>
12. V. A. Ustimenko, U. Romanczuk, On Dynamical Systems of Large Girth or Cycle Indicator and their applications to Multivariate Cryptography, in "Artificial Intelligence, Evolutionary Computing and Metaheuristics", In the footsteps of Alan Turing Series: Studies in Computational Intelligence, 427, 2012, p. 231-256, https://doi.org/10.1007/978-3-642-29694-9_10
13. V. A. Ustimenko, U. Romanczuk, On Extremal Graph Theory, Explicit Algebraic Constructions of Extremal Graphs and Corresponding Turing Encryption Machines, in "Artificial Intelligence, Evolutionary Computing and Metaheuristics", In the footsteps of Alan Turing Series: Studies in Computational Intelligence, Vol. 427, Springer, January, 2013, 257-285.
14. F. Lazebnik, V. Ustimenko and A. J. Woldar (1996). A characterisation of the components of the graphs $D(k,q)$, *Discrete Mathematics*, 157, p. 271-283. [https://doi.org/10.1016/S0012-365X\(96\)83019-6](https://doi.org/10.1016/S0012-365X(96)83019-6)
15. V. A. Ustimenko. On the extremal graph theory and symbolic computations, *Dopovidi National Academy of Sci, Ukraine*, 2013, No. 2, p. 42-49.
16. V. Ustimenko, On new results on extremal graph theory, theory of algebraic graphs, and their applications, *Reports of National Acad. of Sci. of Ukraine*, 2022, N4, pp. 25-32.
17. V. Ustimenko, Maximality of affine group, hidden graph cryptosystem and graph's stream ciphers, *Journal of Algebra and Discrete Mathematics*, 2005, v. 1, pp. 51-65.

18. G. Margulis (1988). Explicit group-theoretical constructions of combinatorial schemes and their application to design of expanders and concentrators, *Probl. Peredachi Informatsii*, 24, No. 1, p. 51-60.
19. A. Lubotsky, R. Philips, P. Sarnak (1989). Ramanujan graphs, *J. Comb. Theory*, 115, No. 2, p. 62-89. <https://doi.org/10.1007/BF02126799>
20. T. Shaska, V. Ustimenko (2009). On the homogeneous algebraic graphs of large girth and their applications, *Linear Algebra and its Applications*, 430, No. 7, p. 1826-1837. <https://doi.org/10.1016/j.laa.2008.08.023>
21. F. Buekenhout (editor), *Handbook in Incidence Geometry*, Ch. 9, North Holland, Amsterdam, 1995.
22. V. Ustimenko (1989). Affine system of roots and Tits geometries, *Voprosy teorii grupp i gomologicheskoy algebrы*, Yaroslavl, p. 155-157.
23. M. Polak, V. A. Ustimenko (2012). On LDPC Codes Corresponding to Infinite Family of Graphs $A(k,K)$. *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, CANA, Wroclaw, p. 11-23.
24. Ustimenko, V. (2021). On semigroups of multivariate transformations constructed in terms of time dependent linguistic graphs and solutions of Post Quantum Multivariate Cryptography. *Cryptology ePrint Archive: Report 2021/1466*. Retrieved from <https://eprint.iacr.org/2021/1466.pdf>
25. D. MacKay and M. Postol (2003). Weakness of Margulis and Ramanujan - Margulis Low Density Parity Check Codes, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 74, p. 97-104. [https://doi.org/10.1016/S1571-0661\(04\)80768-0](https://doi.org/10.1016/S1571-0661(04)80768-0)
26. V. Ustimenko (2009). Algebraic groups and small world graphs of high girth, *Albanian Journal of Mathematics*, 3, No. 1, p. 25-33.
27. V. Ustimenko, *On Extremal Algebraic Graphs and Multivariate Cryptosystems*, *Cryptology ePrint Archive*, reprint 2022/1537.
28. V. Ustimenko, *On the extremal graph theory for directed graphs and its cryptographical applications*. In: T. Shaska, W.C. Huffman, D. Joener and V. Ustimenko, *Advances in Coding Theory and Cryptography*, Series on Coding and Cryptology, vol. 3, 181-200 (2007).
29. V. Ustimenko, *Graphs in terms of Algebraic Geometry, symbolic computations and secure communications in Post-Quantum world*, Editorial House of University of Maria Curie – Sklodowska, Lublin, November, 2022, 196 pages.
30. Geetha N K, Ragavi V, *Graph Theory Matrix Approach in Cryptography and Network Security*, *Proceedings of 2022 Algorithms, Computing and Mathematics Conference (ACM)*, 29-30 Aug. 2022, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10202460>
31. Costache, A., Feigon, B., Lauter, K., Massierer, M., Puskás, A. (2019). Ramanujan Graphs in Cryptography. In: Balakrishnan, J., Folsom, A., Lalin, M., Manes, M. (eds) *Research Directions in Number Theory*. Association for Women in Mathematics Series, vol. 19. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19478-9_1
32. P.L. K. Priyadarsini, *A Survey on some Applications of Graph Theory in Cryptography*, *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09720529.2013.878819>
33. W. M. Al Etaiwi, *Encryption Algorithm Using Graph Theory*, *Journal of Scientific Research & Reports*, 3(19): 2519-2527, 2014; Article no. JSRR.2014.19.004.
34. Samid Gideon, *Denial Cryptography based on Graph Theory*, US patent 6823068-2004 <http://www.patentstorm.us/patents/6823068.html>
35. Lothrop Mittenthal, *Sequencings and Directed Graphs with Applications to Cryptography*, S.W. Golomb et al. (Eds.): *Springer-Varlag LNCS* 4893, pp. 70–81, 2007.
36. Moni Naor and Adi Shamir. Visual cryptography. In *Advances in Cryptology - EURO-CRYPT'94, LNCS*, vol. 950, pp. 1–12, 1994.
37. Steve Lu, Daniel Manchala, Rafail Ostrovsky, *Visual Cryptography on Graphs, COCOON 2008*: pp. 225–234, 2008.
38. William Stallings, *Cryptography and Network Security Principles and Practices*, Prentice Hall India, 2006.

39. Dawn Song, David Zuckerman, J. D. Tygar, Expander Graphs for Digital Stream Authentication and Robust Overlay Networks, *Proceedings of the 2002 IEEE Symposium on Security and Privacy (S&P.02)*, 2002.
40. M Yamuna, Meenal Gogia, Ashish Sikka and Md. Jazib Hayat Khan, "Encryption using graph theory and linear algebra", *International Journal of Computer Application*, pp. 2250-1797, 2012.
41. A Paszkiewicz et al., *Proposals of graph based ciphers theory and implementations. Research Gate*, 2001.
42. Cusack, B.; Chapman, E. Using graphic methods to challenge cryptographic performance. In Proceedings of the 14th Australian Information Security Management Conference, Edith Cowan University, Perth, Australia, 5–6 December 2016; pp. 30–36. [Google Scholar].
43. Chapman, E. Using Graphic Based Systems to Improve Cryptographic Algorithms. Ph.D. Thesis, Auckland University of Technology, Auckland, New Zealand, 2016. [Google Scholar].
44. Kinani, E.H.E. Fast Mapping Method based on Matrix Approach For Elliptic Curve Cryptography. *Int. J. Inf. Netw. Secur. (IJINS)* 2012, 1, 54–59.
45. M. Klisowski. Zwiększenie bezpieczeństwa kryptograficznych algorytmów wielu zmiennych bazujących na algebraicznej teorii grafów. Rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 2014.
46. Vasył Ustimenko, Aneta Wroblewska, On the key exchange and multivariate encryption with nonlinear polynomial maps of stable degree, *Annales of UMCS, Informatica*, Vol 13, No 1 (2013), pp 63-80. <http://dx.doi.org/10.2478/v10065-012-0047-6>
47. Pustovit O.S. Application of the theory of extreme graphs to modern problems of information security. - Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.13.06 - Information technologies. – Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The article was received 11.05.2023 and was accepted after revision 25.08.2023

В.О. Устименко, О.С. Пустовіт
ПРО БЕЗПЕКУ ГІС-СИСТЕМ З N-РІВНЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ ТА СІМЕЙСТВА АЛГОРИТМІВ ШИФРУВАННЯ, ВИЗНАЧЕНИХ ЗА ГРАФАМИ

Анотація. Відкриття опису q -регулярного дерева в термінах нескінченної системи квадратних рівнянь над скінченним полем Fq мало вплив на розвиток Інформатики, зокрема теорії криптографічних алгоритмів, що визначаються за графами. Це стимулювало розвиток конструкцій безпечних потокових алгоритмів шифрування. Виявилось, що такі інструменти шифрування можна ефективно використовувати в системах захисту ГІС, що вживають N -рівневу архітектуру. Ми оглянемо відомі алгоритми шифрування, засновані на апроксимаціях регулярних дерев, їх модифікації, визначені над арифметичними кільцями, та програмні реалізації цих алгоритмів. Крім того, будуть представлені нові більш безпечні алгоритми потокового шифрування, придатні для захисту ГІС.

Алгоритми будуються з використанням блукань на вершинах дводольних регулярних графів $D(n, K)$, визначених за скінченним комутативним кільцем K з одиницею та нетривіальною мультиплікативною групою K^* . Доли таких графів є n -вимірними афінними просторами над кільцем K . Блукання парної довжини визначає перетворення переходу від початкової до останньої вершини з однієї з долей графу. Отже, афінний простір K^n можна розглядати як простір відкритих текстів, а блукання на графі паролем, який визначає перетворення, що шифрує.

При певних обмеженнях на паролі досягається ефект, коли різним паролям з $(K^*)^{2s}$, $s < [(n+5)/2]/2$ відповідають різні шифрограми обраного відкритого тексту з K^n . У 2005 році такий алгоритм у випадку скінченного поля F127 використовувався для захисту

ГПС. З цього часу властивості алгоритмів шифрування з використанням графів $D(n, K)$ (швидкодія, властивості зміни, степінь та густина поліноміального перетворення шифрування) були ретельно досліджені. Було оцінено складність атак лінеаризації та знайдено модифікації цих алгоритмів із стійкістю до атак лінеаризації. Виявилося, що разом з графами $D(n, K)$ можна ефективно використовувати й інші алгебраїчні графи з подібними властивостями, такі як графи $A(n, K)$.

У статті розглядаються кілька розв'язань задачі захисту геологічної інформаційної системи від можливих кібератак за допомогою потокових алгоритмів, що спираються на графи. Вони мають істотні переваги в порівнянні з реалізованими раніше алгоритмами.

