

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 45

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 1 (45), січень – березень 2023 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 1 (45), January – March 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. ЧЕРНІЙ, 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

Д. МІНТЕР, проф., Великобританія

А. МШЮ, дослідник, Франція

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

Я. ПЕКУТІН, проф., Польща

ПІНГ ЛУ, проф., Китай

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури (протокол № 6 від 17.03.2023)

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 системи 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

Волошкіна О.С., Жукова О.Г., Ткаченко Т.М., Святогорів І.О. Відновлювані джерела енергії для резервного енергопостачання малих очисних споруд та окремих домогосподарств.....	5
Шибанова А.М., Мітрясова О.П., Джумеля Е.А., Руда М.В. Оцінювання впливу відходів гірничо-хімічних підприємств на якість поверхневих вод.....	17
Левченко Л.О., Радіонов О.В. Модернізація електротехнічного обладнання як шлях зниження ризиків аварійних ситуацій на атомних електростанціях.....	29
Radomska M., Tykhenko O., Nazarkov T. Economic valuation of ecosystem services of natural plant associations of the Pluzhne forestry.....	43

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Ткаченко Т.М., Ільчук О.С., Землянська О.В. Засади проектування електромагнітних екранів резонансного типу на основі рідких захисних композицій.....	59
Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Ніколаєв К.Д. Розроблення матеріалів багатошарової структури градієнтного типу на основі рідких композицій для екранування електромагнітних полів.....	68

ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Довгий С.О., Копійка О.В., Козлов О.С. Передача інформації в автоматизованих системах спеціального призначення.....	76
Щипцов О.А., Гордєєв А.Ю., Лебідь О.Г., Охарєв В.О., Теличко Р.І., Федосєєнков С.Г., Шундель О.І. Інформаційні технології в задачах автоматизації моделювання та прогнозування гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря.....	91
Ващенко В.М., Кордуба І.Б. Розвідка та видобуток глибинних корисних копалин без шахт і кар'єрів за допомогою ядерних автономних термобурів-геозондів.....	104
Гончаренко А.В., Сіпаков Р.В. Формування емісії забруднення атмосферного повітря від окремих вибухів внаслідок воєнних дій.....	111
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	121

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Voloshkina O., Zhukova O., Tkachenko T., Sviatohorov I. Renewable energy sources for backup energy supply of small wastewater plants and individual households.....	5
Shybanova A., Mitryasova O., Dzhumelia E., Ruda M. Assessment of the impact of waste of mining and chemical enterprises on surface water quality.....	17
Levchenko L., Radionov O. Modernization of electrical equipment as a way of reducing the risks of emergency situations at nuclear power plants.....	29
Radomska M., Tykhenko O., Nazarkov T. Economic valuation of ecosystem services of natural plant associations of the Pluzhne forestry.....	43

CIVIL SAFETY

Tkachenko T., Ilchuk O., Zemlyanska O. Principles of designing electromagnetic screens of the resonant type based on liquid protective compositions.....	59
Burdeina N., Biruk Y., Nikolaiev K. Development of materials with a multilayer structure of the gradient type based on liquid compositions for the shielding of electromagnetic fields....	68

INFORMATION SYSTEMS AND MATHEMATICAL MODELING

Dovgiy S., Kopiika O., Kozlov O. Transmission of information in automated special purpose systems.....	76
Shyptsov O., Gordeev A., Lebid O., Okhariev V., Telychko R., Fedoseienkov S., Shundel O. Information technologies for automation of hydrophysical situation modelling and forecasting in the Black Sea region.....	91
Vashchenko V., Korduba I. Exploration and extraction of deep minerals without mines and quarries with the help of nuclear autonomous thermal drills-geoprodes.....	104
Goncharenko A., Sipakov R. The formation of atmospheric air pollution emissions from separate explosions as a result of military operations.....	111
INFORMATION FOR AUTHORS.....	121

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

УДК 551.58.001.57

Olena Voloshkina, Dr, Professor of Department of Labour and Environment Protection
ORCID ID: 0000-0002-3671-4449 *e-mail*: e.voloshki@gmail.com

Olena Zhukova, PhD, Associate Prof. of Department of Labour and Environment Protection
ORCID ID: 0000-0003-0662-9996 *e-mail*: zhukova.og@knuba.edu.ua

Tetiana Tkachenko, Dr, head of Department of Labour and Environment Protection
ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 *e-mail*: tkachenkoknuba@gmail.com

Illia Sviatohorov, postgraduate of Department of Labour and Environment Protection
e-mail: tall.arh@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

RENEWABLE ENERGY SOURCES FOR BACKUP ENERGY SUPPLY OF SMALL WASTEWATER PLANTS AND INDIVIDUAL HOUSEHOLDS

***Abstract.** These researches concern the use of renewable sources of electricity during emergency shutdowns for uninterrupted operation of water management systems. The ability to purify drinking water during a power outage requires a backup power source. A mobile power plant, which is usually used as a backup power source during blackouts and emergencies, is known to cause environmental pollution and greenhouse gas emissions. The use of wind energy for these purposes requires the location of wind stations next to small treatment plants and households in order to quickly switch to autonomous mode, which does not always meet the territorial requirements and wind resources of the region. Open areas for the location of solar panels make the use of this type of renewable sources as a reserve in the conditions of military operations in Ukraine not quite suitable. On the basis of foreign experience in the use of small hydroelectric power plants (MHPs) and with different layouts of their location when working at sewage treatment plants, four possible options for providing electricity to sewage treatment plants and households during a blackout are proposed for the conditions of Ukraine. The option of the location of the MHP, which uses the energy of water transported through pipelines and which has successfully proven itself at operating treatment plants, is considered. Variants of using the pressure of an artesian well are proposed: MHP located in a vertical well that supplies artesian water under pressure; when an active artesian well supplies water under natural pressure at a constant flow rate to an above-ground (or underground) tank that simultaneously supplies normal household needs and a connected turbine-powered alternator. In addition, an option for the location of the MHPs was considered for the treatment and further use of rainwater sewage, including for the use of rainwater collected*

from "green roofs" in a tank-reservoir. The peculiarities of using this scheme are that it is easy to combine it with the case of using energy obtained from artesian wells. The proposed technological solutions allow for significant energy savings, including in places where high-quality water supply from artesian wells is possible, depending on the hydrogeological conditions of the area.

Keywords: renewable energy sources; backup power supply; critical infrastructure; hydroelectric power plant; sewage treatment plant.

О.С. Волошкіна, О.Г. Жукова, Т.М. Ткаченко, І.О. Святогоров

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

ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ РЕЗЕРВНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ МАЛИХ ОЧИСНИХ СПОРУД ТА ОКРЕМИХ ДОМОГОСПОДАРСТВ

***Анотація.** Дані дослідження стосуються питань застосування відновлюваних джерел електроенергії під час аварійних відключень для безперебійної роботи водогосподарських систем. Можливість очистки питної води під час відключення електроенергії вимагає наявності резервного джерела живлення. Відомо, що мобільна електростанція, яка зазвичай використовується як резервне джерело живлення під час блекауту та надзвичайних ситуацій спричиняє забруднення навколишнього середовища та викиди парникових газів. Застосування вітрової енергії для даних цілей вимагає розташування вітрових станцій поруч з малими очисними спорудами та домогосподарствами задля оперативного переходу в автономний режим, що не завжди відповідає територіальним вимогам та вітровим ресурсам регіону. Відкриті ділянки для розташування сонячних панелей роблять використання цього типу відновлюваних джерел в якості резервного в умовах воєнних дій в Україні не зовсім придатним. На основі закордонного досвіду застосування малих гідроелектростанцій (МГЕС) і при різних схемах їх розташування при роботі на очисних спорудах запропоновано для умов України чотири можливих варіанти забезпечення електроенергією очисних споруд та домогосподарств під час блекауту. Розглянуто варіант розташування МГЕС, яка використовує енергію води, що транспортується по трубопроводах, і який успішно зарекомендував себе на діючих станціях очистки. Запропоновано варіанти використання напору артезіанської свердловини: МГЕС, що розташована у вертикальній свердловині, яка подає артезіанську воду під тиском; коли на діючій артезіанській свердловині вода під природним тиском при постійній витраті подається в наземний (або підземний) резервуар, з якого одночасно забезпечуються звичайні побутові потреби та під'єднаний генератор змінного струму, який працює від турбіни. Крім цього, розглянуто варіант розташування МГЕС для очистки та подальшого використання стічних вод дощової каналізації, в тому числі і для використання дощової води, зібраної з «зелених покрівель» у бак-резервуар. Особливості використання даної схеми полягають в тому, що її легко поєднати до випадку застосування енергії, що отримується з артезіанських свердловин. Запропоновані технологічні рішення дозволяють забезпечити значне енергозбереження, в тому числі в місцях, де можливе якісне водопостачання з артезіанських свердловин в залежності від гідрогеологічних умов місцевості.*

Ключові слова: відновлювані джерела енергії; резервне енергопостачання; критична інфраструктура; гідроелектростанція; очисна станція.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.5-16>

Вступ

Вплив воєнних дій на руйнування критичної інфраструктури України обумовлює необхідність застосування резервних джерел живлення. Для цих цілей розглянемо можливість застосування відновлюваних джерел енергії для цілей резервного водопостачання та очистки стічних вод. В разі надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури такі рішення допомагають уникнути повного блекауту та підтримати нормальну життєдіяльність окремих громад, малого та середнього бізнесу. В разі аварійного відключення електроенергії окреме резервне джерело живлення має можливість не припиняти подачу питної води населенню та поточну очистку стічної води підприємств та комунальних стоків.

Подібні дослідження за допомогою методу багатокритеріального аналізу було проведено на підставі аналізу відновлюваних джерел енергії для водоочисної станції в одному з регіонів Чехії [1, 2]. Було обрано малу гідроелектростанцію на вході водоочисної станції, як найбільш доцільний варіант у випадку блекауту. В даних роботах дано огляд технічних елементів водопостачання та ступінь їх залежності від електроенергії, а також обговорюється застосування методу багатокритеріального аналізу для енергозабезпечення водоочисних споруд за рахунок джерел резервного живлення.

Зазвичай в сучасних умовах очисна станція може бути обладнана резервним джерелом живлення, яке використовує дизельне паливо. Відомо, що це спричиняє такі серйозні проблеми, як забруднення навколишнього середовища викидами та цінове зростання в довгостроковій перспективі, оскільки за останні роки ресурси викопного палива в усьому світі значно скоротилися. В роботі [3] наведено обсяг емісій CO₂ від згоряння палива, що для дизельного палива, бензину та природного газу складає відповідно 0,27, 0,26 і 0,21 в кг/Квт*годину.

В деяких країнах світу в останні роки була запроваджена нова політика щодо використання для електропостачання гібридних енергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії [3, 4 та ін.]. Автори низки робіт [5–8] вважають правомірним використання відновлюваних джерел енергії для водоочисних споруд в якості резервного джерела живлення. В роботі [9] дане питання розглядається для різних країн світу з врахуванням попиту на електроенергію, і висновки роботи були позитивними.