Стаття надійшла до редакції 11.05.2023 і прийнята до друку після рецензування 25.08.2023

Устименко Василь Олександрович

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу інформаційної безпеки Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Університет Роял Холлоуей (Лондон)

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2138-2357> **e-mail:** vasulustimenko@yahoo.pl

Пустовіт Олександр Сергійович

кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3232-1787> **e-mail:** sanyk_set@ukr.net

УДК 004.7

Serhii Zaitsev¹, D. S. (Computer science), professor, leading researcher
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6643-917X> *e-mail*: szaitsev@tu.kielce.pl

Vladyslav Vasylenko¹, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8156-1894> *e-mail*: vladvasilenko9@gmail.com

Taras Trysnyuk¹, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3672-8242> *e-mail*: taras24t@gmail.com

Natalya Sokorinska², Senior Researcher
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9713-7289> *e-mail*: sokor-nata@ukr.net

¹Institute of Telecommunications and the Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

METHOD OF ADAPTATION OF CASCADE CODES TO ENSURE RELIABILITY OF INFORMATION TRANSMISSION OF WIRELESS DATA TRANSMISSION SYSTEMS

Abstract. *The article proposes a method of structural adaptation of cascade codes, designed to ensure the specified reliability of information transmission of wireless data transmission systems in the event of interference, due to the dynamic synthesis of combined structures of cascade codes under conditions of a priori uncertainty. The essence of the method is to identify the internal structure of the code, due to which the structure of the component codes of the turbo code is determined. It was developed using the gradient method due to the implementation of a multi-step iterative procedure for finding optimal system parameters. Implementation of the method allows to ensure the reliability of information transmission of wireless data transmission systems. To check the effectiveness of the method of structural adaptation of cascade codes, a simulation model was developed in the C++ programming language in the Visual Studio 2019 software environment, and wireless data transmission systems were simulated. The simulation results show that the combined structure of building cascade codes together with OFDM technology allows you to independently adapt the coding rate of each of the coding stages depending on the results of the analysis of the reliability of information in this cascade, which leads to the provision of the specified reliability of information transmission, while the BSPD bandwidth is reduced by 4–12% against 20–35% of known results. The use of Reed-Solomon codes in a sequential cascade scheme with turbo codes due to the adaptation of the coding rate of this cascade design allows obtaining an energy gain of 0.5–0.7 dB without increasing the bandwidth of the transmission system compared to systems that use only turbo codes. The obtained results are of significant relevance and can be implemented in the development of information transmission systems to ensure the reliability of data transmission, both in peacetime and in conditions of armed aggression of the Russian Federation against Ukraine.*

Keywords: *a priori uncertainty; gradient method; OFDM; Reed-Solomon codes; turbo code; coding rate; simulation.*

С.В. Зайцев¹, В.М. Василенко¹, Т.В. Триснюк¹, Н.В. Сокоринська²

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

²Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, м. Київ, Україна

МЕТОД АДАПТАЦІЇ КАСКАДНИХ КОДІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

***Анотація.** У статті пропонується метод структурної адаптації каскадних кодів, призначений для забезпечення заданої достовірності передачі інформації безпроводових систем передачі даних при дії завад, за рахунок динамічного синтезу комбінованих структур каскадних кодів в умовах апіорної невизначеності. Сутність методу полягає в ідентифікації внутрішньої структури коду, за рахунок чого визначається структура компонентних кодів турбокоду. Він був розроблений з використанням градієнтного методу за рахунок імплементації багатокрокової ітеративної процедури пошуку оптимальних параметрів системи. Реалізація методу дозволяє забезпечити достовірність передачі інформації безпроводових систем передачі даних. Для перевірки ефективності методу структурної адаптації каскадних кодів була розроблена імітаційна модель на мові програмування C++ у програмному середовищі Visual Studio 2019 та проведено моделювання безпроводових систем передачі даних. Результати моделювання показують, що комбінована структура побудови каскадних кодів разом з технологією OFDM дозволяє незалежно адаптувати швидкість кодування кожного з каскадів кодування залежно від результатів аналізу достовірності інформації в цьому каскаді, що приводить до забезпечення заданої достовірності передачі інформації, при цьому пропускна спроможність БСПД зменшується на 4–12% проти 20–35% відомих результатів. Використання кодів Ріда-Соломона в послідовній каскадній схемі з турбокодами за рахунок адаптації швидкості кодування цієї каскадної конструкції дозволяє одержати енергетичний вираш 0,5–0,7 дБ без збільшення пропускної спроможності системи передачі в порівнянні з системами, які використовують тільки турбокоди. Отримані результати мають суттєву актуальність та можуть бути впроваджені при розробці систем передачі інформації для забезпечення достовірності передачі даних, як у мирний час, так і в умовах збройної агресії Російської Федерації проти України.*

***Ключові слова:** апіорна невизначеність; градієнтний метод; OFDM; коди Ріда-Соломона; турбокод; швидкість кодування; моделювання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.133-143>

Вступ

Адаптацією безпроводових систем передачі даних (БСПД) є зміна її параметрів та структури для досягнення очікуваного ефекту в умовах апіорної невизначеності.

Задачею адаптації БСПД є процес пошуку параметрів системи для підтримки його ефективності на заданому рівні. Постійний процес пошуку в умовах апіорної невизначеності потребує введення процедури адаптації для зміни параметрів або структури [1–3].

Цільова функція адаптації БСПД залежить від параметрів та структури системи. Параметричні та структурні властивості виразимо у вигляді вектора \vec{y} , сукупність управляючих змінних – у вигляді вектора управління \vec{u} , а сукупність фіксованих параметрів – у вигляді вектора \vec{w} .

Задача адаптації полягає у пошуку вектора структури та параметрів системи \vec{y} й управління \vec{u} , що забезпечують екстремум цільової функції при заданому векторі \vec{w} та обмеженнях g_i і G_j :

$$\left. \begin{aligned} Q &= \underset{\vec{y} \in Y, \vec{u} \in U}{extr} Q(\vec{y}, \vec{u}, \vec{w}) \\ g_i(\vec{y}, \vec{u}, \vec{w}) &= 0, \quad i = \overline{1, N_i}, \quad N_i \leq N_u \\ G_j(\vec{y}, \vec{u}, \vec{w}) &\{\geq, \leq\}, \quad j = \overline{1, N_j} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де N_u – число незалежних компонент \vec{u} , g_i і G_j – задані функції.

Для рішення задачі (1) необхідно використати аналітичні залежності для розрахунку ймовірності бітової помилки для відповідних кодових конструкцій в умовах впливу навмисних завад.

Мета роботи. Розробка методу структурної адаптації каскадних кодів, призначеного для забезпечення заданої достовірності передачі інформації безпроводових систем передачі даних при дії завад, за рахунок динамічного синтезу комбінованих структур каскадних кодів в умовах апріорної невизначеності.

Виклад основного матеріалу дослідження

Нехай \vec{x}_0 – деяка початкова точка множини значень $\Delta_\beta \subseteq \Delta; \Delta^* \subseteq \Delta_\beta$, в яких досягається екстремум цільової функції $f_0(\vec{x})$ [1, 4].

Збіжний ітеративний процес пошуку екстремуму – це процес ітеративного розрахунку значень (точок) $\vec{x}^0, \vec{x}^1, \dots, \vec{x}^k, \vec{x}^{k+1}, \dots$, що здійснюється завдяки перетворенню [1]:

$$\vec{x}^{k+1} = \Phi^k(\vec{x}^k), \quad (2)$$

і задовольняється вимогою збіжності:

$$\rho(\vec{x}^k, \Delta^*) \rightarrow \Phi^k(\vec{x}^k) \text{ при } k \rightarrow \infty.$$

Прикладом ітеративного процесу є градієнтний спуск, представлений як:

$$\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k - \alpha^k \nabla f(\vec{x}^k), \quad (3)$$

де $\nabla f(\vec{x}^k)$ – вектор градієнта, який показує напрямок найшвидшого зростання значення цільової функції, а α^k – кроковий множник, що визначає довжину вектора зміщення – $\alpha^k \nabla f(\vec{x}^k)$ в напрямку, протилежному градієнту.

Виникає необхідність імплементації багатокрокової процедури, в якій коригується напрямок переміщення, де на кожній ітерації крок корекції повинен зменшуватися, а її частота збільшуватися на границі екстремуму. На рис. 1 показані лінії рівня двох функцій $f_1(\vec{x})$ і $f_2(\vec{x})$ траєкторії руху в напрямку екстремуму.

Градiєнтний метод застосуємо лише у випадках пошуку безумовного екстремуму диференційованої функції. У завданнях нелінійного програмування, коли цільова функція задається на безлічі допустимих альтернатив Δ_{β} , пошук екстремуму ускладнюється, оскільки деяка проміжна точка \vec{x}^k багатокрокового процесу може виявитися на границі Δ_{β} і градієнт може бути направлений за межі допустимої області [1].

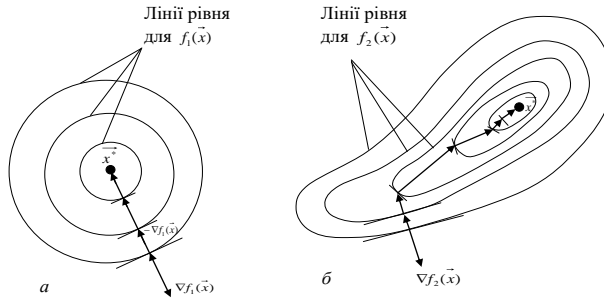


Рис. 1. Лінії рівня двох функцій і траєкторії руху в напрямку екстремуму

В такому випадку для забезпечення вибору можливого напрямку $\vec{\gamma}^k$ в точці \vec{x}^k , який відмінний від напрямку градієнта або антиградієнта, використовується модифікований градієнтний метод. Вибір такого напрямку переміщення призводить би до збільшення (зменшення) значення цільової функції $f(\vec{x})$ і забезпечував би не вихід за межі множини.

У цьому випадку співвідношення (2), яке визначає закон ітеративного процесу, записується в такому вигляді:

$$\vec{x}^k = \vec{x}^k - \alpha^k \vec{\gamma}^k. \tag{4}$$

На рис. 2 представлений пошук екстремуму в задачі без обмежень і з обмеженнями. Безліч допустимих рішень Δ_{β} представлено заштрихованою областю. Зображені на рисунку лінії рівня відповідають деяким постійним значенням цільової функції $f(\vec{x})$, причому $F_1 > F_2 > \dots > F_0$.

З даного рисунка випливає, що у разі завдання без обмежень рішення знаходиться в точці \vec{x}^* , де $f(\vec{x}^*) = F_0$ (глобальний безумовний мінімум).

З початкової точки, потрібно знаходити такі напрямки руху $\vec{\gamma}^k$, які б не порушували обмежень і траєкторія багатокрокового процесу повинна привести в точку, відповідну умовному екстремуму цільової функції (у цьому прикладі це точка \vec{x}^{**}).

Завдяки вирішенню допоміжної одновимірної задачі мінімізації на кожному кроці виконується обчислення множника α^k :

$$\vec{x}^0 = \arg \min_{\alpha \geq 0} f(\vec{x}^k - \alpha \nabla f(\vec{x}^k)). \tag{5}$$

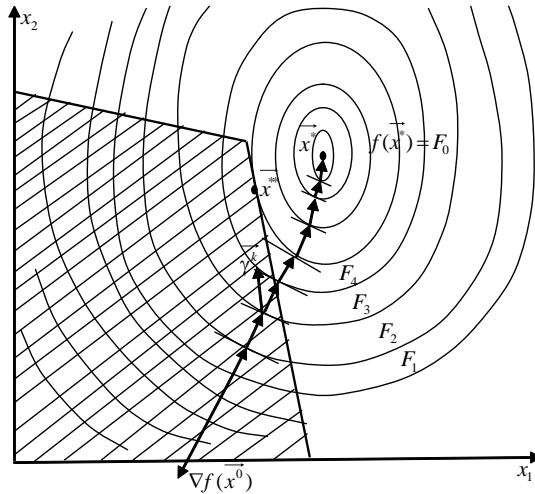


Рис. 2. Пошук екстремуму в задачі без обмежень і з обмеженнями

Відповідно до вимоги досягнення $f(\vec{x}^k)$ мінімально можливого значення, при русі з точки \vec{x}^k вздовж напрямку антиградієнта в точці \vec{x}^{k+1} , α^k підіймається. У підсумку, траєкторія спуску, через точки $\vec{x}^0, \vec{x}^1, \dots, \vec{x}^k, \vec{x}^{k+1}, \dots$, є зигзагоподібною, причому кожний наступний напрямок руху ортогональний попередньому.

Метод структурної адаптації каскадних кодів призначений для забезпечення заданої достовірності передачі інформації БСПД при дії завад за рахунок динамічного синтезу комбінованих структур каскадних кодів в умовах апіорної невизначеності.

Сутність методу полягає в ідентифікації внутрішньої структури коду, за рахунок чого визначається структура компонентних кодів турбокоду.

Для визначення структури внутрішнього коду задаються початкові характеристики: кількість субканалів та види модуляції сигналу в субканалах сигналу OFDM, кількість каскадів кодування L та параметри внутрішніх кодів для кожного з l -го каскаду, де $l \in \overline{1, L}$, а саме: кількість біт у блоці N , види утворюючих поліномів компонентних кодів турбокоду $(1, g_1/g_0, \dots, g_n/g_0)$, тип перемежувача, кількість ітерацій декодування I , швидкість кодування турбокоду R_{1l} , кількість компонентних кодерів (декодерів), алгоритм декодування турбокоду (Мар, Log-Мар, Max-Log-Мар), параметри зовнішнього коду для кожного з l -го каскаду, $l \in \overline{1, L}$, а саме: загальна кількість біт у блоці n , кількість інформаційних біт у блоці k , виправна здатність коду $t = \left\lfloor \frac{n-k}{2} \right\rfloor$, кількість біт у символі m , швидкість кодування R_{2l} , ймовірність бітової помилки зовнішнього коду P_l , ймовірність бітової помилки допустима $P_{\text{пом. доп.}}$.

Також, приймаються такі обмеження: $R_{1l} \geq R_{1\text{доп.}}$, $R_{2l} \geq R_{2\text{доп.}}$, $L \leq L_{\text{доп.}}$, $k \in \overline{3, 11}$, $n \in \overline{7, 63}$, $m \in \overline{3, 7}$, $t \in \overline{1, 10}$.

Виберемо квадрат похибки (відхилення регульованої величини від заданої) за показник оптимальності процесу адаптації:

$$J = e^2,$$

де $e = P_{\text{пом.}} - P_{\text{пом. доп.}}$.

Для реалізації принципу самонастроювання в методі застосуємо підхід, відповідно до якого будемо знаходити градієнт, що визначається виразом:

$$\nabla J(\vec{U}) = \left[\frac{\partial J}{\partial u_1}, \frac{\partial J}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial J}{\partial u_N} \right]. \quad (6)$$

Розв'язання рівняння (4) полягає у пошуку вектора управління:

$$\vec{U}^{k+1} = \vec{U}^k - \alpha^k \nabla f(\vec{U}^k)$$

де α – скаляр, який визначає величину наступного кроку.

Виберемо такий критерій зупинки ітеративної процедури пошуку екстремуму функціонала $J(\vec{U})$:

$$\left\| \nabla J(\vec{U}^k) - \nabla J(\vec{U}^{k+1}) \right\| \leq \varepsilon.$$

Елементами вектора регулюючої дії \vec{U} є: u_1 – довжина інформаційної послідовності, u_2 – кількість біт у символі m , u_3 – довжина кодової комбінації n .

У випадку, коли обчислення градієнта функціонала $J(\vec{U})$ потребує значного обчислювального ресурсу, тоді можемо представити процес ітеративної процедури пошуку наступним чином.

Після прийому B блоків даних розміром N біт, для кожного l -го каскаду перевіряється виконання умови:

$$P_{l \text{ пом.}} = \frac{1}{2^m - 1} \sum_{j=1}^{2^m - 1} j \binom{2^m - 1}{j} p_l^j (1 - p_l)^{2^m - 1 - j} \leq P_{\text{пом. доп.}}, \quad (7)$$

де p_l – ймовірність бітової помилки декодування турбокодів l -го каскаду.

За умови невиконання виразу (7) для l -го каскаду, інкрементуємо параметри k , n , m зовнішнього коду Ріда-Соломона: $k = k + 1$, $n = n + 1$, $m = m + 1$. Це впливає на швидкість кодування R_{2l} . Якщо в результаті зміни $R_{2l} < R_{2 \text{ доп.}}$, то встановлюємо початкові значення для параметрів кодів Ріда-Соломона і вибираємо нове значення швидкості кодування турбокоду R_{1l} . Далі відбувається відповідна зміна структури компонентних кодів турбокоду.

У табл. 1 представлені параметри кодів Ріда-Соломона для l -го каскаду, які були отримані за допомогою рішення задачі (7).

Таблиця 1. Параметри кодів Ріда-Соломона

p_l	$P_{l\text{пом.}}$	m	t	k	n
10^{-1}	10^{-2}	4	4	7	15
	10^{-3}	4	5	5	15
	10^{-4}	5	10	11	31
10^{-2}	10^{-3}	3	1	5	7
	10^{-4}	3	2	3	7
	10^{-5}	4	3	9	15
	10^{-6}	4	4	7	15

Для перевірки ефективності визначення структури конкатенації кодів проведено імітаційне моделювання БСПД. На рис. 3 представлені характеристики залежності ймовірності бітової помилки від відношення сигнал-завада.

При моделюванні використовувався сигнал OFDM-2048, кількість паралельних каскадів кодування $L = 4$, внутрішні турбокоди (кількість біт в блоці $N = 6144$, псевдовипадковий перемежувач, $R_{1l} = 4/5$, $R_{1l\text{доп.}} = 1/2$, поліноми (1, 13/11), два компонентних кодера (декодера), метод декодування Log-Map, кількість ітерацій декодування $I = 8$) і аналогічні тим, які використовуються в системі 4G LTE-Advanced, та зовнішні коди Ріда-Соломона ($k \in \overline{3,11}$, $n \in \overline{7,63}$, $m \in \overline{3,7}$, $t \in \overline{1,10}$, $R_{2l} = 4/5$, $R_{2l\text{доп.}} = 1/2$). Відношення сигнал-шум прийнято 9,58 дБ. У першому каскаді кодування діє шумова завада в частині смуги (коефіцієнт перекриття $\gamma = 0,25$), при якій ймовірність бітової помилки декодування дорівнює $P_{1\text{пом.}} = 10^{-2}$ для відношення сигнал-завада $E_b / N_j = 1,15$ дБ. У другому, третьому і четвертому каскадах навмисні завади відсутні – $P_{2\text{пом.}} = P_{3\text{пом.}} = P_{4\text{пом.}} = 10^{-4}$.

Допустиме значення ймовірності бітової помилки дорівнює $P_{\text{пом.доп.}} = 10^{-4}$. Таким чином, у першому каналі буде змінюватися швидкість кодування каскадного коду, а швидкості кодування в другому, третьому та четвертому каналах залишаться незмінними, тобто $R_{2i} = 3/4$, $i \in \overline{2,4}$. Швидкість кодування зовнішнього коду першого каскаду змінюється з $R_{21} = 4/5$ (сумарна швидкість кодування становить $R_{\Sigma} = 16/25$) на $R_{21} = 3/4$ ($R_{\Sigma} = 3/5$), а потім на $R_{21} = 5/8$ ($R_{\Sigma} = 1/2$). При цьому пропускна здатність зменшується з $C = 1,279$ біт/символ до $C = 1,184$ біт/символ. Результати моделювання свідчать, що в подібній ситуації в системі 4G LTE-Advanced швидкість кодування турбокоду змінилась би з $R = 2/3$ на $R = 4/9$ (рис. 4), а пропускна здатність зменшилась би з $C = 1,332$ біт/символ до $C = 0,888$ біт/символ.

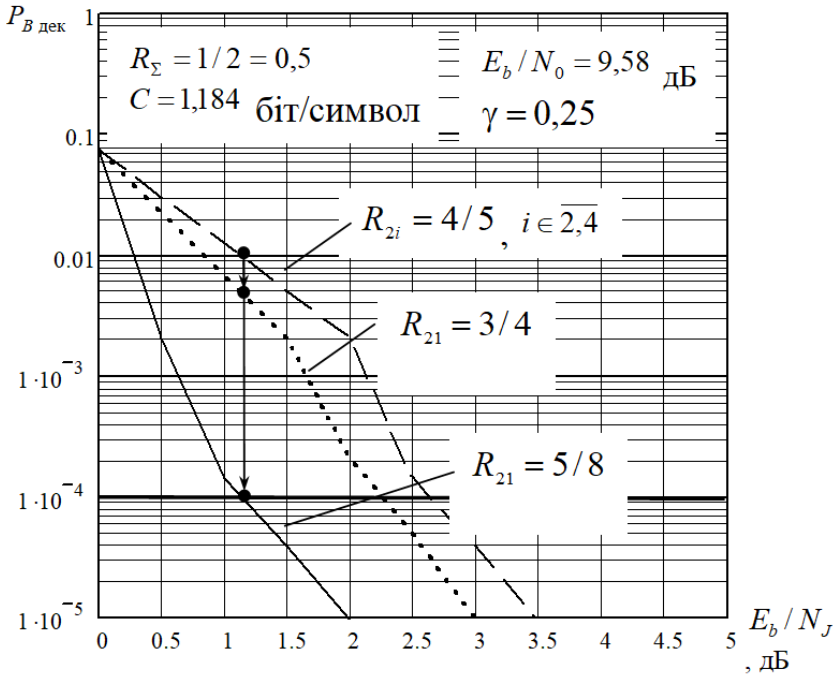


Рис. 3. Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування від відношення сигнал-шум для системи з паралельно-послідовним каскадним кодуванням

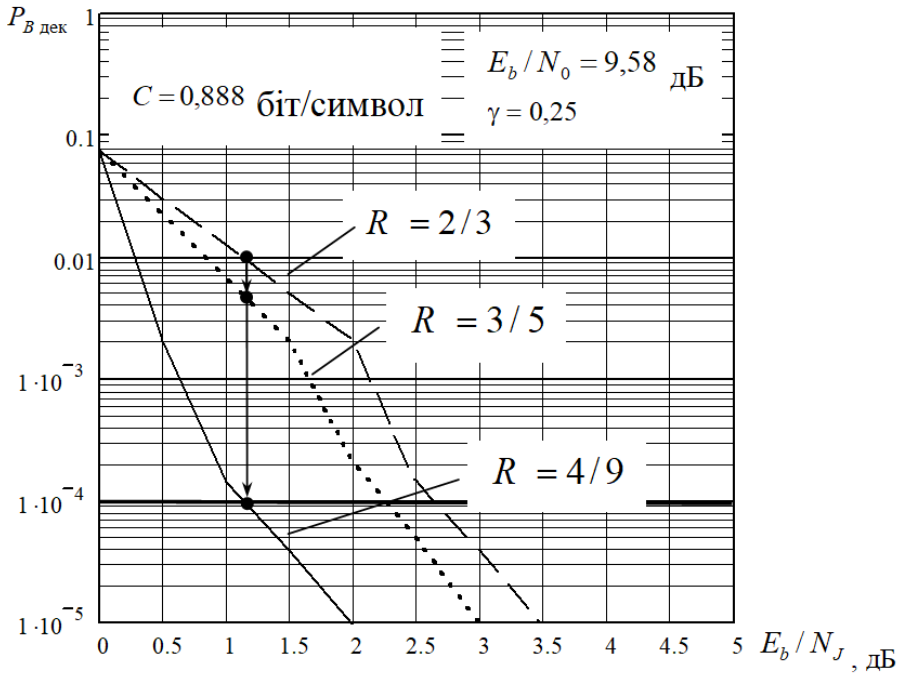


Рис. 4. Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування від відношення сигнал-завада для системи 4G LTE-Advanced

Тому, використання запропонованої схеми структурної адаптації каскадних кодів приводить до забезпечення заданої достовірності передачі інформації, при цьому пропускна спроможність БСПД зменшується на 4–12%, тоді як у системі 4G LTE-Advanced на 20–35%.

Збільшення швидкості кодування в першому каскаді дає змогу підвищити достовірність передачі інформації. На рис. 5 показана залежність ймовірності бітової помилки від відношення сигнал-завада, змодельована з параметрами, аналогічними тим, які використовувались для отримання залежностей рис. 3. Видно, що додаткова зміна швидкості кодування до $R_{21} = 1/3$ приводить до одержання енергетичного виграшу кодування 0,5 дБ, при цьому сумарна пропускна здатність знижується не набагато і дорівнює $C = 1,12$ біт/символ.

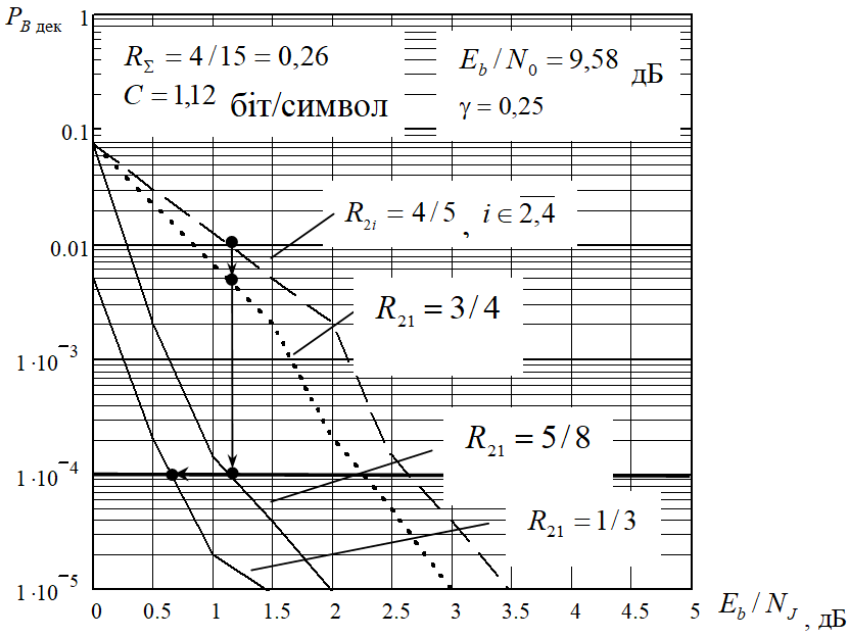


Рис. 5. Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування від відношення сигнал-завада для системи з паралельно-послідовним каскадним кодуванням

Подальша зміна швидкості кодування зовнішнього коду Ріда-Соломона сприятиме підвищенню достовірності передачі інформації. На рис. 6 показано графік залежності середньої ймовірності бітової помилки від відношення сигнал-завада під час використання тільки послідовного каскадного кодування та кодування, аналогічного системі 4G LTE-Advanced.