Таким чином, відновлювані джерела енергії можуть легко слугувати резервним джерелом живлення для водоочисних установок. Гібридні системи можуть забезпечувати стабільне електропостачання в складних умовах шляхом об'єднання фотоелектричної, вітрової генерації та накопичення акумуляторів [10, 11]. Паливні елементи також можна розглядати, якщо вітрова генерація та фотоелектричні установки не можуть забезпечити потреби внаслідок метеорологічних умов місцевості. В якості прикладу можна навести очисну споруду в Нідерландах. Завдяки поновлюваним джерелам електроенергії водоочисна станція самодостатня на 70–96%. Середнє споживання електроенергії становить 69 кВт/год [12]. У випадку відключення світла протягом 24 годин та застосування протягом цього часу генераторів, які працюють на дизельному паливі, викиди CO₂ в навколишнє середовище склали б 447,12 кг (за тієї умови, що працюють лише прилади, необхідні для подачі питної води).

Використання відновлюваних джерел енергії як резервної потужності повинно бути належним чином обґрунтовано на основі всіх еколого-економічних факторів місцевості та специфіки водоочистки. На прикладі однієї з найбільших водопровідних компаній Чеської Республіки показано, як відбувається підготовка для забезпечення аварійного водопостачання у разі відключення електроенергії, а саме:

- оцінка діючих потужностей;
- інвентаризація мобільних і стаціонарних електростанцій;
- забезпечення паливом, включаючи конструкцію сховища та будь-які додаткові запаси [1].

Такі кроки потрібно зробити для розподілу об'єктів за пріоритетністю забезпечення електропостачання та встановлення установок зі стаціонарними або мобільними генераторами. Наступний крок – метод вибору правильного джерела відновлюваної енергії.

Метою даної роботи є аналіз та обґрунтування можливості застосування відновлюваних джерел електроенергії під час аварійних відключень для безперебійної роботи водогосподарських систем на основі закордонного досвіду в умовах України.

Матеріали і методи

Серед відновлюваних джерел виділяють сонячну енергію, енергію вітру, біомаси, геотерму і гідроенергетику. Усі ці джерела електроенергії потрібно було б розмістити поруч із станцією очищення води для оперативного переходу в автономний режим.

Оцінка можливостей залучення потенційних енергоджерел в окремому взятому регіоні проводиться на основі аналізу кожного виду енергоносіїв та їх потенціалу (природний, або теоретичний; технічний, або першочерговий, або реальний).

Будівництво вітрової турбіни на території водоочисної станції може виконувати дві функції: коли вона має достатню потужність для самопідтримки роботи станції або іншого об'єкта у разі відключення електроенергії і коли вітрова турбіна заряджатиме батареї, які її живлять. Потрібну кількість батарей в останньому випадку можна визначати розрахунком за аналогією з малими гідроелектростанціями МГЕС.

Аналіз потенціалу вітрової енергії по регіонах України було проведено в багатьох дослідженнях українських вчених. Так, авторами роботи [13] було оцінено кліматичні ресурси території України та за показниками вітрової енергії (Вт/м^2), швидкості вітру (м/с), сумарними вітроенергоресурсами (МДж/м^2), тривалістю різної швидкості вітру (год) проведено районування території України за потенціалом вітрової енергії. Згідно з дослідженнями даних авторів з п'яти виділених районів країни тільки два регіони мають невисокий та низький потенціал використання вітрових станцій. Це Поліська й Придніпровська низовини, Волинська височина з обмежено сприятливими умовами та Передкарпаття, Закарпатська низовина, долини Українських Карпат, Кримських гір з несприятливими умовами вітровикористання. Решта три райони мають дуже високий потенціал вітрової енергії і найбільш сприятливі умови вітровикористання (узбережжя Чорного та Азовського морів, Південний берег Криму, вершини Українських Карпат, Кримських гір),

високий потенціал і сприятливі умови вітровикористання (Донецька височина, Приазовська та Причорноморська низовини), достатній потенціал і досить сприятливі умови вітровикористання (Подільська і Придніпровська височини). Наведені показники районування вітрового потенціалу енергії свідчать про доцільність його використання на більшій частині території України.

Дослідження вітроенергетичних ресурсів на фоні сучасних кліматичних змін та застосування цих показників для облаштування вітрових та сонячних електростанцій розглянуто в роботах [14–17 та інш.]. Однак, слід зазначити про необхідність врахування як економічної оцінки вибраного варіанта, так і ризику від надзвичайних ситуацій на фоні воєнних дій в Україні.

Використання МГЕС для резервного джерела енергії на малих очисних спорудах та в домогосподарствах можна розглядати як перспективний підхід в умовах України. Оскільки потужність станції залежить, перш за все, від технологічної схеми, розглянемо деякі види можливого застосування МГЕС в умовах надзвичайних ситуацій в центральній енергомережі.

Варіант 1. Можна застосовувати як один з варіантів для забезпечення водоочисної станції електроенергією під час блекауту. При водоочисній станції, працюючій в нормальному стані, розташування МГЕС дозволяє виробляти електроенергію для самозабезпечення та, можливо, дозволяє продавати надлишок енергії в державну електромережу. В якості прикладу МГЕС, яка використовує енергію води, що транспортується по трубопроводах, можна навести станцію, яка є діючою в Чехії [2]. У разі відключення світла, запобіжний контактор автоматично відключає водоочисну установку від електричної мережі та починає заряджати батареї, що забезпечує живлення лише для відповідальних пристроїв транспортування питної води. Таке технічне рішення дозволяє здійснювати регулювання тиску в місці споживання за допомогою сервоклапана, що керує зміною параметрів потоку. Надійність підшипників та регулювання турбіни повинні забезпечити санітарний стан води на належному рівні. Кількість елементів живлення необхідно розрахувати відповідно до середнього споживання електроенергії за добу та вихідної потужності установок (рис. 1).

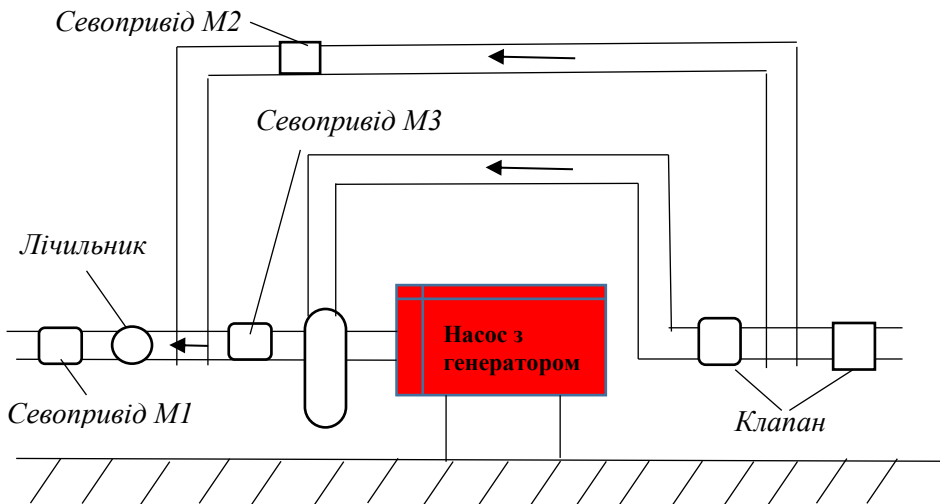


Рис. 1. Схема переключення напорного трубопроводу з необробленими стічними водами (за джерелом [2])

Як зазначено чеськими дослідниками, варіанти розміщення МГЕС впливають безпосередньо на її потужність. При розміщенні у припливній трубі розподільної камери, станція складається з однієї турбіни і трьох насосних установок. Потужності цієї МГЕС складають 90, 110 та 130 кВт. Другий варіант – МГЕС розташована у вхідній трубі живильника неочищеної води. В комплект машини входить двокамерна турбіна. Вихідна потужність 348 кВт. При розташуванні станції у припливній трубі розподільної камери маємо дві турбіни з вихідною потужністю 200 кВт на кожен при включенні паралельної операції. І у випадку розміщення МГЕС у вхідній трубі водосховища при наявності однієї турбіни, вихідна потужність становить 37 кВт.

Варіант 2. Для подачі питної води на очисні споруди також можна запропонувати МГЕС, що розташована у вертикальній свердловині, яка подає артезіанську воду під тиском. Застосування такої конструкції залежить від гідрогеологічних умов та глибини залягання напорних вод. При цьому між пластом високого тиску та безнапірним водоносним горизонтом встановлюється турбіна, що з'єднана з генератором електричної енергії. Схема застосування такої конструкції показана на рис. 2. Аналогічне рішення було запропоновано в роботі [18].

Гідрравлічна потужність турбіни розраховується за відомою формулою:

$$N = Q \times \Delta P \times \eta / 7,5 \times 36, \quad (1)$$

де Q – добовий дебет артезіанської води, м³/доб, ΔP – міжшаровий перепад тиску з урахуванням фільтраційних опорів, η – коефіцієнт корисної дії турбіни.

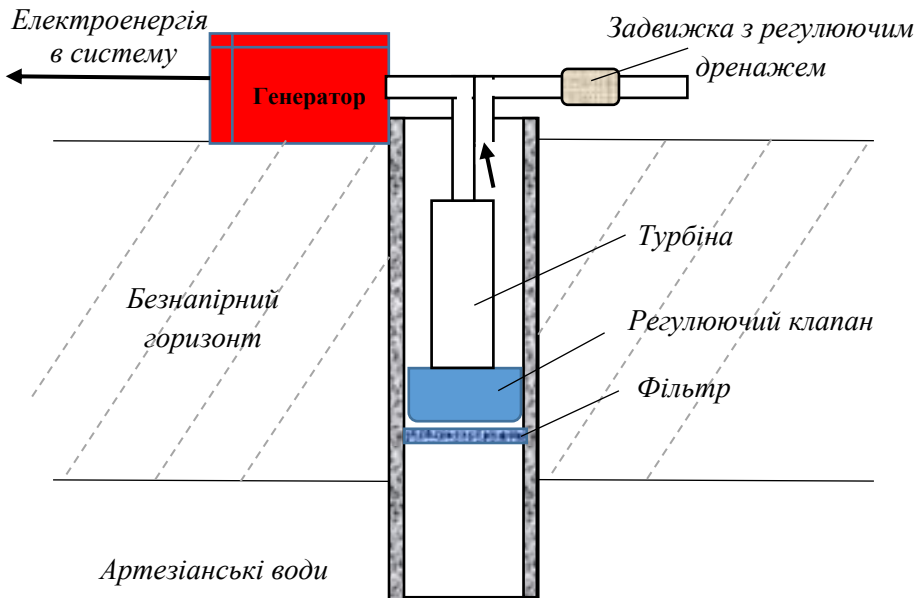


Рис. 2. Схема розташування МГЕС з використанням напору артезіанської скважини

Варіант 3. Коли на діючій артезіанській свердловині вода під природним тиском при постійній витраті подається в наземний (або підземний) резервуар, з якого одночасно забезпечуються звичайні побутові потреби підприємства

або приватної будівлі (бойлер, електричні батареї, конвектори тощо), а також під'єднаний генератор змінного струму, який працює від турбіни. Але при цьому в ємності (баку) напір повинен бути достатнім для руху цієї системи. Дане рішення ґрунтується на основі даних винаходу для приватної будівлі [19]. Тут надлишок електроенергії, який не потрібен у періоди низької потреби в електроенергії, подається на джерело електроенергії, яке використовується в періоди пікового споживання електроенергії, а вода з артезіанської свердловини додатково забезпечує охолодження приміщень у певний час року.