Аналіз графічних залежностей свідчить, що для ймовірностей бітової помилки декодування $P_{В дек} > 10^{-3}$ кращі характеристики показує схема з одним кодеком, при ймовірностях бітової помилки $P_{В дек} < 10^{-3}$ кращі характеристики достовірності має каскадна побудова кодеків.

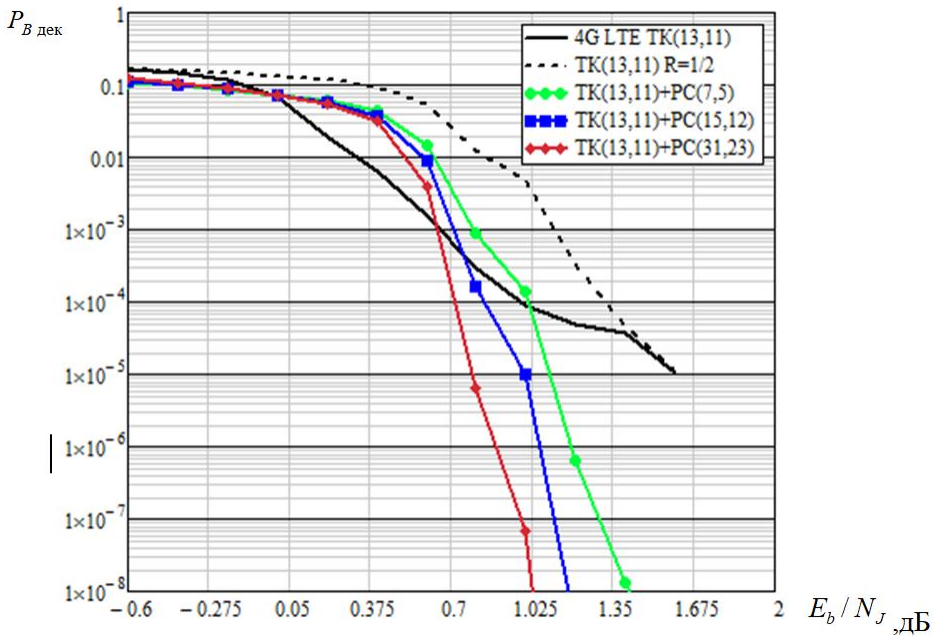


Рис. 6. Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування від відношення сигнал-завада під час використання каскадного кодування

Так, для ймовірності бітової помилки декодування $P_{B \text{ дек}} = 10^{-5}$ каскадна побудова кодеків забезпечує енергетичний вииграш кодування 0,8 дБ без зміни швидкості кодування, тобто при однаковій пропускній здатності БСПД.

Висновки

1. У статті пропонується метод структурної адаптації каскадних кодів, призначений для забезпечення заданої достовірності передачі інформації безпроводових систем передачі даних при дії завад за рахунок динамічного синтезу комбінованих структур каскадних кодів в умовах апіорної невизначеності.

2. Комбінована структура побудови каскадних кодів разом з технологією OFDM дозволяє незалежно адаптувати швидкість кодування кожного з каскадів кодування залежно від результатів аналізу достовірності інформації в цьому каскаді, що приводить до забезпечення заданої достовірності передачі інформації, при цьому пропускна спроможність БСПД зменшується на 4–12% проти 20–35% відомих результатів.

3. Використання кодів Ріда-Соломона в послідовній каскадній схемі з турбокодами за рахунок адаптації швидкості кодування цієї каскадної конструкції дозволяє одержати енергетичний вииграш 0,5–0,7 дБ без збільшення пропускної спроможності системи передачі в порівнянні з системами, які використовують тільки турбокоди.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Растрингин Л.А. (1981). Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне. 375 с.
2. Zaitsev S.V., Kazymyr V.V. (2017). Structural adaptation of the turbo code coder and decoder for generating the transmission repeat request under conditions of uncertainty. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol. 60. P. 18–27.
3. Bae J., Abotabl A., Lin H.P., Song K.B., Lee J. (2019). An overview of channel coding for 5G NR cellular communications. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*. P. 1-14. DOI: 10.1017/ATSIP.2019.10.
4. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.Я. (1981). Адаптивное управление динамическими объектами. М. : Наука. 448 с.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2023 і прийнята до друку після рецензування 04.09.2023

REFERENCES

1. Rastrigin, L.A. (1981). Adaptation of complex systems. Riga: Zinatne [in Russian].
2. Zaitsev, S.V., & Kazymyr, V.V. (2017). Structural adaptation of the turbo code coder and decoder for generating the transmission repeat request under conditions of uncertainty. *Radioelectronics and Communications Systems*, 60, 18–27.
3. Bae, J., Abotabl, A., Lin, H.P., Song, K.B., & Lee, J. (2019). An overview of channel coding for 5G NR cellular communications. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 1-14. <https://doi.org/10.1017/ATSIP.2019.10>
4. Fomin, V.N., Fradkov, A.L., & Yakubovich, V.Ya. (1981). Adaptive control of dynamic objects. Moscow: Science [in Russian].

The article was received 17.05.2023 and was accepted after revision 04.09.2023

Зайцев Сергій Васильович

доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6643-917X> **e-mail:** szaitsev@tu.kielce.pl

Василенко Владислав Михайлович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

Триснюк Тарас Васильович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com

Сокоринська Наталя Василівна

старший науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України

Адреса робоча: 03049, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 28 б

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9713-7289> **e-mail:** sokor-nata@ukr.net

УДК 502.51:504.5

Vasyl Trysnyuk, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Viktor Shumeiko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0285-4566> **e-mail:** shym1983@ukr.net

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv

INFORMATION TECHNOLOGIES OF SIMULATION OF BEAM STRUCTURES USING MULTISPECTRAL SPACECRAFT MATERIALS

Abstract. *The work is devoted to solving the scientific and practical task of modeling beam structures based on the materials of multispectral space images based on aerospace and contact measurements. The effectiveness of the use of space survey materials for the study of soil cover largely depends on the time of the survey. The linear forms of erosion (waterholes, ravines) are deciphered on space photographs, which are displayed only on images with a spatial resolution of 1-2 meters in the form of narrow, clearly delineated contours that have a jagged shape.*

The developed clustering algorithm makes it possible to more clearly identify beam structures on satellite images in combination with data from digital terrain models (DRM). A number of experiments were conducted on some set of remote sensing data of Boryspil and c. Panchevo, Novoukrainsky District, Kirovohrad Region. The experiments consisted in determining the spectral and other features of the beam structures (for example, the shape, soil types, etc.), which are located in different places of the territory that was investigated.

On images with a spatial resolution of more than 10 meters, ravines are usually not displayed, but networks of beams with elongated wavy tree-like shapes are clearly visible. In the course of the study, data from multispectral imaging from the Sentinel-2 satellite (MSI scanner) and DEM (Digital Elevation Model, DEM) data obtained through the SRTM 3 archive were used.

The research results showed that automating the process of highlighting beam structures on multispectral images with a spatial resolution of 30 m is very difficult. First of all, this can be explained by the fact that the beam consists of vegetation that is also present outside the beam. In addition, the number of channels of the ETM+ scanner and its spatial ability are not enough for a clearer separation of the "beam" class.

Key words: *information technologies; ecosystem; soils; topography; spectral channels; remote methods; contact methods.*

В.М. Триснюк, В.О. Шумейко

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
м. Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАЛОЧНИХ СТРУКТУР ЗА МАТЕРІАЛАМИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ КОСМОЗНІМКІВ

Анотація. *Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання з моделювання балочних структур за матеріалами мультиспектральних космознімків на основі аерокосмічних та контактних вимірювань. Ефективність застосування матеріалів космічної зйомки для вивчення*

грунтового покриву в значній мірі залежить від часу проведення зйомки. На космознімках дешифруються лінійні форми ерозії (водороїни, яри), які відображаються тільки на знімках з просторовим розрізненням 1–2 метри у вигляді вузьких, чітко окреслених контурів, які мають зазубрену форму.

Розроблений алгоритм кластеризації дозволяє більш чітко виявляти на космознімках балочні структури у комплексі з даними цифрових моделей рельєфу (ЦМР). Була проведена низка експериментів над деякою множиною даних дистанційної зйомки м. Бориспіль та с. Панчево, Новоукраїнського р-ну Кіровоградської обл. Експерименти полягали у визначенні спектральних та інших особливостей балочних структур (наприклад, форми, типів ґрунтів та ін.), які розташовані у різних місцях території, що була досліджена.

На знімках з просторовим розрізненням більше 10 метрів яри, як правило, не відображаються, але добре виділяються мережі балок, що мають витягнуті хвилясті деревоподібні форми. В ході дослідження були використані дані мультиспектральної зйомки з супутника Sentinel-2 (сканер MSI) та дані DEM (Digital Elevation Model, ЦМР), отримані через архів SRTM 3.

Результати досліджень показали, що автоматизація процесу виділення балочних структур на мультиспектральних зображеннях з просторовим розрізненням в 30 м дуже складна. Перш за все це можна пояснити тим, що балка складається з рослинності, яка присутня і за межами балки. Крім того, кількості каналів сканера ETM+ і його просторової здатності недостатньо для більш чіткого виділення класу “балки”.

Ключові слова: інформаційні технології; екосистема; ґрунти; рельєф місцевості; спектральні канали; дистанційні методи; контактні методи.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.144-153>

Вступ

Із збільшенням антропогенних навантажень порушуються збалансовані природно-екологічні зв'язки, прогресують процеси деградації (ерозія, зсуви, кислотність, заболоченість, засолення, забруднення ґрунтів). Космічні знімки не тільки дозволяють судити про розвиток та інтенсивність процесів водної ерозії та вітрової дефляції ґрунтів, але й відображають агротехнічні заходи, що направлені на запобігання цим процесам. Інший вид агротехнічних заходів – вилучення з сільськогосподарського використання та заліснення верхів'їв та схилів балок. Методів, які дозволяють автоматизувати процеси виділення лінійних структур, небагато. Наприклад, відомим є інструментарій системи Geomatica, який дозволяє за даними радарної зйомки будувати векторні карти розподілу лініаментів. Відомим методом, що дозволяє визначати лінійні структурні елементи зображень, є перетворення Хафа [1]. Але обчислювальні методи, які дозволяють ефективно встановити розташування балок та виділяти їх у окремі класи, практично невідомі. Тому ця проблематика є надзвичайно актуальною, оскільки розробка методу щодо автоматизації процесу ідентифікації балочних об'єктів на зображеннях є дуже корисною і може бути у подальшому застосована при побудові тематичних карт місцевості, а також дослідженнях рельєфу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальні дослідження техногенних чинників, пов'язані із моделюванням балочних структур за матеріалами мультиспектральних космознімків територій, ґрунтуються на використанні методики експертної оцінки та інформаційних технологій. В Україні основними науковцями в області космічних досліджень ґрунтів є:

Лялько В.І. – спектральні характеристики рослинного покриву; Попов М.О. – прогнозування врожайності зернових культур за багатоспектральними даними ДЗЗ [2], Трофимчук О.М., Красовський Г.Я., Греков Л.Д. – космічний моніторинг забруднення земель [3], Панас Р.М. – космічний моніторинг деградації ґрунтів [4].

Мета роботи. Метою роботи є розробка та удосконалення інформаційно-технічного моделювання балочних структур за матеріалами мультиспектральних космоснімків.

Виклад основного матеріалу дослідження

В основі дистанційного зондування ерозійних процесів і явищ лежить сильний вплив ерозії на оптичні властивості ґрунтів. Цей вплив має місце завдяки тому, що ерозія ґрунтів приводить до зниження вмісту в них темно-кольорових частинок гумусу і глиняних фракцій гранулометричного складу, що, в свою чергу, приводить до освітлення (збільшення яскравості) ґрунтового матеріалу. До того ж, це явище підсилюється в результаті виходу на поверхню більш світлих перехідних горизонтів і породи внаслідок змиву верхніх горизонтів ґрунтів (це стосується тих ґрунтів, верхні горизонти яких із самого початку являються більш темними в порівнянні з породою). На космічних знімках знаходить відображення така важлива динамічна властивість ґрунтів, як еродованість, розвиток якої частіше пов'язаний з несприятливими наслідками господарської діяльності.

Еродованість ґрунтів може бути наслідком або водної ерозії, або вітрової дефляції. На космоснімках дешифруються лінійні форми ерозії (водороїни, яри), які відображаються тільки на знімках з просторовим розрізненням 1–2 метри у вигляді вузьких, чітко окреслених контурів, які мають зубчену форму.

На знімках з просторовим розрізненням більше 10 метрів яри, як правило, не відображаються, але добре виділяються мережі балок, що мають витягнуті хвилясті деревоподібні форми. Днища та схили балок звичайно зайняті природною рослинністю, більш густою та вологолюбивою у нижніх частинах схилів та по днищах. Фахівцями Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України був розроблений алгоритм кластеризації, що дозволяє більш чітко виявляти на космоснімках балочні структури у комплексі з даними цифрових моделей рельєфу (ЦМР). Була проведена низка експериментів над деякою множиною даних дистанційної зйомки м. Бориспіль та с. Панчево, Новоукраїнського р-ну Кіровоградської обл. Експерименти полягали у визначенні спектральних та інших особливостей балочних структур (наприклад, форми, типів ґрунтів та ін.), які розташовані у різних місцях території, що була досліджена. Також був досліджений інструментарій моделювання, що входить до складу програмного забезпечення пакету ERDAS Imagine, і розроблений алгоритм кластеризації додаткових даних з ЦМР [5].

Динаміку змін місцевості відслідковуємо на основі різночасових космоснімків. Наприклад, на рисунку 1 представлені фрагменти космоснімків з супутників Landsat-5 та Landsat-7, що отримані у 2004 (рис. 1а) та у 2022 (рис. 1б) роках відповідно. На зображенні представлено місто Бориспіль. На рисунку 2 показані оцифровані умовні межі міста, які зазнали значних змін за період з 1990 по 2022 роки.



Рис. 1. Космічний знімок м. Бориспіль: а – зйомка Landsat-5 (2014 р.); б – зйомка Landsat-8 (2022 р.)

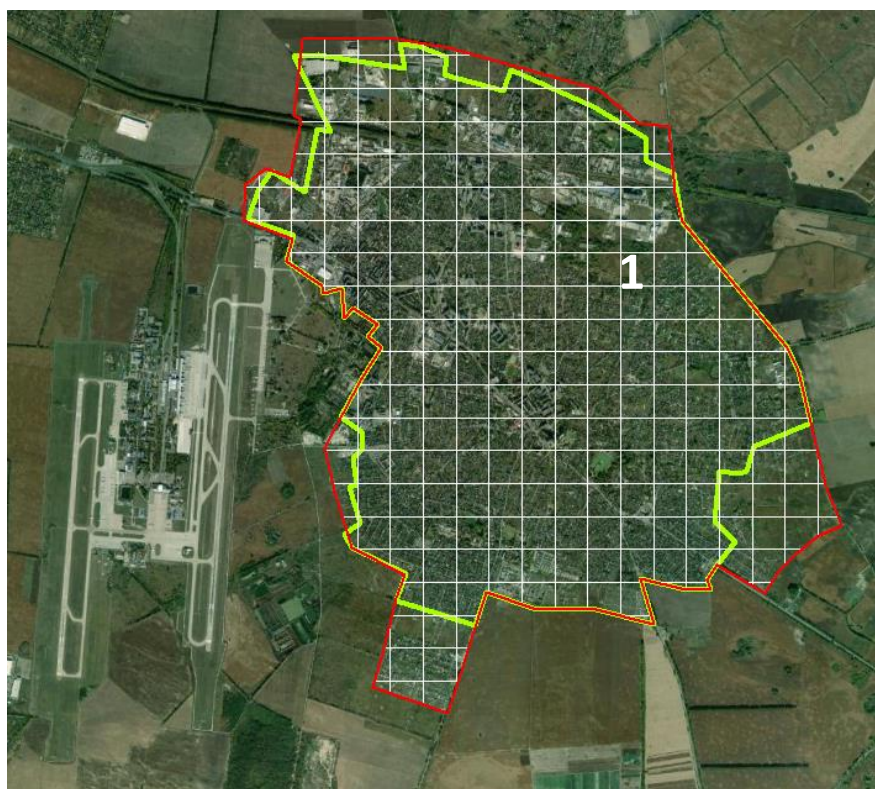


Рис. 2. Зміни у межах м. Бориспіль: 1 (зелений колір) – стан на 2014 р.; 2 (червоний колір) – стан на 2022 р.

Але для автоматизованого встановлення балочних структур, як буде показано далі, таких знімків недостатньо. У різних працях, наприклад, для досліджень використовують дані радарної зйомки. Основною відмінністю такої зйомки є сам принцип реєстрації сканером інформації про земну

поверхню. Одним з багатьох загальнодоступних архівів радарної зйомки (2010 р.) є архів SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

В ході дослідження були використані дані мультиспектральної зйомки з супутника Sentinel-2 (сканер MSI) та дані DEM (Digital Elevation Model, ЦМР), отримані через архів SRTM 3 (рис. 3).

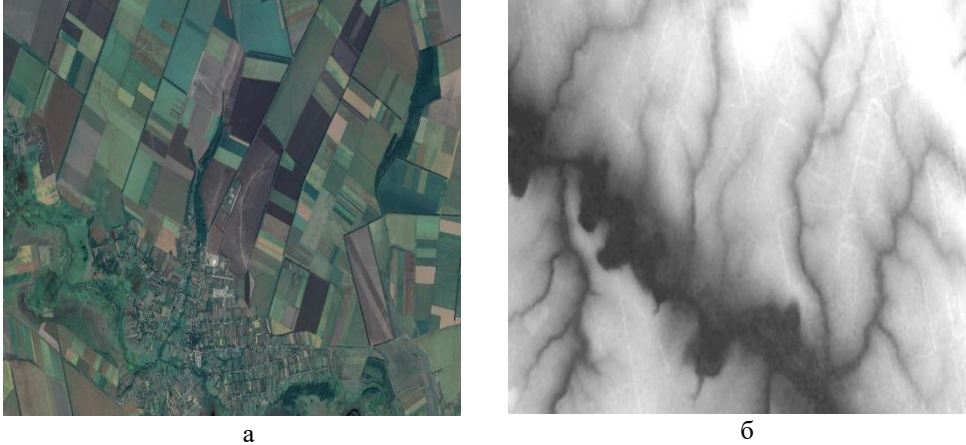


Рис. 3. Космознімки с. Панчево, Кіровоградська обл.: а – мультиспектральна зйомка; б – радарна зйомка

Сучасні програмні засоби для обробки космознімків є потужними та включають велику кількість різних функцій. До таких програмних засобів відносять ERDAS Imagine, ENVI, PCI Geomatica та інші. У ході дослідження використовувався інструментарій ERDAS Imagine версії 8.4. Для дослідження спектральних властивостей однієї з великих балок с. Панчево, Кіровоградська обл. побудовані одинадцять спектральних профілів по точках, що були розташовані уздовж балки (рис. 4).

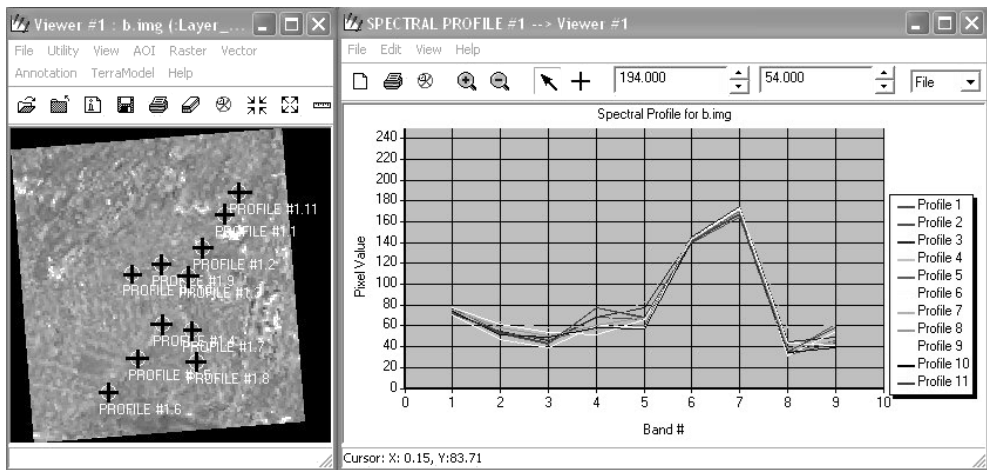


Рис. 4. Спектральні профілі точок, що розташовані уздовж балки на космознімку з супутника Sentinel-2 (MSI)

Відомо, що супутник Sentinel-2 обладнаний сканером MSI. Дані 2021 року зйомки, що отримані з архіву Європейського космічного агентства, містять 12 каналів. Канали 2, 3 та 4 – це канали синього, зеленого та червоного піддіапазонів видимого спектру; 5, 6 та 7 – крайній червоний; 8 – ближнього інфрачервоного; 9 та 10 – представляють розбитий тепловий канал сканера; 11 та 12 – середній інфрачервоний; 1 – панхроматичний канал зйомки.

Як показали дослідження, при розташуванні контрольних точок уздовж балки отримуємо коливання значень практично по всіх каналах. Крім того, оскільки балка покрита густою зеленою рослинністю (час зйомки – місяць серпень), то спектральні характеристики будуть дуже подібними до звичайної густої зеленої рослинності, що росте за межами балки (наприклад, у парках) [6, 7].

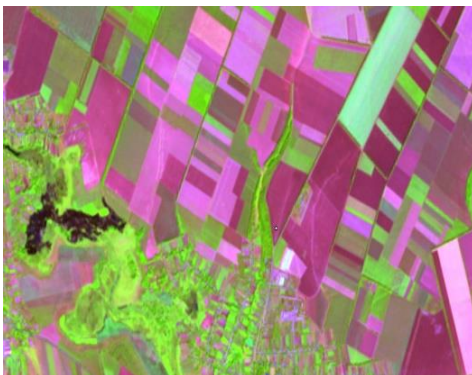
Однак слід відзначити, що значення у каналі 8 більш низькі, ніж у випадку паркової рослинності. Це можна пояснити наявністю у днищі балки води та наявністю більш густої терасової рослинності. Було також встановлено, що значення у теплових каналах значно перевищують у рослинності, яка знаходиться поза межами балки, наприклад росте на вулицях населеного пункту.

Тобто маємо простіший класифікатор. Як показали дослідження, наведені умови будуть призводити до появи у тематичному зображенні великої кількості помилкових пікселів і тому слід скористатися більш звуженими межами інтервалів класифікації, наприклад наступними, які приведуть до більш чіткого віднесення пікселів до об'єкта балки:

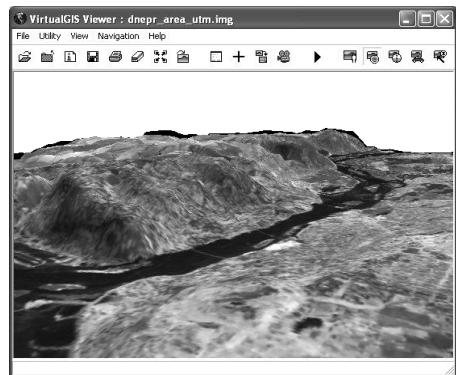
$$f(x, y) = \text{Red, якщо } \begin{cases} 60 \leq f_4(x, y) \leq 70 \\ 140 \leq f_6(x, y) \leq 150 \\ 160 \leq f_7(x, y) \leq 170 \\ 40 \leq f_8(x, y) \leq 55 \end{cases}, \text{ інакше } f(x, y) = \text{Gray. (1)}$$

Як довели експерименти, жодні відомі методи класифікації, що присутні в ERDAS Imagine 8.4, не дозволяють зробити класифікацію без значної кількості помилок.