При застосуванні даного рішення для роботи малих очисних споруд, енергія, що перетворюється на постійний струм, підтримує заряд акумулятора, який діє лише як резервне джерело електроенергії під час надзвичайної ситуації. На рис. 3 наведено схему можливості застосування даного рішення. Для більшої безпеки бак-резервуар можна перенести у підвальне приміщення нижче поверхні землі. Стічні води з турбоагрегату можна скидати на землю через спеціально облаштовану трубу. Така система дозволяє ефективно використовувати артезіанські свердловини для зменшення потреб у споживанні енергії та може застосовуватися у період повного її відключення в якості резервного джерела електропостачання.

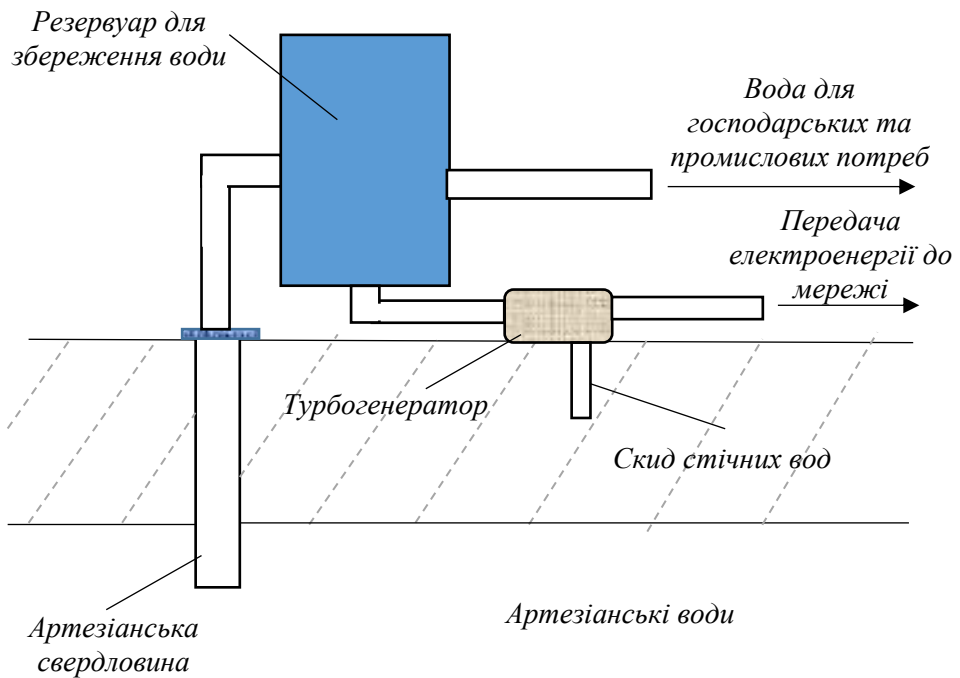


Рис. 3. Розташування МГЕС для розрядки акумуляторної батареї на артезіанській свердловині

Варіант 4. Дане технічне рішення можна застосувати для очистки та подальшого використання стічних вод дощової каналізації, в тому числі і для використання дощової води, зібраної з «зелених покрівель» у бак-резервуар. При розташуванні останнього на даху будівлі, а у підвальному приміщенні будівлі турбогенератора (що складається з турбіни, наприклад пельтонного

імпульсного типу, та генератора змінного або постійного струму), схема подачі електроенергії до внутрішнього простору може будуватися за наступною схемою, що представлена на рис. 4.

Вода під певним напором подається до турбогенератора, а далі – до електромережі, а далі – на перетворювач та на акумуляторний блок. Електроенергія від перетворювача постачається до котла, тим самим досягається зменшення кількості палива при опаленні бойлера в будинку. Також до перетворювача може бути підключений блок, що призначений для подачі в електромережу будь-якої надлишкової потужності змінного струму, яка не використовується в даний момент в будинку через лічильник для відстеження вказаної потужності. До лічильника може бути підключений інвертор синхронізатора разом із автоматичним блоком керування перенесенням навантаження. Для здійснення охолодження має бути передбачено два шляхових клапани у зворотній бік гарячої води від конвектора до котла. Коли потрібне охолодження, шляховий клапан повертається в положення, де вода, що виходить з конвектора, не повертається в котел, а подається в лінію, яка повертає воду в землю. Положення цього клапана диктується необхідністю встановлення системи охолодження.

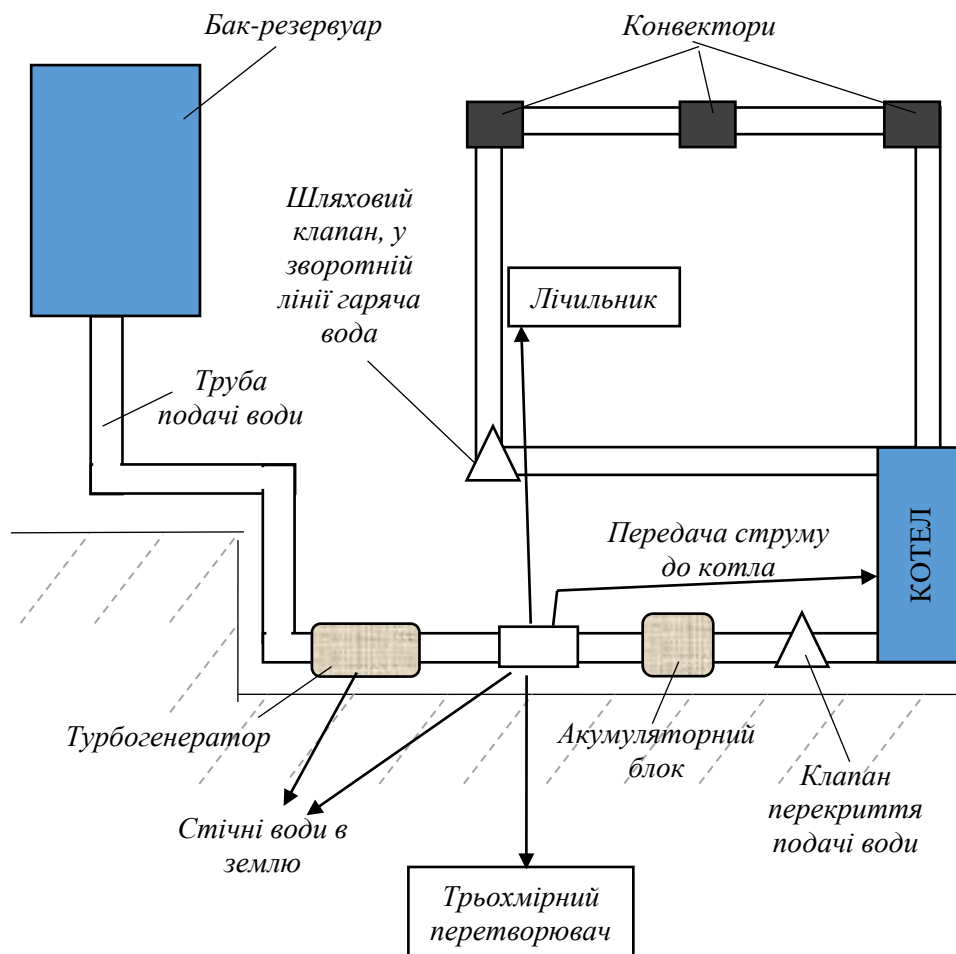


Рис. 4. Схема вироблення електроенергії з дощової води «зелених» покрівель

При даній схемі будівля зазвичай забезпечується електроенергією, що виробляється водою в резервуарі та дозволяє зменшити потребу у зовнішньому джерелі електроенергії. Коли потреби будівлі не можуть бути задоволені енергією з генератору, додатково необхідна електроенергія з іншого джерела.

Висновки

Мобільні електростанції мають багато переваг: можуть працювати відразу, вартість покупок відносно невисока, а експлуатація їх проста. Однак негативні моменти, що пов'язані з викидами в процесі згоряння, особливо при неповному окислюванні в процесі спалювання, потребують більш детального економічного аналізу при їх застосуванні порівняно з більш екологічно «чистими» резервними джерелами енергопостачання. Проблема заміни поточних резервних джерел живлення відновлюваними джерелами зараз широко обговорюється у світі.

Вітрові турбіни потребують їх розташування поблизу населених пунктів (що може викликати скарги місцевих жителів) та очисних споруд та залежать від наявності вітрових ресурсів регіону. Фотоелектричні установки мають вихідну потужність, що коливається, і цей факт потребує акумуляторів достатньої ємності. Тривалі терміни окупності та відкриті ділянки для розташування сонячних панелей роблять використання цього типу відновлюваних джерел в якості резервного в умовах воєнних дій в Україні не зовсім придатним.

Дані дослідження показали, що МГЕС можуть бути широко використані для умов України в якості резервного джерела під час відключень очисних споруд від центральної електромережі, але потужність їх сильно залежить від потоку води та напору. Місце розташування в даному випадку має вирішальне значення, оскільки є потреба розміщення їх у водоводах, де на потік води не впливає відключення світла. Також описані системи забезпечують значне енергозбереження в місцях, де є якісне водопостачання з артезіанських свердловин. Існує багато місць по всій країні, де такі артезіанські свердловини можуть бути облаштовані, зважаючи на гідрогеологічні умови місцевості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kotulla M., Vrzala M., Leonowicz Z., Kłosok-Bazan I., Boguniewicz-Zabłocka J. Renewable Energy Sources as Backup for a Water Treatment Plant. *Energies* 2022, №15. P. 62–88.
2. Howe A. Renewable energy potential for the water industry. *Environ. Agency* 2009, №1, pp. 1–48. <https://doi.org/10.1016/j.aasri.2012.09.018>.
3. Gono M., Kyncl M., Gono R. Hydropower stations in Czech Water supply System. *AASRI Procedia* 2012, № 2. pp. 81–86.
4. Mališ J. Methods of Carbon Dioxide Emission Reduction. Master's Thesis, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2007.
5. Blechinger P., Cader C., Bertheau P., Huyskens H., Seguin R., Breyer C. Global Analysis of the Techno-economic Potential of Renewable Energy Hybrid Systems on Small Islands. *Energy Policy* 2016, № 98. pp. 674–687.
6. Fedak W., Anweiler S., Ulbrich R., Jarosz B. The Concept of Autonomous Power Supply System Fed with Renewable Energy Sources. *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.* 2017, №5. pp. 579–589.