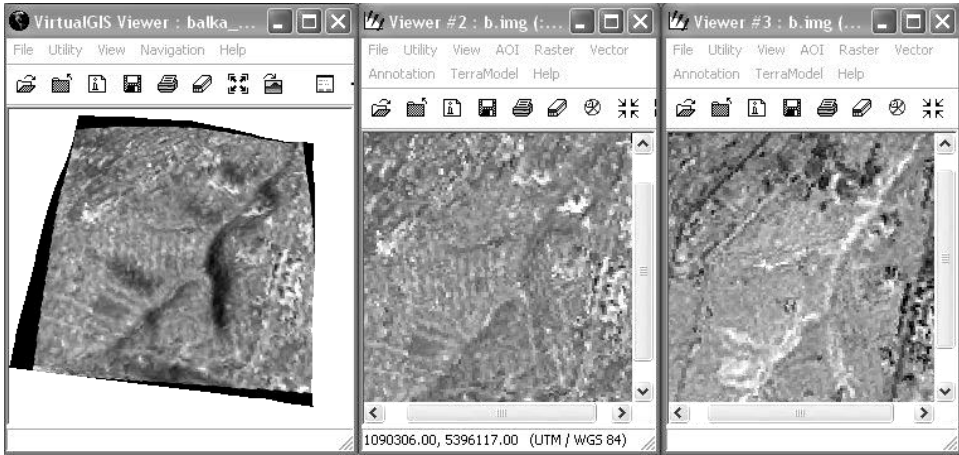
Розглянемо випадок застосування даних SRTM. На рисунку 5 представлені відображення космознімку та DEM за даними SRTM.



а)



б)



в)

Рис. 5. Цифрова модель рельєфу із космоснімком: а – вид зверху; б – вид з поверхні; в – балка, що досліджувалась

Нехай маємо множину точок $p_i(x, y, z)$, таких, що покривають ділянку $f(x, y)$ з деяким кроком, та маємо деяку ділянку $g(x, y)$, яка покриває балку. Відомі значення z_{\min} та z_{\max} для $f(x, y)$. Нехай основним критерієм віднесення до кластеру буде виконання наступної умови:

$$p_i(x, y, z) \in \text{Cluster}, \text{ якщо } (D_{p_i(x, y, z), p(x, y, z_{\min})} \leq R) \wedge (Pr_{p_i(x, y, z)} \leq Pr'), \quad (2)$$

де D – відстань між двома точками, що не перевищує радіус пошуку R ;

Pr – відсоток, що визначає висоту точки відносно z_{\min} та не може перевищувати задане значення Pr' .

Алгоритм віднесення $p_i(x, y, z)$ до $g(x, y)$ буде наступним:

Крок 1. Користувачем задаються R та Pr' .

Крок 2. Створюється новий кластер $Cluster1$.

Крок 3. Знаходиться $p(x, y, z_{\min})$ та заноситься до $Cluster1$.

Крок 4. Знаходяться $p_i(x, y, z)$, що задовольняє (3) та заноситься до $Cluster1$.

Крок 5. Якщо є ще $p_i(x, y, z)$, які не увійшли до $Cluster1$, то перевіряється $Pr_{p_i(x, y, z)}$ та створюється $Cluster2$.

Крок 6. Повторюється крок 4 для $Cluster2$.

І так далі, поки не буде вичерпано множину всіх можливих $p_i(x, y, z)$.

Щоб більш чітко з'ясувати форму балки та значення висот, можливо з ERDAS Imagine виконати експорт даних DEM у формат системи Surfer. На рисунку 6 представлено модель рельєфу балки, що побудована в цій системі.

У середовищі MS Visual Studio мовою C++ була розроблена програма, яка реалізувала запропонований алгоритм кластеризації. Вхідними даними служили $p_i(x, y, z)$, які зчитувалися з файлу формату Surfer GRD. В результаті був отриманий набір точок, що покривають структуру балки (рис. 7). Відсоток попадання у зону балки склав 49%.

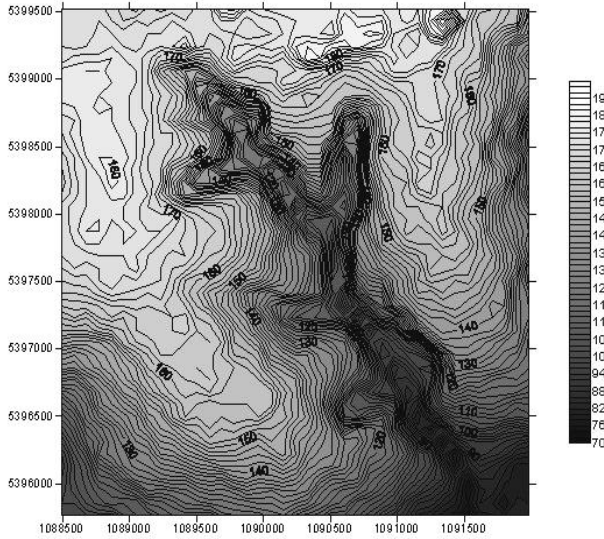


Рис. 6. Модель рельєфу балки, яка побудована у системі Surfer

Слід зазначити, що результати кластеризації сильно залежать від вибору значень параметрів Pr' та R .

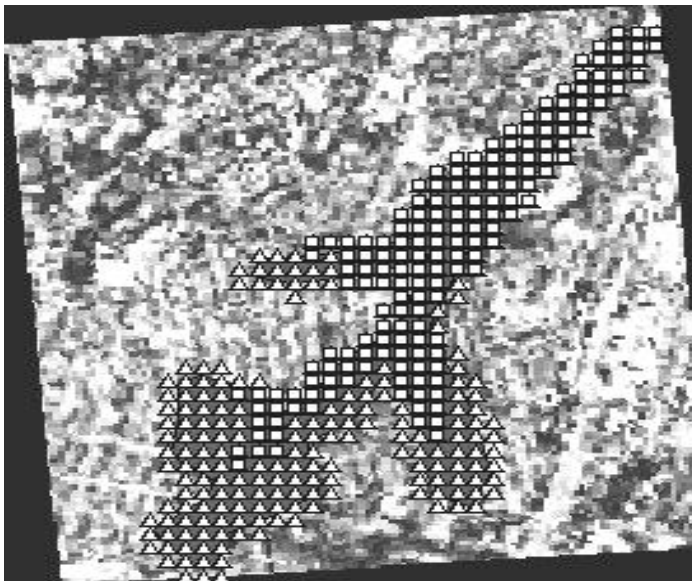


Рис. 7. Результат роботи алгоритму кластеризації (параметри $R = 300$ м, $Pr' = 10\%$ (внутрішньокластерний), $Pr' = 50\%$ (міжкластерний))

Висновки

Результати досліджень показали, що автоматизація процесу виділення балочних структур на мультиспектральних зображеннях з просторовим розрізненням в 30 м дуже складна. Насамперед це можна пояснити тим, що балка складається з рослинності, яка присутня і за межами балки. Крім того, кількості каналів сканера ETM+ і його просторової здатності недостатньо для більш чіткого виділення класу “балки”.

Додаткові дані про рельєф дозволяють чітко визначити місця балок, але напряму їх використання у процесах класифікації мультиспектральних зображень без додаткових операцій ускладнено. Такою додатковою операцією може бути запропонований алгоритм, або його різні модифікації, який дозволяє отримувати тільки ті елементи з цифрової моделі рельєфу, які відносяться до балочних структур. Оперуючи координатами X та Y з отриманої множини точок, їх можна використати як маску для операції виділення балок на мультиспектральних космоснімках. Трикутники – точки, що є контрольними. Прямокутники – точки, що отримані у процесі кластеризації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Красовський Г.Я., Трофимчук О.М., Крета Д.Л., Клименко В.І., Пономаренко І.Г., Суходубов О.О. Синтез картографічних моделей забруднення земель техногенним пилом з використанням космічних знімків // Екологія і ресурси. – К.: ПНБ, 2005. – №12. – С. 37–55.
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. [2013] Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling. – Springer, Berlin, Heidelberg. 347–352.
3. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду / Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України; Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ : Супрун В.П., 2021. – 343 с. // ISBN 978-617-7468-53-9.
4. Машков О.А.; Триснюк В.М.; Мамчур Ю.В.; Жукаускас С.В.; Нігородова С.А.; Курило А.В. Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: наук.-техн. журн. – Івано-Франківськ : Симфонія форте. – 2019. № 1. (19) 2019. С. 69–77. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/162108/03-Mashkov.pdf?sequence=1>
5. Триснюк В.М. Система управління екологічною безпекою природних і антропогенно-модифікованих геосистем. Системи обробки інформації. – 2016. – №12. – С. 185–188. Index Copernicus.
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., Radlowska, K.O. [2019] Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.
7. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin. Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018. С. 61–67.

Стаття надійшла до редакції 03.07.2023 і прийнята до друку після рецензування 01.09.2023

REFERENCES

1. Krasovsky, G.Ya., Trofymchuk, O.M., Kreta, D.L., Klymenko, V.I., Ponomarenko, I.G., & Sukhodubov, O.O. (2005). Synthesis of cartographic models of land pollution by man-made dust using space images. *Ecology and resources*, 12, 37-55.
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. In *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347-352). Springer, Berlin, Heidelberg.
3. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund. Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine; Ivano-Frankivsk national. technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P.
4. Mashkov, O.A., Trysnyuk, V.M., Mamchur, Y.V., Zhukauskas, S.V., Nigorodova, S.A., & Kurylo, A.V. (2019). A new approach to the synthesis of restorative control for remotely piloted aerial vehicles for environmental monitoring. *Environmental safety and balanced resource use: science and technology journal*, 1(19), 69-77. Retrieved from <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/162108/03-Mashkov.pdf?sequence=1>
5. Trysnyuk, V.M. (2016). Environmental safety management system of natural and anthropogenically modified geosystems. *Information processing systems*, 12, 185-188.
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., & Radlowska, K.O. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, Extended Abstracts.
7. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare*, 1, 61-67.

The article was received 03.07.2023 and was accepted after revision 01.09.2023

Триснюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Шумейко Віктор Олександрович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0285-4566> **e-mail:** shym1983@ukr.net

UDC 519.6:544.431.11: 544.016.5-022.53

Giorgi Kapanadze¹, PhD, Professor
e-mail: kapanadze.49@mail.ru

Vakhtang Balavadze², PhD, Professor
e-mail: vakhtang.balavadze@iliauni.edu.ge

Leila Kristesiashvili³, PhD, Associate Professor
e-mail: l.kristesiashvili@gtu.ge

Vakhtang Archvadze³, PhD Student
e-mail: modernline.georgia@gmail.com

¹Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia

²Ilia State University, Tbilisi, Georgia

³Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia

SEARCH FOR AN EQUAL-STRENGTH CONTOUR INSIDE A VISCOELASTIC RECTANGLE

Annotation. Irregularity of geometric and physical parameters in thin-walled structures leads to significant concentrations of stresses and creates dangerous zones for the spread of cracks or plastic deformations. Under the influence of a tense state, they are similar to gills. Stress concentration zones in areas of irregularity have a significant impact on the tensile strength and durability of thin-walled structures. Traditional analytical and numerical methods known at this time are less effective in investigating the stress-strain condition of corrugated thin-walled structures. It is, therefore, necessary to develop new effective methods for solving the tasks of this class. Currently, for engineering calculations, there is virtually no comparison of simple and convenient formulas for determining the critical compressive load taking into account the peculiarities of the design. The scientific novelty of the paper is that to achieve the set goal, it will be used for the first time in the general theory developed for the calculation of buildings and structures, known as the "Theory of elasticity in ordinary differential equations." The paper will show that the accuracy of this new theory is adequate to the classical elongation theory and at the same time dramatically simplifies the solution of any problem in the calculation of tiles, which is achieved by converting them to conventional differential equations. The general methods of compiling differential equations, the methods of its simplification, for the calculation of membranes with cross-sectional incisions, and the calculation of plates under conditions of nonlinear deformation are discussed. Methods for solving differential equations with variable and momentum coefficients are specified. An algorithm and a program for the analysis of the stress-strain state of spatial structures and their elements are developed. The practical value of the paper lies in the possibility of using developed methods and programs for the design and construction of buildings, as well as for the stability tasks of slabs with holes, and panels used in construction as typical assembly elements. The given mathematical algorithm and program for specific tasks, which are distinguished by simplicity, can be used by design and research organizations in the calculation and design of plates and membranes.

Keywords: Kelvin-Voigt model; Kolosov-Muskhelishvili formulas; Riemann-Hilbert problems; Volterra equation.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.154-162>

1. Problem Statement

Let S be a doubly connected region whose outer boundary is a rectangle A_1, A_2, A_3, A_4 , whose sides are parallel to the coordinate axes, and whose inner boundary is a smooth closed contour (an unknown part of the boundary of the region S). It is assumed that normally compressive stresses with Known principal vectors act on the sides of the rectangle (or constant normal displacements are given $V_n(\sigma) = \text{const}$), and the inner part (the desired equal-strength contour) is free from external forces. The equal strength of the desired contour lies in the fact that the tangential normal stress acting on it at each point of the contour takes the same value depending only on time t, i.e. $\sigma_{\theta}(z, t) = K_0(t)$. The viscoelasticity of the S region as understood by the Kelvin-Voight model.

To solve the problem, methods of complex analysis are used (methods of the theory of conformal mappings and boundary value problems of analytic functions), and the equation of the desired contour is written in an analytical form.

Similar problems of the plane theory of elasticity, plate bending and extended systems are considered in [G. Kapanadze (2003, 2007), S. Shavlakadze, G. Kapanadze, A. Gogolauri (2019)] and Ukrainian scientists [16-22].

2. Problem solution

Let us present some results from [9] and monograph [10]. In particular, the boundary conditions of the second main problem of the plane theory of viscoelasticity according to the Kelvin-Voight model can be written in the form [R. Banrsuri (2006, 2007), R. Banrsuri, G. Kapanadze (2013), D. Gurgenisze, G. Kipiani (2020), M. Mikeladze (2018), R. Tskedadze, D. Tabatadze (2019), G. Kifiani, G. Akhalaia, V. Beridze, G. Gegenava (2012)].

$$\int_0^t \frac{ae^* e^{k(\tau-t)}\varphi(\sigma, \tau) + (\varphi(\sigma, \tau) - \overline{\sigma\varphi'(\sigma, \tau)} - \overline{\psi(\sigma, \tau)})}{2\mu(u + iv)}, \sigma \in L \tag{1}$$

Or

$$\int_0^t [ae^* e^{k(\tau-t)} + 2e^{m(\tau-t)}]\Phi(\sigma, \tau)d\tau - \int_0^t e^{m(\tau-r)}(\Phi(\sigma, \tau) + \overline{\Phi(\sigma, \tau)})d\tau = 2\mu^*(u' + iv'); \tag{2}$$

$$\Phi(\sigma, \tau) = \phi'(\sigma, t), \sigma \in L$$

And the first boundary condition of the main problem has the form [10]:

$$\varphi(\sigma, t) + \overline{\sigma\varphi'(\sigma, \tau)} + \overline{\psi'(\sigma, \tau)} = i \int_0^\sigma (X_n + iY_n)ds . \tag{3}$$

$$\sigma \in L$$

Or

$$\Phi(\sigma, t) + \overline{\Phi(\sigma, t)} + \overline{\sigma\Phi'(\sigma, \tau)} + \overline{\Psi'(\sigma, \tau)} = N(\sigma, \tau) + iT(\sigma, t) . \quad (4)$$

$\sigma \in L$

Where

$L = L_1 \cup L_0$; $L_1 = U_{k=1}^4 L_k^{(1)}$, $L_k^{(1)}$ – the sides of the rectangle, L_0 – the boundary of the holes, and by t we will always mean the time parameter.

Taking into account (4), condition (2) can be written in the form:

$$\Gamma\Phi(\sigma, t) - M[N(\sigma, t) + iT(\sigma, t)] = 2\mu^*(u' + iv') . \quad (5)$$

Where Γ and M are time operators t :

$$\Gamma\Phi(\sigma, t) = \int_0^t [ae^* e^{k(\tau-t)} + 2e^{m(\tau-t)}] \Phi(\sigma, \tau) d\tau ; \quad (6)$$

$$M[N(\sigma, t) + iT(\sigma, t)] = \int_0^t e^{m(\tau-t)} [N(\sigma, \tau) + iT(\sigma, \tau)] d\tau . \quad (7)$$

Given that $(u + iv) = (V_n + iV_\tau)e^{i\alpha(\sigma)}$, $\alpha(\sigma)$ the angle between the ox axis and the outer normal to the contour L_1 at the point $\sigma \in L_1$, $V_n(\sigma) = const$, $V_\tau(\sigma) = 0$, $\sigma \in L_1$, $V_n(\sigma) = V_\tau(\sigma) = 0$, $\sigma \in L_0$; $T(\sigma, t) = 0$, $\sigma \in L_1$;

$$N(\sigma, t) = T(\sigma, t) = 0, \sigma \in L_0, Re \Phi(\sigma, t) = \frac{\sigma_\theta(\sigma, t)}{4} = \frac{K_d(t)}{4}, \sigma \in L_0,$$

from (5) we obtain

$$\begin{aligned} Re \Gamma \Phi(\sigma, t) &= \Gamma K(t), \sigma \in L_0 ; \\ Im \Gamma \Phi(\sigma, t) &= 0, \sigma \in L_1 . \end{aligned} \quad (8)$$

Where $K(t) = \frac{K_0(t)}{4}$.

From (8) we obtain the Riemann-Hilbert boundary value problem:

$$\begin{aligned} Re[\Gamma\Phi(\sigma, t) - \Gamma K(t)] &= 0, \sigma \in L_0; \\ Im[\Gamma\Phi(\sigma, t) - \Gamma K(t)] &= 0, \sigma \in L_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Let the function $z = \omega(\zeta)$ conformally map the domain S onto a circular ring $D = \{1 < |\zeta| < R\}$ and introduce the notation $l = l_0 \cup l_1$, where $l_0 = \{|\zeta| = 1\}$ and $l_1 = \{|\zeta| = R\}$ are line samples L_0 and L_1 under the mapping $z = \omega(\zeta)$.

From (9) after mapping the area S to D , we obtain the Riemann-Hilbert boundary value problem for the circular ring D .

$$\begin{aligned} Re[\Gamma\Phi_0(\eta, t) - \Gamma K(t)] &= 0, \eta \in l_0; \\ Im[\Gamma\Phi_0(\eta, t) - \Gamma K(t)] &= 0, \eta \in l_1. \end{aligned} \quad (10)$$

Where $\Phi_0(\zeta, t) = \Phi[\omega(\zeta), t]$.

Problem (10) has only a trivial solution, and thus to determine the function, $\Phi_0(\zeta, t)$ we obtain

$$\Gamma[\Phi_0(\zeta, t) - K(t)] = 0 . \tag{11}$$

It is easy to show that equation (11) has only a trivial solution and, thus for the function, $\Phi(z, t)$ we obtain the formula:

$$\Phi(z, t) = K(t), \quad z = S . \tag{12}$$

Therefore, for the complex potential $\varphi(z, t)$, taking into account the equality $\varphi'(z, t) = \phi(z, t)$ we will have:

$$\varphi(z, t) = z \cdot K(t) . \tag{13}$$

Taking into account the equality $X_n + Y_n = (N + iT)e^{i\alpha(\sigma)}$, and taking into account (13), from (1) and (3) we obtain:

$$e^{-i\alpha(\sigma)}\Gamma[\sigma K(t)] = 2\mu^*V_n(\sigma) + MC(\sigma) \tag{14}$$

$$\sigma \in L_1, \quad \Gamma[\sigma K(t)] = 0, \quad \sigma \in L_0 .$$

$$\begin{aligned} \text{Where } C(\sigma) &= i \int_0^t N(\zeta_0) e^{i[\alpha(\zeta_0) - \alpha(\zeta)]} d\zeta_0 = \sum_{j=1}^r \int_{L_1^{(j)}} N(\zeta_0) \sin[\alpha_j - \alpha_r] ds_0 = \\ &C_{r_2} = \text{const}, \quad \sigma \in L_1, \quad r = 1, 4. \end{aligned}$$

Boundary condition (14) after mapping the domain S onto D differentiating along the arc abscissa, taking into account the piecewise constancy of the right side of (14), can be written as:

$$\begin{aligned} \text{Re}\left[e^{-i\alpha} i\eta\Omega(\eta, t)\right] &= 0, \quad \eta \in l_1; \\ \text{Im}\left[i\eta\Omega(\eta, t)\right] &= 0, \quad \eta \in l_0. \end{aligned} \tag{15}$$

Where

$$\Omega(\eta, t) = \Gamma[K(t)\omega'(\eta, t)] . \tag{16}$$

Consider the function:

$$T(\zeta) = \left(1 - \frac{1}{\zeta}\right)^2 \prod_{j=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{R^{2j}\zeta}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\zeta}{R^{2j}}\right)^2 \tag{17}$$

It is easy to show that $T(\zeta)$ we satisfy the condition:

$$\overline{T(\eta)} = \eta^2 T(\eta), \eta \in l_0; \overline{T(\eta)} = T(\eta), \eta \in l_1.$$

And consequently, the boundary conditions (15) with respect to the function $\chi(\eta, t) = \frac{\Omega(\eta, t)}{T(\eta)}$, can be written in the form:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left[i\eta e^{-i\alpha(\eta)} \chi(\eta, t)\right] &= 0, \quad \eta \in l_1; \\ \operatorname{Im}\left[i\chi(\eta, t)\right] &= 0, \quad \eta \in l_0. \end{aligned} \tag{18}$$

The solvability condition for problem (18) has the form $\prod_{j=1}^4 \left(\frac{a_j}{R}\right)^{-\frac{1}{2}} = 1$, and the solution of this class problem itself h_0 (for this class, see [10]) is represented by the formula:

$$\chi(\zeta, t) = E(\zeta). \tag{19}$$

Where

$$E(\zeta) = K^0 \cdot \prod_{k=1}^4 \left(1 - \frac{a_k}{\zeta}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \prod_{j=1}^{\infty} \prod_{k=1}^4 \left(1 - \frac{\zeta}{R^{2j} a_k}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(1 - \frac{a_k}{R^{2j} \zeta}\right)^{-\frac{1}{2}}. \tag{20}$$

(K^0 – real constant)

Thus, from (16) and (19) we finally obtain:

$$\Gamma\left[K(t)\omega'(\eta, t)\right] = T(\zeta) \cdot E(\zeta). \tag{21}$$

Where $T(\zeta)$ and $E(\zeta)$ are defined by formulas (17) and (20), respectively.

Thus, the definition of a conformally mapping function, and thus the definition of the equation of the desired equal-strength contour, is reduced to solving an equation of the Voltaire type (21).

Introducing the notation:

$$K(t)\omega'(\zeta, t) = \Omega(\zeta, t) T(\zeta) E(\zeta) = F_0(\zeta). \tag{22}$$

From (6) and (21) we obtain the equation:

$$\int_0^t \left[\mathfrak{a}^* e^{k(\tau-t)} + 2e^{m(\tau-t)} \right] \Omega(\zeta, t) = F_0(\zeta). \tag{23}$$

Differentiating (23) with respect to t and adding the resulting equality with (23) multiplied by m , we get:

$$(m - k)\mathfrak{a}^* \int_0^l e^{k\tau} \Omega(\zeta, \tau) d\tau + (\mathfrak{a}^* + 2)e^{kt} \Omega(\zeta, t) = mF_0(\zeta)e^{kt}. \quad (24)$$

From (24) by differentiation with respect to t we obtain a differential equation of the first kind

$$\dot{\Omega}(\zeta, t) + a\Omega(\zeta, t) = F(\zeta). \quad (25)$$

Where

$$a = \frac{m\mathfrak{a}^* + 2k}{\mathfrak{a}^* + 2}; \quad F(\zeta) = \frac{kmF_0(\zeta)}{\mathfrak{a}^* + 2}. \quad (26)$$

(in the expression $\dot{\Omega}(\zeta, t)$ the dot means the derivative with respect to t).