7. Dungbojev S., Karimov A., Karshiyeva N. Questions of development and use of renewable energy sources for low power enterprises. E3S Web Conf. 2020.
8. Bakhadyrkhanov M.K., Valiev S.A., Zikrillaev N.F., Koveshnikov S.V., Saitov E.B., Tachilin S.A. Silicon photovoltaic cells with clusters of nickel atoms. Appl. Sol. Energy 2016, № 52. pp. 278–281.
9. Toshov J., Saitov E. Portable autonomous solar power plant for individual use. E3S Web Conf. 2019.
10. Fayziev S., Sobirov Y., Makhmudov S. Measurement of the direct flux of solar radiation during operation of a big solar furnace. Int. J. Sustain. Green Energy 2018, № 7. pp. 21–28.
11. Sapaev I., Saitov E., Zoxidov N., Kamanov B. Matlab-model of a solar photovoltaic station integrated with local electrical network. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020. 883 p.
12. Bogdanov D., Farfan J., Sadowskaia K., Aghahosseini A., Child M., Gulagi A., Oyewo A.S., de Souza Noel Simas Barbosa L., Breyer C. Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps. Nat. Commun. 2019, № 1.
13. Straškrabová A., Aktéri R., Blackoutu V., Jihomoravském K. Východiska a Soucasný Stav. Master's Thesis, Masaryk University, Brno, Czech Republic, 2016.
14. Borowy B.S., Salameh Z.M. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. Energy Convers. IEEE Trans. 1996, № 11. pp. 367–375.
15. Zhou W., Lou C., Li Z., Lu L., Yang H. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. Appl. Energy 2010, №87. p. 380–389.
16. Ayop R., Isa N.M., Tan C.W. Components sizing of photovoltaic stand-alone system based on loss of power supply probability. Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, №81. pp. 2731–2743.
17. Sediqi M.M., Yona A., Senjyu T., Lotfy M.E., Furukakoi M. Optimal Economical Sizing of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System. J. Energy Power Eng. 2017, №11. pp. 244–253.
18. Diaf S., Belhamel M., Haddadi M., Louche A. Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica Island. Energy Policy 2008, № 36. pp. 743–754.
19. Soshinskaya M., Crijns-Graus W.H.J., van der Meer J., Guerrero J.M. Application of a microgrid with renewables for a water treatment plant. Appl. Energy 2014, №134. pp. 20–34.
20. Дмитренко Л.В., Барандіч С.Л. Вітроенергетичні ресурси в Україні. Наук. праці УкрНДГМІ, 2007, № 256. С. 166–173.
21. Безручко К.В., Губін С.В. Автономні наземні енергетичні установки на поновлюваних джерелах енергії. Харків: Нац. Аерокосм. Ун-т «ХАІ», 2007. 310 с.
22. Osadchyi V., Skrynyk O., Palamarchuk L., Skrynyk O., Osypov V., Oshurok D., Sidenko V. Dataset of gridded time series of monthly air temperature (min, max, mean) and atmospheric precipitation for Ukraine covering the period of 1946-2020. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108553>.
23. Skrynyk O.A., Osadchyi V.I., Szentimrey T., Bihari Z., Sidenko V.P., Oshurok D.O., Boichuk D.O., Skrynyk O.Y. Spatial interpolation of climatological data with relief and physico-geographical peculiarities of the territory of Ukraine taken into account, Ukr. Geogr. J., 2020, №110. pp. 13–19. <https://doi.org/10.15407/ugz2020.02.013>.
24. Streicher W., Wiese A. Renewable energy: Technology, and environment economics. 2007. <https://doi.org/10.1007/3-540-70949-5>.
25. Dotson Bryan D. Downhole gas flow powered delique faction pump, 2008. Available from: <https://patents.google.com/patent/US20090218091A1/en>.
26. Donnelly Jr. Artesan well generated power system, 1986. Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/43/08/f1/a63a63fe4ece1a/US4607169.pdf>.

Стаття надійшла до редакції 24.10.2022 і прийнята до друку після рецензування 30.01.2023

REFERENCES

1. Kotulla, M., Vrzala, M., Leonowicz, Z., Kłosok-Bazan, I., & Boguniewicz-Zabłocka, J. (2022). Renewable Energy Sources as Backup for a Water Treatment Plant. *Energies*, 15, 62–88.
2. Howe, A. (2009). Renewable energy potential for the water industry. *Environ. Agency*, 1, 1–48. <https://doi.org/10.1016/j.aasri.2012.09.018>.
3. Gono, M., Kyncl, M., & Gono, R. (2012). Hydropower stations in Czech Water supply System. *AASRI Procedia*, 2, 81–86.
4. Mališ, J. (2007). *Methods of Carbon Dioxide Emission Reduction* (Master's thesis). Brno, Czech Republic: Brno University of Technology.
5. Blechinger, P., Cader, C., Bertheau, P., Huyskens, H., Seguin, R., & Breyer, C. (2016). Global Analysis of the Techno-economic Potential of Renewable Energy Hybrid Systems on Small Islands. *Energy Policy*, 98, 674–687.
6. Fedak, W., Anweiler, S., Ulbrich, R., & Jarosz, B. (2017). The Concept of Autonomous Power Supply System Fed with Renewable Energy Sources. *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.*, 5, 579–589.
7. Dungbojev, S., Karimov, A., & Karshiyeva, N. (2020). Questions of development and use of renewable energy sources for low power enterprises. *E3S Web Conf.*, 216, 01132. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601132>.
8. Bakhadyrkhanov, M. K., Valiev, S. A., Zikrillaev, N. F., Koveshnikov, S. V., Saitov, E. B., & Tachilin, S. A. (2016). Silicon photovoltaic cells with clusters of nickel atoms. *Appl. Sol. Energy*, 52, 278–281.
9. Toshov, J., & Saitov, E. (2019). Portable autonomous solar power plant for individual use. *E3S Web Conf.*, 139, 01087. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901087>.
10. Fayziev, S., Sobirov, Y., & Makhmudov, S. (2018). Measurement of the direct flux of solar radiation during operation of a big solar furnace. *Int. J. Sustain. Green Energy*, 7, 21–28.
11. Sapaev, I., Saitov, E., Zoxidov, N., & Kamanov, B. (2020). Matlab-model of a solar photovoltaic station integrated with local electrical network. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 883.
12. Bogdanov, D., Farfan, J., Sadovskaia, K., Aghahosseini, A., Child, M., Gulagi, A., Oyewo, A.S., de Souza Noel Simas Barbosa L., & Breyer, C. (2019). Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps. *Nat. Commun*, 1.
13. Straškrabová, A., Aktéri, R., Blackout, V., & Jihomoravském, K. (2016). *Východiska a Soucasný Stav* (Master's Thesis). Czech Republic: Masaryk University.
14. Borowy, B. S., & Salameh, Z. M. (1996). Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. *Energy Convers. IEEE Trans.*, 11, 367–375.
15. Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lü, L., & Yang, H. (2010). Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Appl. Energy*, 87, 380–389.
16. Ayop, R., Isa, N. M., & Tan, C. W. (2018). Components sizing of photovoltaic stand-alone system based on loss of power supply probability. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 81, 2731–2743.
17. Sediqi, M. M., Yona, A., Senjyu, T., Lotfy, M. E., & Furukakoi, M. (2017). Optimal Economical Sizing of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System. *J. Energy Power Eng.*, 11, 244–253.
18. Diaf, S., Belhamel, M., Haddadi, M., & Louche, A. (2008). Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica Island. *Energy Policy*, 36, 743–754.
19. Soshinskaya, M., Crijns-Graus, W. H. J., van der Meer, J., & Guerrero, J. M. (2014). Application of a microgrid with renewables for a water treatment plant. *Appl. Energy*, 134, 20–34.

20. Dmytrenko, L. V., & Barandych, S. L. (2007). Wind energy resources in Ukraine. *Science works of UkrNDGMI*, 256, 166–173 [in Ukrainian].
21. Bezruchko, K. V., & Gubin, S. V. (2007). Autonomous ground energy installations based on renewable energy sources. Kharkiv: National Aerocosm. KHAI University [in Ukrainian].
22. Osadchyi, V., Skrynyk, O., Palamarchuk, L., Skrynyk, O., Osypov, V., Oshurok, D., & Sidenko, V. (2022). Dataset of gridded time series of monthly air temperature (min, max, mean) and atmospheric precipitation for Ukraine covering the period of 1946-2020. *Data in Brief*, 44, 108553. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108553>.
23. Skrynyk, O. A., Osadchyi, V. I., Szentimrey, T., Bihari, Z., Sidenko, V.P., Oshurok, D. O., Boichuk, D. O., & Skrynyk, O. Y. (2020). Spatial interpolation of climatological data with relief and physiogeographical peculiarities of the territory of Ukraine taken into account. *Ukr. Geogr. J.*, 110, 13–19. <https://doi.org/10.15407/ugz2020.02.013>.
24. Streicher, W., & Wiese, A. (2007). Renewable energy: Technology, and environment economics. <https://doi.org/10.1007/3-540-70949-5>.
25. Dotson, Bryan D. (2008). Downhole gas flow powered delique faction pump. Retrieved from: <https://patents.google.com/patent/US20090218091A1/en>.
26. Donnelly, Jr. (1986). Artesan well generated power system. Retrieved from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/43/08/f1/a63a63fe4ece1a/US4607169.pdf>.

The article was received 24.10.2022 and was accepted after revision 30.01.2023

Волошкіна Олена Семенівна

доктор технічних наук, професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: 0000-0002-3671-4449 **e-mail:** e.voloshki@gmail.com

Жукова Олена Григорівна

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

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

ORCID ID: 0000-0003-0662-9996 **e-mail:** elenazykova21@gmail.com

Ткаченко Тетяна Миколаївна

доктор технічних наук, завідувачка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

Святогоров Ілля Олегович

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

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

e-mail: tall.arh@gmail.com

УДК 55; 504

Alla Shybanova¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity of Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development of Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0003-0364-7056 *e-mail*: ashybanova16@gmail.com

Olena Mitryasova², Professor, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of Ecology Department, Named after Petro Mohyla Black Sea National University
ORCID ID: 0000-0002-9107-4448 *e-mail*: eco-terra@ukr.net

Elvira Dzhumelia¹, PhD, Assistant at the Software Department of Institute of Computer Science and Information Technologies of Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0003-3146-8725 *e-mail*: elviradzhumelia@gmail.com

Maria Ruda¹, PhD, Associate Professor at the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity of Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development of Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0003-0590-4589 *e-mail*: marichkarmv@gmail.com

¹Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

²Named after Petro Mohyla Black Sea National University, Odesa, Ukraine

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF WASTE OF MINING AND CHEMICAL ENTERPRISES ON SURFACE WATER QUALITY

Abstract. *The mining and chemical industry causes pollution of the soil and water environment both during its operation and after its termination. The waste of large industrial complexes poses a particular danger to the aquatic environment. Tailings storage facilities located in the Dniester River basin are characterized by a low level of environmental safety of these facilities, which indicates unsatisfactory management and their neglected state. Violation of the rules for the operation of tailings can lead to industrial accidents on a transboundary scale with uncontrolled emissions of pollutants and devastating consequences for the environment.*

The purpose of the study is to assess the impact of waste from State Enterprise "Rozdil mining and chemical enterprise "Sirka"" on the quality of the largest water bodies in the area of influence of this enterprise – lakes Serednie, Hlyboke and Kysle, located near industrial waste storage areas, and the mine channel through which water flows into the transboundary river Dniester.