Based on the consideration that in the Kelvin-Voight model, the deformations (hence, the stresses) change exponentially, in the future we will assume that the function $K(t)$ has the form:

$$K(t) = \sigma_0(1 + e^{-\varepsilon t}). \quad (27)$$

Where σ_0 and ε – are positive constants.

The solution of equation (25) has the form

$$\Omega(\zeta, t) = e^{-at} \cdot \left[\Omega(\zeta, 0) + \frac{F(\zeta)}{a} \cdot (a^{at} - 1) \right] \quad (28)$$

From (22) and (24) we have $\Omega(\zeta, t) = K(0)\omega'(\zeta, 0) = KF(\zeta)$ and thus for the conformally mapping function, we finally obtain the formula:

$$\omega'(\zeta, t) = \frac{F(\zeta)}{a\sigma_0(1+e^{-\varepsilon t})} [1 + (ak - 1) \cdot e^{-at}]. \quad (29)$$

Where α and $F(\zeta)$ – are defined by formula (26).

After determining $\omega'(\zeta, t)$ the equation of the desired contour, it will be written in the form

$$\sigma'_\zeta = \frac{i\eta\omega'(\eta, t)}{|\omega'(\eta, t)|}, \quad \sigma \in L_0, \eta \in l_0.$$

3. Conclusion

The condition of equal strength of the desired contour is that the tangential normal stress on it takes a constant value. Note that the mentioned voltage is a function of point and time. To solve the problem, methods of the theory of conformal mappings and boundary value problems of analytic functions are used, and the equation of the desired equal-strength contour is constructed efficiently.

REFERENCES

1. Banrsuri, R. (2006). One mixed problem of the plane theory with a partially unknown boundary. *Proc. A. Razmadze Math. Inst.*, 9-16 [in Georgian].
2. Banrsuri, R. (2007). Solution of the mixed problem of plate bending for a multi-connected domain with partially unknown boundary in the presence of cyclic symmetry. *Proc. A. Razmadze Math.*, 9-22 [in Georgian].
3. Odishelidze, N., & Criado-Aldenueva, F. (2008). Some axially symmetric problems of the theory of plane elasticity with partially unknown boundaries [in Georgian].
4. Kapanadze, G. (2003). The problem of plate bending for a finite doubly-connected domain with a partially unknown boundary. *Prikl. Melh.*, 39 #5, 121-126 [in Georgian].
5. Kapanadze, G. (2007). On one problem of the plane theory of elasticity with a partially unknown boundary. *Proc. of A. Razmadze Math. Inst.*, 143, 61-71 [in Georgian].
6. Kapanadze, G. (2007). On a bending a plate for a doubly connected domain with partially unknown boundary. *Prikl. Math. Mekh.*, 71 (1), 33-42. Translation in *Appl. Math. mekh.* 71. #1, 30-39 [in English].
7. Banrsuri, R., & Kapanadze, G. (2013). The problem of finding a full-strength inside the polygon. *Proc. of A. Razmadze Math. Inst.*, 1631-7 [in Georgian].
8. Shavlakadze, S., Kapanadze, G., & Gogolauri, A. (2019). About one contact problem for a viscoelastic halfplate. *Translat of A. Razmadze. Math. Inst.*, 173, 103-110 [in Georgian].
9. Gurgenisze, D., & Kipiani, G. (2020). Analysis on stability of having holes thin-walled spatial structures. *International Scientific Journal "Problems of Mechanics"*, 1(78), Tbilisi, 25-33 [in Georgian].
10. Kipiani, G. (2014). Definition of critical loading on three-layered plate with cuts by transition from static problem to stability problem. Contemporary Problems in Architecture and Construction. Selected, peer reviewed papers the 6th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction, June 24-27, Ostrava, Czech Republic. Edited by Darja Kubeckov. Transtech. publications LTD (Switzerland).
11. Mikeladze, M. (2018). Basics of calculation of thin-walled spatial systems. (D. Tabatadze, Ed.). (Second revised edition). Tbilisi: "Education" [in Georgian].
12. Mikeladze, M. (2018). Basics of shell theory. (D. Tabatadze, Ed.). (Second Revised Edition). Tbilisi: "Education" [in Georgian].
13. Mikeladze, M. (2018). Theory of slab bending. (Second Revised Edition). (I. Kakutashvili, Ed.). Tbilisi: "Education" [in Georgian].
14. Tskedadze, R., Tabatadze, D. (2019). Sustainability of stem systems. (A. Tabatadze, Ed.). Tbilisi: "Technical University of Georgia" [in Georgian].
15. Kifiani, G., Akhalaia, G., Beridze, V., Gegenava, G. (2012). Restoration of damaged elastic shell-type constructions with discretely connected pipes. *Institute of Water Management of Technical University of Georgia. Collection of scientific works*, 67, Tbilisi, 221-225.
16. Kaliukh, Y.I., & Vusatiuk, A.Y. (2019). Factorization in Problems of Control and Dynamics of Lengthy Systems. *Cybern Syst Anal*, 55, 274–283. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00132-9>
17. Kaliukh, I., & Berchun, Y. (2020). Four-Mode Model of Dynamics of Distributed Systems. *Journal of Automation and Information Sciences*, 52 (2), 1-12. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v52.i2.10>
18. Kaliukh, I., & Lebid, O. (2021). Constructing the Adaptive Algorithms for Solving Multi-Wave Problems. *Cybern Syst Anal*, 57, 938–949. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00419-w>
19. Trofymchuk, O., Lebid, O., Berchun, V., Berchun, Y., & Kaliukh, I. (2022). Ukraine's Cultural Heritage Objects Within Landslide Hazardous Sites. In: Vayas, I., & Mazzolani, F.M. (Eds.). *Protection of Historical Constructions. PROHITECH 2021, Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 209 Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90788-4_73

20. Kaliukh, I., Farenjuk, G., & Farenjuk, I. (2018). Geotechnical Issues of Landslides in Ukraine: Simulation, Monitoring and Protection. In: Wu W., Yu HS. (eds) Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97115-5_124
21. Slyusarenko, Y. et al. (2023). Experimental Solving the Problem of the Shelter Object Reinforced Concrete Structures Thermal Expansion. In: Ilki, A., Çavunt, D., Çavunt, Y.S. (eds) Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient. fib Symposium 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 350. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_173
22. Trofymchuk, O. et al. (2019). "Dynamic certification of landslide protection structures in a seismically hazardous region of Ukraine: Experimental and analytical research," Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions. Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 17-20, 2019, Rome, Italy, pp. 5337–5344.

The article was received 15.03.2023 and was accepted after revision 22.06.2023

Г. Капанадзе, В. Балавадзе, Л. Крістесіашвілі, В. Арчвадзе
ПОШУК РІВНОМІЦНОГО КОНТУРУ ВСЕРЕДИНИ В'ЯЗКОПРУЖНОГО ПРЯМОКУТНИКА

Анотація. Нерівномірність геометричних і фізичних параметрів у тонкостінних конструкціях призводить до значної концентрації напружень і створює небезпечні зони поширення тріщин або пластичних деформацій. Під впливом напруженого стану тонкостінні конструкції набувають ребристого вигляду.

Зони концентрації напружень в зонах нерівностей істотно впливають на міцність на розрив і довговічність тонкостінних конструкцій. Традиційні аналітичні та чисельні методи, відомі на даний час, менш ефективні для дослідження напружено-деформованого стану гофрованих тонкостінних конструкцій. Тому необхідно розробити нові ефективні методи вирішення завдань цього класу. На сьогодні для інженерних розрахунків практично не існує порівняння простих і зручних формул для визначення критичного навантаження на стиск з урахуванням особливостей конструкції. Наукова новизна роботи полягає в тому, що для досягнення поставленої мети вона вперше буде використана в загальній теорії, розробленій для розрахунку будівель і споруд, відомій як «Теорія пружності в звичайних диференціальних рівняннях». У роботі показано, що точність цієї нової теорії адекватна класичній теорії подовження і в той же час різко спрощує вирішення будь-якої задачі при розрахунку плит, що досягається шляхом їх перетворення в звичайні диференціальні рівняння.

Розглянуто загальні методи складання диференціальних рівнянь, методи їх спрощення для розрахунку мембран з поперечними розрізами, розрахунку пластин в умовах нелінійного деформування. Уточнено методи розв'язування диференціальних рівнянь зі змінними та імпульсними коефіцієнтами. Розроблено алгоритм і програму для аналізу напружено-деформованого стану просторових конструкцій та їх елементів. Практична цінність роботи полягає в можливості використання розроблених методів і програм для проектування і будівництва будівель, для задач стійкості плит з отворами і ребрами, панелей, що використовуються в будівництві як типові складальні елементи. Наведені математичний алгоритм і програма для конкретних завдань, що відрізняються простотою, можуть бути використані проектними та науково-дослідними організаціями при розрахунку та проектуванні пластин і мембран. Наукові дослідження проводилися шляхом чисельних і практичних експериментів.

Ключові слова: модель Кельвіна-Фойгта; формули Колосова-Мухелішвілі; задачі Рімана-Гільберта; рівняння Вольтерра.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 22.06.2023

Капанадзе Георгій

кандидат технічних наук, професор, Тбіліський державний університет ім. Іване Джавахішвілі

Адреса робоча: І. Чавчавадзе пр. 1, Тбілісі 0179, Грузія

e-mail: kapanadze.49@mail.ru

Балавадзе Вахтанг

кандидат технічних наук, професор, Державний університет Іллі

Адреса робоча: пр. Какуца Чолокашвілі 3/5, Тбілісі 0162, Грузія

e-mail: vakhtang.balavadze@iliauni.edu.ge

Крістесіашвілі Лейла

кандидат технічних наук, доцент, Грузинський технічний університет

Адреса робоча: вул. Костава 68, Тбілісі, 0186, Грузія

e-mail: l.kristesiashvili@gtu.ge

Арчвадзе Вахтанг

аспірант, Грузинський технічний університет

Адреса робоча: вул. Костава 68, Тбілісі, 0186, Грузія

e-mail: modernline.georgia@gmail.com

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copying © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. All rights reserved.

ДО УВАГИ АВТОРІВ ЗБІРНИКА

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню збірника.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова (не менше п'яти) двома мовами (українською та англійською).

Підготовка статті здійснюється в текстовому редакторі MS WORD for WINDOWS, з використанням шрифту Times New Roman, Суг, кегль 11, одинарний інтервал, полями 2,0 см з кожного боку, заданим розміром сторінок 17x26 см.

Усі формули мають бути набрані в редакторі MathType.

Ілюстрації повинні обов'язково нумеруватися, мати книжкову орієнтацію і не можуть перевищувати за розміром задану сторінку (параметри сторінки 17x26 см з полями 2,0 см). Перелік літературних джерел перекладається англійською мовою (або транслітерується в романському алфавіті) і подається відповідно до міжнародного стандарту оформлення наукових публікацій **APA (American Psychological Association) style** загальним списком у кінці статті за чергою посилань у тексті.

Наприкінці статті наводиться коротка довідка про авторів, де вказуються прізвище, повне ім'я та по батькові авторів, науковий ступінь, вчене звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, особисті дані кожного з авторів (адреса, місто, країна, контактний телефон, e-mail), ORCID ID.

Обов'язково слід надати електронну версію статті в редакторі Microsoft Word.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами збірника, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ збірника, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником. Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія збірника.

Електронна версія збірника, правила оформлення та вимоги до статей містяться в Інтернеті на сайті <http://www.es-journal.in.ua>, який систематично оновлюється.

Збірник наукових праць також представлений на сайті Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України <http://itgip.org/> у розділі «Видавнича діяльність» та на сайті бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури <http://library.knuba.edu.ua/node/883>.

Редактор – В.П. Берчун

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36а.
Тел.: (044) 360-22-66
www.yuston.com.ua

**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
серія дк № 497 від 09.09.2015 р.**

Підписано і здано до друку 29.09.23 Формат 70x108/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 14.35
Обл.-вид. арк. 11.13
Замовлення № _____

Тираж 300 примірників

КИЇВ 2023