The work experimentally determined and analyzed the indicators of water samples taken in 2021–2022 from the largest reservoirs in the zone of influence of SE "Rozdil MCE "Sirka"" – lakes Serednie, Hlyboke and Kysle, located near industrial waste storage sites and the water from which flows into the transboundary Dniester River along the mining channel (channel of Lake Hlyboke-Dniester River). In the analyzed water samples of the Hlyboke, Seredne, Kysle lakes and the mine channel, an excess of the MPC for sulfates is observed by 1.5–6 times, and the mineralization index by 2.3–3 times. There is a tendency to decrease the content of ammonium nitrogen in the studied reservoirs. In 2017 and in 2021–2022, there was a deviation from the water pH standards in Lake Kysle, as well as exceeding the MPC for phosphates, sulfates, ammonium nitrogen, and mineralization. In the mine channel, the maximum limit was found to be exceeded according to the following indicators: pH, sulfates, ammonium nitrogen.

It is expedient to consider the issue of environmental safety of tailings at both the international and national levels. It is extremely important to improve the policy of prevention and liquidation of the consequences of accidents, interaction between civil protection management bodies and enterprises.

Key words: mining and chemical enterprise; tailings; waste, environmental hazard; water pollution.

А.М. Шибанова¹, О.П. Мітрясова², Е.А. Джумеля¹, М.В. Руда¹

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Одеса, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ВІДХОДІВ ГІРНИЧО-ХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД

Анотація. Гірничо-хімічна промисловість як під час діяльності, так і після припинення викликає забруднення ґрунтового та водного середовища. Особливу небезпеку для водного середовища становлять відходи великих індустріальних комплексів. Хвостосховища, розташовані в басейні річки Дністер, характеризуються низьким рівнем екологічної безпеки цих об'єктів, що свідчить про незадовільне управління та їх занедбаний стан. Порушення правил експлуатації хвостосховищ може призвести до промислових аварій транскордонного масштабу з неконтрольованими викидами забруднюючих речовин та руйнівними наслідками для довкілля.

Метою дослідження є оцінювання впливу відходів ДП «Роздільське гірничо-хімічне підприємство (ГХП) «Сірка» на якість найбільших водойм у зоні впливу даного підприємства – озер Середнє, Глибоке та Кисле, розташованих поблизу ділянок складування промислових відходів, та рудничного каналу, по якому вода стікає у транскордонну річку Дністер.

У роботі експериментально визначено та проаналізовано показники проб води, відібраних у 2021–2022 роках з найбільших водойм у зоні впливу ДП «Роздільське ГХП «Сірка» – озер Середнє, Глибоке та Кисле, розташованих поблизу ділянок складування промислових відходів і вода з яких стікає у транскордонну річку Дністер по рудничному каналу (каналу оз. Глибоке-р. Дністер).

У проаналізованих пробах води озер Глибоке, Середнє, Кисле та рудничного каналу спостерігається перевищення ГДК за сульфатами в 1,5–6 разів, показником мінералізації в 2,3–3 рази. Спостерігається тенденція до зменшення вмісту азоту амонійного в досліджуваних водоймах. У 2017 році та в 2021–2022 роках спостерігається відхилення від норм рН води в озері Кисле, а також перевищення ГДК за фосфатами, сульфатами, азотом амонійним та мінералізацією. У рудничному каналі встановлено перевищення ГДК за такими показниками: рН, сульфати, азот амонійний.

Питання екологічної безпеки хвостосховищ доцільно розглядати як на міжнародному, так і на національному рівнях. Надзвичайно важливим є вдосконалення політики попередження та ліквідації наслідків аварій, взаємодія між органами управління цивільного захисту та підприємствами.

Ключові слова: гірничо-хімічна промисловість; хвостосховища; відходи; екологічна безпека; забруднення води.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.17-28>

Вступ

Гірничо-хімічна промисловість як під час діяльності, так і після припинення викликає забруднення ґрунтового та водного середовища [1–4]. Особливу небезпеку для водного середовища становлять відходи великих індустріальних комплексів. Одними із об'єктів підвищеної небезпеки для водних ресурсів України, які можуть призвести до екологічної катастрофи, є хвостосховища.

Хвостосховища – це природно або штучно створені (за допомогою огорожувальної дамби) на понижених ділянках земної поверхні ємності для організованого складування і зберігання хвостів, освітлення і відводу води. Залежно від необхідних об'ємів складованих відходів і наявності земельних ресурсів розміри хвостосховищ можуть бути різними. Хвостосховища є потенційним джерелом виникнення надзвичайної ситуації, оскільки під час повеней на них може прорвати дамбу. Хвостосховища, розташовані в басейні річки Дністер, характеризуються низьким рівнем екологічної безпеки цих об'єктів, а це свідчить про незадовільне управління та їх занедбаний стан.

На території басейну річки Дністер ідентифіковано 32 хвостосховища із 162 млн тонн відходів, що перебувають на балансі 12 підприємств. До підприємств з найбільшим обсягом відходів, які вимагають невідкладних заходів щодо запобігання аваріям, відносять: Державне підприємство «Роздільське гірничо-хімічне підприємство «Сірка», ТОВ «Орана-Еко», ПАТ «Стебницьке гірничо-хімічне підприємство «Полімінерал». При виході з ладу будь-якої системи хвостосховища рідка складова відходів здатна порушити захисні функції огорожувальних конструкцій, викликати руйнування і вийти назовні [5, 6]. Відповідно до Державного реєстру потенційно небезпечних об'єктів (ПНО) України ДП «Роздільське ГХП «Сірка» належить до об'єктів моніторингу ПОЗ.

При випаданні зливових дощів у районі хвостосховищ відбувається посилення процесів розмиву дамб та наповнення хвостосховищ із загрозою прориву та переливу відходів через гребінь дамб, а також змиву інших відходів з промислового майданчика – гудронів, залишків сірки та фільтрату зі звалища ТПВ [7, 8]. Вплив відходів на довкілля спричинений токсичною дією речовин, що у них містяться, переважно сірки і сірчаної кислоти, а також фенолів, важких вуглеводнів у складі гудронів.

Порушення правил експлуатації хвостосховищ може призвести до промислових аварій транскордонного масштабу з неконтрольованими викидами забруднюючих речовин та руйнівними наслідками для довкілля [9–11]. В Україні відбувалися аварії на хвостосховищах гірничо-хімічного підприємства «Полімінерал» в 1983 році, калійного заводу в місті Калуш у 2008 році, в результаті яких відходи виробництв потрапляли в річку Дністер.

Основою міжнародної нормативно-правової бази для вжиття заходів щодо зниження ризику транскордонного забруднення вод у результаті промислових аварій є договори ЄЕК ООН, а саме: Конвенція про транскордонний вплив промислових аварій (прийнята у 1992 р., вступила в дію в 2000 р.) і Конвенція про охорону та використання транскордонних водотоків та міжнародних озер (прийнята у 1992 р., вступила в дію в 1996 р.). Основні завдання цих Конвенцій – це сприяння транскордонній співпраці в області сталого використання водних ресурсів, запобіганню промисловим аваріям, а також підготовці та реагуванню на такі аварії.

Екологічна ситуація в басейні р. Дністер за останні 15–20 років під впливом антропогенних факторів набула кризового характеру [12–17]. Внизу по течії знаходяться водозабори багатьох міст України і Молдови, а оскільки Дністер є річкою міжнародного значення, то її забруднення може призвести до міждержавних конфліктів та значних фінансових санкцій.

Мета дослідження – оцінювання впливу відходів ДП «Роздільське ГХП «Сірка»» на якість найбільших водойм у зоні впливу даного підприємства – озер Середнє, Глибоке та Кисле, розташованих поблизу ділянок складування промислових відходів, та рудничного каналу, по якому вода стікає у транскордонну річку Дністер.

Методи досліджень

В результаті виконання проекту «Комплексний оперативний моніторинг техногенно небезпечних накопичених промислових відходів гірничо-хімічних підприємств як запорука національної безпеки» проведено рекогносцивальні обстеження стану хвостосховищ, відвалів, відстійників та інших місць зберігання промислових відходів ДП «Роздільське ГХП «Сірка»» для попередньої оцінки їх сучасного стану. Зокрема, оцінено стан сірчаного складу із залишками сірки та ультракислих вод, хвостосховищ № 1 та № 2, де заскладовані хвости флотації сірки, відвал фосфогіпсу та відстійник кислих вод із ділянками промитого атмосферними опадами та насиченого кислотами фосфогіпсу, три гудронних відвали, де зберігаються залишки угорських гудронів, а також Новороздільський полігон твердих побутових відходів.

Також у роботі експериментально визначено та проаналізовано показники проб води, відібраних у 2021–2022 роках з найбільших водойм у зоні впливу ДП «Роздільське ГХП «Сірка»» – озер Середнє, Глибоке та Кисле, розташованих поблизу ділянок складування промислових відходів (сірки та ультракислих вод на сірчаному складі, хвостів флотації сірки, фосфогіпсів, гудронних залишків, твердих побутових відходів) і вода з яких стікає у транскордонну річку Дністер по так званому рудничному каналу (каналу оз. Глибоке-р. Дністер).

Кар'єрні озера затоплювалися з 2003 по 2010 рр. На місці Роздільського Північного кар'єру створено каскад із озер Чистого, Середнього та Глибокого. Площа озера Чистого – 10 га, глибина – 15 м, площа озера Середнього – 45 га, глибина – 12 м. Озеро Глибоке має глибину до 30 м, площа озера – 82 га. Для витоку води з озер у річку Дністер є канал довжиною 3 км. Загальна площа водозбору кар'єрних озер підприємства становить 6 км².

На рис. 1 зображено карту місць відбору проб води.

Результати вимірювань показників проб води з озер Глибоке, Середнє та Кисле та каналу оз. Глибоке-р. Дністер, проведених у 2021–2022 роках, порівняні з результатами, отриманими у 2017 році [13].

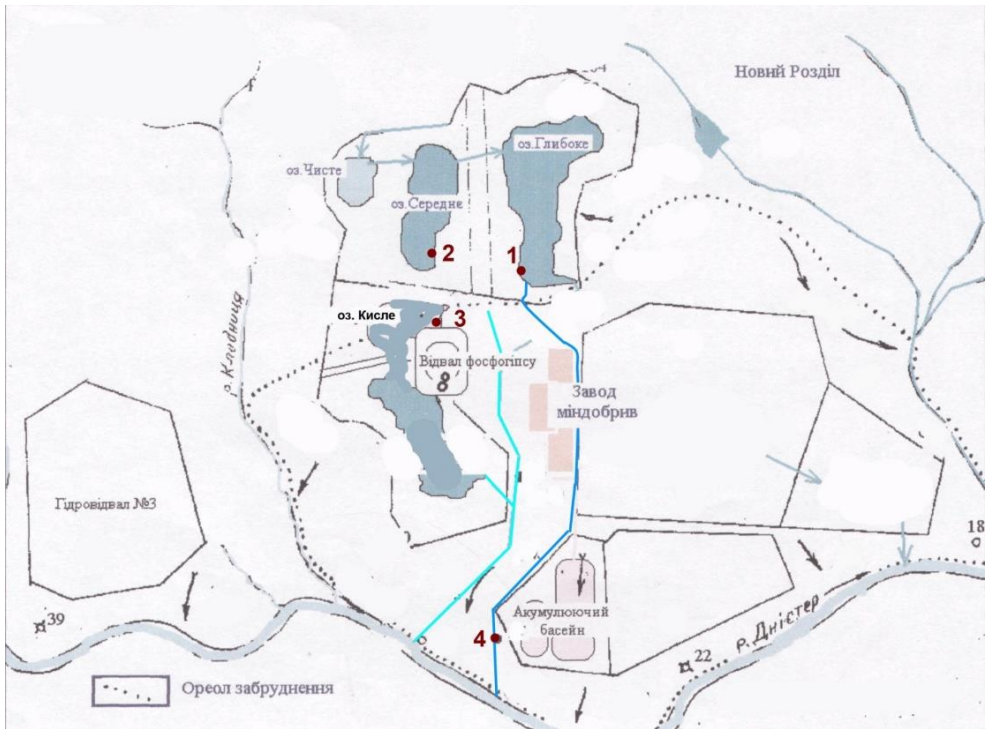


Рис. 1. Локалізація точок відбору проб води у зоні впливу Роздільського ДГХП «Сірка»

Результати дослідження

Проведено експериментальні дослідження якості води озер Глибоке, Середне та Кисле та каналу оз. Глибоке-р. Дністер та отримано результати вимірювань за такими показниками: водневий показник (рН), сульфати, мінералізація, азот амонійний, нітрат-іони, фосфати.

рН води має велике значення для хімічних і біологічних процесів, що відбуваються в природних водах, а також впливає на процеси перетворення різноманітних форм біогенних елементів. Вміст іонів водню (точніше, гідроксонію) у природних водах визначається в основному кількісним співвідношенням концентрацій вугільної кислоти та її іонів. рН води – один із найважливіших показників якості вод. Норми рН становлять від 6,5 до 7,5.

У залежності від рН природні води поділяють на сім груп: сильно кислі води – рН < 3; кислі води – рН = 3,5; слабокислі води – рН = 5–6,5; нейтральні води – рН = 6,5–7,5; слаболужні води – рН = 7,5–8,5; лужні води рН = 8,5–9,5 [18, 19].

У 2017 році та в 2021–2022 роках спостерігається відхилення від норм рН води в озері Кисле (рН < 6,5, слабокислі води). Також у 2017 році за показником рН вода рудничного каналу характеризується як слабокисла (рН = 6,05), у 2021 році – нейтральна (рН = 6,9), а в 2022 році – слаболужна вода. Вода озера Глибоке за показником рН нейтральна. Вода озера Середне в 2017 році характеризується як слаболужна, а в 2021–2022 роках – нейтральна.

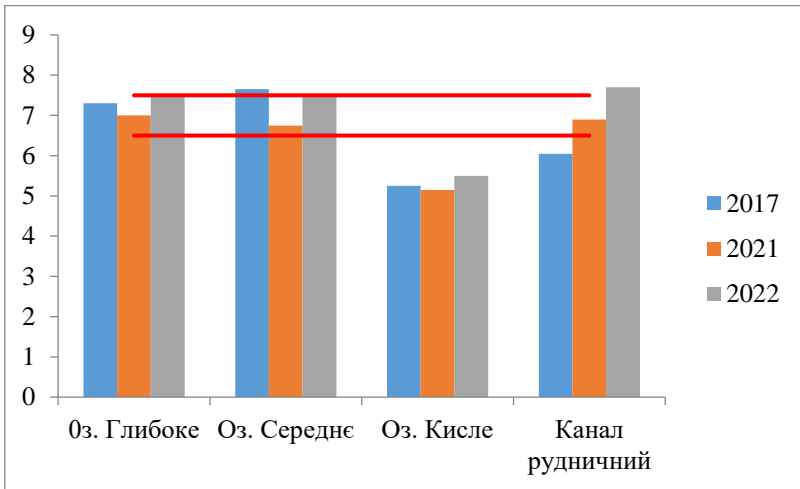


Рис. 2. Значення рН у точках відбору проб води

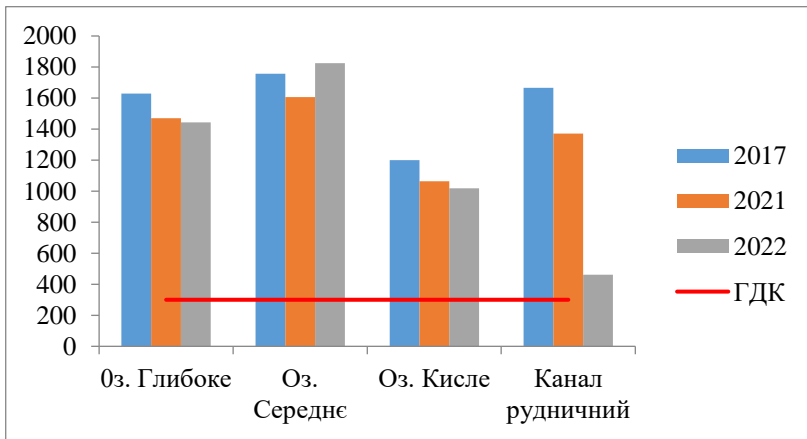


Рис. 3. Вміст сульфатів у пробах води озер Глибоке, Середнє, Кисле та рудничного каналу

Головним джерелом сульфатів у поверхневих водах є процеси хімічного вивітрювання і розчинення мінералів, які містять сірку, в основному гіпс, а також окислення сульфідів і сірки. Сульфати в основному переважають у водах з підвищеною мінералізацією.

У проаналізованих пробах води озер Глибоке, Середнє, Кисле та рудничного каналу спостерігається перевищення ГДК за сульфатами в 1,5–6 разів (рис. 3). В озерах Глибоке, Кисле та рудничному каналі відстежується тенденція до зменшення вмісту сульфатів у воді. Наприклад, в озері Глибоке зміна перевищення ГДК сульфатів становить від 5,4 раза у 2017 році до 4,8 раза у 2022 році; у каналі рудничному перевищення ГДК сульфатів у воді змінюється від 5,5 раза у 2017 році до 1,5 раза в 2022 році.

У порівнянні з іншими водоймами для води озера Середнє характерним є максимальне перевищення ГДК показника мінералізації (2,8–3 рази). Для води озера Глибоке характерним є поступове незначне зменшення показника мінералізації, його перевищення ГДК становить 2,3–2,5 раза. Вода рудничного

каналу характеризується тенденцією до зменшення показника мінералізації. У 2017 році його перевищення становило 2,5 раза, а в 2022 році показник мінералізації знаходиться на рівні ГДК. Зменшення показника мінералізації свідчить про зниження негативного впливу відходів гірничо-хімічного підприємства на водне середовище.

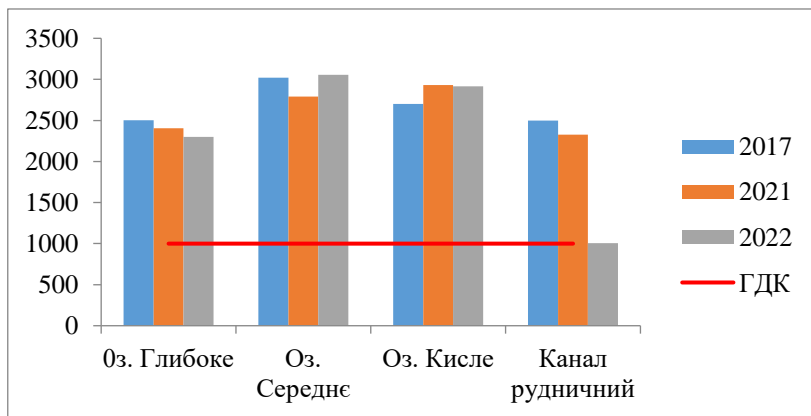


Рис. 4. Мінералізація води у пробах, відібраних з озер Глибоке, Середне, Кисле та рудничного каналу

У всіх водних об'єктах фіксується перевищення ГДК азоту амонійного (рис. 5). Це пов'язано з тим, що на території підприємства біля оз. Глибокого зберігаються гудрони (17 тис. т), завезені в 2003 р. з Угорщини. Біля оз. Кислового розташований відвал фосфогіпсу. Між оз. Середнім та оз. Глибоким розташовано Новороздільський полігон твердих побутових відходів, що також має негативний вплив на водне середовище. Вплив відходів на довкілля спричинений токсичною дією речовин, що у них містяться, переважно сірки і сірчаної кислоти, а також фенолів, важких вуглеводнів у складі гудронів. Однак спостерігається тенденція до зменшення вмісту азоту амонійного в досліджуваних водоймах.

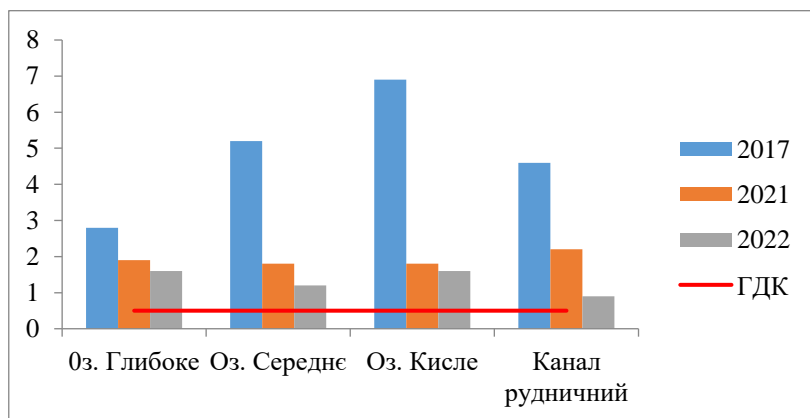


Рис. 5. Вміст азоту амонійного у пробах води озер Глибоке, Середне, Кисле та рудничного каналу

У 2017 році перевищення ГДК азоту амонійного у воді озера Кисле становило 13,8 раза, озера Середнє – 10,4 раза, озера Глибоке – 5,6 раза, рудничного каналу – 9,2 раза. Вже в 2022 році у пробах води озера Кисле перевищення ГДК азоту амонійного становило 3,2 раза, озера Середнє – 2,4 раза, озера Глибоке – 3,2 раза, рудничного каналу – 1,8 раза.

У водоймах підприємства нема перевищення ГДК за нітрат-іонами (рис. 6). Підвищення вмісту нітратів, яке спостерігається впродовж досліджуваних років, вказує на погіршення санітарного стану водойм.

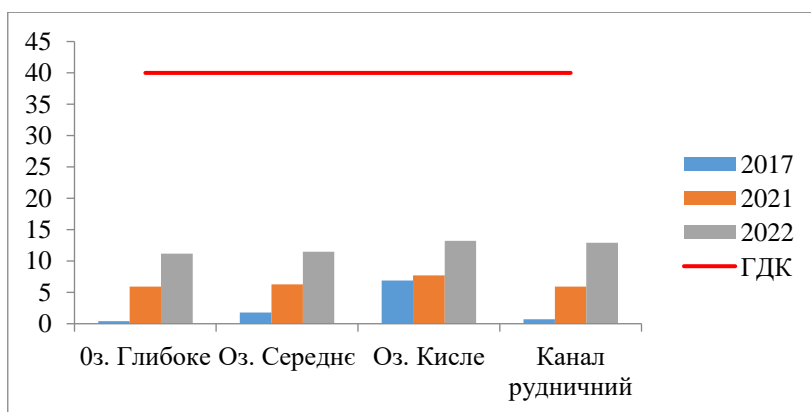


Рис. 6. Вміст нітратів-іонів у пробах води озер Глибоке, Середнє, Кисле та рудничного каналу

У 2017 році в озері Кисле вміст фосфатів у воді значно перевищує ГДК (208 разів), у 2021–2022 роках перевищення ГДК фосфатів у воді становить 138 разів. Присутність фосфатів у воді істотно впливає на розвиток водної рослинності.

Висновки

У проаналізованих пробах води озер Глибоке, Середнє, Кисле та рудничного каналу спостерігається перевищення ГДК за сульфатами в 1,5–6 разів, показником мінералізації в 2,3–3 рази. Спостерігається тенденція до зменшення вмісту азоту амонійного в досліджуваних водоймах: у 2017 році перевищення ГДК азоту амонійного у воді становило 5,6–13,8 раза, а вже в 2022 році перевищення ГДК азоту амонійного у воді становило 1,8–3,2 раза.

У 2017 році та в 2021–2022 роках спостерігається відхилення від норм рН води в озері Кисле, а також перевищення ГДК за фосфатами, сульфатами, азотом амонійним та мінералізацією.

У рудничному каналі встановлено перевищення ГДК за такими показниками: рН, сульфати, азот амонійний.

Оскільки найближча відстань від хвостосховищ до річки Дністер лише 380 м і внизу по течії знаходяться водозабори багатьох міст України і Молдови, то забруднення річки може призвести до міждержавних конфліктів та значних фінансових санкцій.

Через відсутність фінансування стан хвостосховищ та стійкість дамб, які стримують небезпечні відходи, невпинно погіршується та вимагає негайного реагування. Водовідвідні канали потребують розчищення задля можливості відведення інтенсивних опадів від хвостосховищ та запобігання переповненню і підмиванню дамб. Аварії на хвостосховищах можуть завдати багатомільйонних збитків. Витрати на подолання наслідків аварій практично завжди перевищують витрати на забезпечення належного рівня безпеки об'єктів та розроблення заходів з попередження і реагування на надзвичайні ситуації.

Питання екологічної безпеки хвостосховищ доцільно розглядати як на міжнародному, так і на національному рівнях. Надзвичайно важливим є вдосконалення політики попередження та ліквідації наслідків аварій, взаємодія між органами управління цивільного захисту та підприємствами.

Тому науковцям та екологам необхідно серйозно поставитись до вирішення проблеми експлуатації хвостосховищ, розробивши чітку програму із забезпечення безпеки на таких потенційно небезпечних об'єктах, а також скласти плани щодо запобігання і реагування на надзвичайні ситуації. Важливим заходом є проведення спільного та погодженого зовнішнього планування дій в надзвичайних ситуаціях між Україною і Республікою Молдова, а саме встановлення системи оповіщення про випадки аварійного забруднення водних ресурсів в басейні річки Дністер. Україна має впроваджувати вимоги Директиви 2006/21/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 15 березня 2006 р. «Про управління відходами видобувної промисловості та внесення змін і доповнень до Директиви 2004/35/ЄС» для попередження та мінімізації негативного впливу на довкілля, що може виникати в результаті управління відходами видобувної промисловості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. O. Mitryasova, V. Pohrebennyk, Y. Bezsonov, A. Mats, "Environmental risk and state of surface water resources," in *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph*, Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT, pp. 279–288, 2021.
2. V. Dyakiv, V. Pohrebennyk, O. Mitryasova, A. Shybanova, M. Yaremovych, "Actual state and prospects of using the territory of the Rozdil mining and chemical enterprise "Sirka" for the construction of renewable energy facilities," in *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph*, Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT, pp. 76–92, 2021.
3. V. Pohrebennyk, O. Mitryasova, A. Shybanova, M. Ruda, "Assessment of the environmental condition of the Dnister river basin under climate change," in *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph*, Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT, pp. 321–336, 2021.
4. E. Dzhumelia, V. Pohrebennyk, "Study of sustainable development of the territories of mining influence and chemical enterprises based on environmental pollutant control," in *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph*, Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT, pp. 93–102, 2021.
5. А.М. Шибанова, В.Д. Погребенник, О.П. Мітрясова, М.В. Руда, Е.А. Джумеля, М.М. Паславський, "Екологічне оцінювання якості води річки Дністер", *Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць*, Т. 31, № 5, С. 74–78, 2021.
6. E. Dzhumelia, O. Spodyaryk. The Possibility of Post-industrial Landscapes Reclamation Based on the Study of Soil Quality Indicators and Variance Analysis // *IEEE 17th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT) (Lviv, Ukraine, November 10–12, 2022)*. – 2022.

7. Мітрясова О.П., Погребенник В.Д., Шибанова А.М., Джумеля Е.А. Оцінювання екологічного стану водного об'єкта за гідрохімічними показниками // Екологічна безпека та природокористування : збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1 (41). – С. 18–30.
8. Mitryasova O., Pohrebennyk V., Shybanova A., Nosyk A. Prognosis models of surface water status // Water supply and wastewater disposal : designing, construction, operation and monitoring IV. – Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2022. – p. 194–207.
9. Мітрясова О.П., Погребенник В.Д., Шибанова А.М., Джумеля Е.А. Визначення стану водного об'єкту як умова попередження екологічного ризику / Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022: колективна монографія. – Дніпро: Середняк Т.К., 2022. – с. 383–393.
10. Pohrebennyk V., Mitryasova O., Kłos-Witkowska A., Dzhumelia E., The role of monitoring the territory of industrial mining and chemical complexes at the stage of liquidation, 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Vienna, Austria, vol. 17/issue 33, 2017, pp. 383–390.
11. Pohrebennyk V., Dzhumelia E., Korostynska O., Mason A., Cygnar M. Technogenic Pollution of Soil due to Mining and Chemical Enterprises,” in Proc. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, Bulgaria, vol. 2, 30 June – 6 July 2016, pp. 363–370.
12. Rudko G., Shkitsa L. “Ecological consequences of the activity of Western Ukraine mining complexes”, Rocznik AGH, Wiernictwo Nafta Gaz, Poland, T. 19/2, pp. 415–418 (2002).
13. Pohrebennyk V., Mitryasova O., Dzhumelia E., Kochanek A. Evaluation of surface water quality in mining and chemical industry / V. Pohrebennyk, O. Mitryasova, E. Dzhumelia, A. Kochanek // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, Bulgaria. – 2017. – Vol. 17/issue 51, 2017. pp. 425–433.
14. Гайдін А.М. Нові озера Львівщини / А.М. Гайдін, І.І. Зозуля. – Вид. 2-ге, [перероб. та доп.]. – Львів : Вид-во ТзОВ "Афіша", 2009. – 103 с.
15. Погребенник В.Д., Джумеля Е.А. Вплив промислових відходів на якість води / В.Д. Погребенник, Е.А. Джумеля // Ресурси природних вод Карпатського регіону. Проблеми охорони та раціонального використання: збірник наукових статей сімнадцятої міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 24–25 травня 2018 р.). – 2018. – С. 156–159.
16. Мітрясова О.П., Шибанова А.М., Джумеля Е.А. Оцінювання стану водного об'єкту як умова попередження екологічного ризику // «Подолання екологічних ризиків і загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022»: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції (26–27 травня 2022 року, Полтава – Львів). Полтава: НУПП. – 2022. – С. 424–427.
17. Шибанова А.М., Мітрясова О.П., Руда М.В., Джумеля Е.А. Транскордонні екологічні загрози техногенного характеру на території Прикарпаття // «Подолання екологічних ризиків і загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022»: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції (26–27 травня 2022 року, Полтава – Львів). Полтава: НУПП. – 2022. – С. 658–660.
18. Погребенник В.Д., Джумеля Е.А. Екологічна безпека гірничо-хімічних підприємств: монографія. – Житомир: Бук-Друк, 2022. – 190 с.
19. Гідрохімічний режим та якість поверхневих вод басейну Дністра на території України / В.К. Хільчевський, О.М. Гончар, М.Р. Забокрицька та ін.; за ред. В.К. Хільчевського та В.А. Сташука. – К.: Ніка-Центр, 2013. – 256 с.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2022 і прийнята до друку після рецензування 06.03.2023

REFERENCES

1. Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., Bezsonov, Y., & Mats, A. (2021). Environmental risk and state of surface water resources. In *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph* (pp. 279–288). Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT.
2. Dyakiv, V., Pohrebennyk, V., Mitryasova, O., Shybanova, A., & Yaremovych, M. (2021). Actual state and prospects of using the territory of the Rozdil mining and chemical enterprise "Sirka" for the construction of renewable energy facilities. In *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph* (pp. 76–92). Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT.
3. Pohrebennyk, V., Mitryasova, O., Shybanova, A., & Ruda, M. (2021). Assessment of the environmental condition of the Dnister river basin under climate change. In *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph* (pp. 321–336). Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT.
4. Dzhumelia, E., & Pohrebennyk, V. (2021). Study of sustainable development of the territories of mining influence and chemical enterprises based on environmental pollutant control. In *Climate change & sustainable development: new challenges of the century: Monograph* (pp. 93–102). Mykolaiv: PMBSNU – Rzeszow: RzUT.
5. Shybanova, A. M., Pohrebennyk, V. D., Mitryasova, O. P., Ruda, M. V., Dzhumelia, E. A., & Paslavs'kyi, M. M. (2021). Ekolohichne otsynuyannya yakosti vody richky Dnister. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny: zbirnyk naukovo-tekhnichnykh prats'*, 31(5), 74–78 [in Ukrainian].
6. Dzhumelia, E., & Spodaryk, O. (2022). The Possibility of Post-industrial Landscapes Reclamation Based on the Study of Soil Quality Indicators and Variance Analysis. In *IEEE 17th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)*. Lviv, Ukraine.
7. Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., Shybanova, A., & Dzhumelia, E. (2022). Assessment of the environmental status of the water object by hydrochemical indicators. *Environmental Safety and Natural Resources*, 41(1), 18–30. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.18-30> [in Ukrainian].
8. Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., Shybanova, A., & Nosyk, A. (2022). Prognosis models of surface water status. In *Water supply and wastewater disposal: designing, construction, operation and monitoring IV* (pp. 194–207). Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
9. Mitryasova, O. P., Pohrebennyk, V. D., Shybanova, A. M., & Dzhumelia, E. A. (2022). Vyznachennya stanu vodnoho ob'yektu yak umova poperedzhennya ekolohichnoho ryzyku. In *Podolannya ekolohichnykh ryzykiv ta zahroz dlya dovkillya v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy: kolektyvna monohrafiya* (pp. 383–393). Dnipro: Serednyak T.K. [in Ukrainian].
10. Pohrebennyk, V., Mitryasova, O., Kłos-Witkowska, A., & Dzhumelia, E. (2017). The role of monitoring the territory of industrial mining and chemical complexes at the stage of liquidation. In *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, (Vol. 17, issue 33, pp. 383–390). Vienna, Austria.
11. Pohrebennyk, V., Dzhumelia, E., Korostynska, O., Mason, A., & Cygnar, M. (2016). Technogenic Pollution of Soil due to Mining and Chemical Enterprises. In *Proc. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM* (Vol. 2, pp. 363–370). Albena, Bulgaria.
12. Rudko, G., Shkitsa, L. (2002). Ecological consequences of the activity of Western Ukraine mining complexes. *Rocznik AGH, Wiertnictwo Nafta Gaz, Poland*, 19/2, 415–418.
13. Pohrebennyk, V., Mitryasova, O., Dzhumelia, E., & Kochanek, A. (2017). Evaluation of surface water quality in mining and chemical industry. In *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM* (Vol. 17/issue 51, pp. 425–433). Albena, Bulgaria.

14. Haydin, A. M., & Zozulya, I. I. (2009). *Novi ozera L'vivshchyny* (2nd ed.). L'viv: Vyd-vo TzOV "Afisha" [in Ukrainian].
15. Pohrebennyk, V. D., & Dzhumelia, E.A. (2018). Vplyv promyslovykh vidkhodiv na yakist' vody. In *Resursy pryrodnykh vod Karpats'koho rehionu. Problemy okhorony ta ratsional'noho vykorystannya: zbirnyk naukovykh statey simnadtsyatoyi mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 156–159). L'viv [in Ukrainian].
16. Mitryasova, O. P., Shybanova, A.M., & Dzhumelia, E. A. (2022). Otsynuyannya stanu vodnoho ob'yektu yak umova poperedzhennya ekolohichnoho ryzyku. In *Podolannya ekolohichnykh ryzykiv i zahroz dlya dovkillya v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy – 2022: zbirnyk materialiv I Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* (pp. 424–427). Poltava: NUPP [in Ukrainian].
17. Shybanova, A. M., Mitryasova, O. P., Ruda, M. V., & Dzhumelia, E. A. (2022). Transkordonni ekolohichni zahrozy tekhnohennoho kharakteru na terytoriyi Prykarpattya. In «*Podolannya ekolohichnykh ryzykiv i zahroz dlya dovkillya v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy – 2022*»: zbirnyk materialiv I Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (pp. 658–660). Poltava: NUPP [in Ukrainian].
18. Pohrebennyk, V.D., & Dzhumelia, E.A. (2022). Ekolohichna bezpeka hirnycho-khimichnykh pidpryyemstv: monohrafiya. Zhytomyr: Buk-Druk [in Ukrainian].
19. Khil'chevs'kyu, V. K., Honchar, O. M., Zabokryts'ka, M. R. et al. (2013). Hidrokhimichnyy rezhym ta yakist' poverkhnevyykh vod baseynu Dnistra na terytoriyi Ukrainy. (V. K. Khil'chevs'kyu & V. A. Stashuk, Eds.). Kyiv: Nika-Tsentr [in Ukrainian].

The article was received 19.12.2022 and was accepted after revision 06.03.2023

Шибанова Алла Миколаївна

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»

Адреса робоча: 79013 Україна, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12

ORCID ID: 0000-0003-0364-7056 **e-mail:** ashybanova16@gmail.com

Мітрянська Олена Петрівна

доктор хімічних наук, професор, професор кафедри екології Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Адреса робоча: 54003, Україна, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10

ORCID ID: 0000-0002-9107-4448 **e-mail:** eco-terra@ukr.net

Джумеля Ельвіра Анатоліївна

доктор філософії, асистентка кафедри програмного забезпечення Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Адреса робоча: 79013 Україна, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12

ORCID ID: 0000-0003-3146-8725 **e-mail:** elviradzhumelia@gmail.com

Руда Марія Віталіївна

кандидат технічних наук, доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»

Адреса робоча: 79013 Україна, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12

ORCID ID: 0000-0003-0590-4589 **e-mail:** marichkarmv@gmail.com

УДК 621.318

Larysa Levchenko¹, Doctor of Technical Sciences, Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7227-9472> **e-mail:** larlevch@ukr.net

Oleksandr Radionov², Doctor of Technical Sciences, Senior Research Associate
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1112-5146> **e-mail:** ferrohdrodynamica@gmail.com

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

²Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

MODERNIZATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT AS A WAY OF REDUCING THE RISKS OF EMERGENCY SITUATIONS AT NUCLEAR POWER PLANTS

Abstract. An analysis of major accidents in the electric power and coal industry was carried out. It is shown that for many types of technological equipment, the cause of failure was the unsatisfactory performance of the seals. It is shown that in two known nuclear accidents, the cause is the failure of coolant supply systems. Moreover, it had catastrophic consequences at the Fukushima nuclear power plant. The direct cause of the cessation of cooling of the reactors was the ingress of water into the electric motors of the circulation pumps. Most electric drives of nuclear power plants are synchronous electric motors. Turbogenerators are also synchronous four-pole electric machines of great value, which determines the expediency of increasing their reliability and service life. The solution to this problem is possible with the help of magnetic fluid sealing complexes (MFCs). To compare the level of man-made safety when using MFCs and traditional sealing systems, an improved method of risk assessment is proposed, developed at the expense of a systematic analysis of sealing complexes of equipment of hazardous industries for synchronous electric motors of the SDN type under different modes of operation, power and revolutions of the rotating shaft. The man-made risk assessment shows that the level of man-made danger is reduced by 1.5 to 4 times when sealants are introduced.

Keywords: technogenic risk; magnetic fluid sealing complex; safety.

Л.О. Левченко¹, О.В. Радіонов²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

²Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЯК ШЛЯХ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ НА АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

Анотація. Проведено аналіз великих аварій в електроенергетиці та вугільній промисловості. Показано, що для багатьох видів технологічного обладнання причиною відмови була незадовільна робота ущільнень. Показано, що у двох відомих ядерних аваріях причиною є відмова систем постачання теплоносіїв. Причому на АЕС Фукусіма це мало катастрофічні наслідки. Безпосередньою причиною припинення охолодження реакторів було потрапляння води

у електродвигуни циркуляційних насосів. Більшість електроприводів атомних станцій є синхронними електродвигунами. Турбогенератори також є синхронними чотирьополюсними електричними машинами великої вартості, що обумовлює доцільність підвищення їх надійності та термінів експлуатації. Вирішення цієї проблеми можливе застосуванням магніторідинних герметизуючих комплексів (МРГК). Для порівняння рівня техногенної безпеки при застосуванні МРГК і традиційних ущільнюючих систем пропонується удосконалений метод оцінки ризику, розвинутий за рахунок системного аналізу герметизуючих комплексів обладнання небезпечних виробництв для синхронних електродвигунів типу СДН при різних режимах експлуатації, потужності і оборотах обертового вала. Оцінка техногенного ризику показує, що рівень техногенної безпеки при впровадженні герметизаторів знижується в 1,5 ... 4 рази.

Ключові слова: техногенний ризик; магніторідинний герметизуючий комплекс; безпека.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.29-42>

Вступ

Результатом науково-технічного прогресу в розвинених країнах стало утворення екологічно небезпечних об'єктів, до яких належать електростанції, металургійні, хімічні, нафтохімічні та гірничодобувні підприємства, нафто- та газопроводи.

Істотно більшої шкоди навколишньому середовищу при короткочасних і довготривалих наслідках завдають не стаціонарні шкідливі викиди цих об'єктів, а аварійні ситуації, які у деяких випадках мають глобальний характер.

Підвищення техногенної безпеки підприємств енергетики є одним з пріоритетних напрямів досліджень та прикладних розробок у галузі екологічної безпеки як в Україні, так і в усьому світі.

Серед таких об'єктів атомні електростанції є потенційно найбільш небезпечними через масштабність впливів на населення і навколишнє середовище у разі виникнення аварій з викидами радіоактивних речовин. Про це свідчать наслідки аварій на Чорнобильській станції та на станції Фукусіма. Серед відомих аварій на діючих АЕС – Три-Майл-Айленд, Чорнобильській та Фукусіма – перша та третя були викликані аварійними ситуаціями у системах охолодження реакторів. Якщо на станції Три-Майл-Айленд персонал вчасно не зреагував на те, що засувки лінії аварійного постачання води зачинені, то на станції Фукусіма ситуація інша. Потрапляння води у електропривод насосів, які прокачують теплоносій крізь активну зону реакторів, призвело до їх перегріву й руйнування контурів з радіаційно забрудненою водою та підплавлення тепловіділяючих елементів. Таким чином, безпосередньою причиною аварій стала ненадійна робота допоміжного електротехнічного обладнання. На сьогоднішній день для підвищення надійності роботи електродвигунів, генераторів та збільшення їх ресурсності застосовують магніторідинні герметизатори, які запобігають потраплянню всередину вологи, пилу тощо. Їх застосовують для підвищення надійності роботи електроприводу систем вентиляції на підприємствах хімічної промисловості, машинобудівної галузі, гідроелектростанцій тощо.

Специфікою атомних електростанцій є те, що через їх підвищену небезпеку аварійне зниження потужності реакторів або повна зупинка здійснюються

автоматично внаслідок припинення навіть відбору генерованої електроенергії через вихід з ладу підвищувальних трансформаторів, аварії на відкритих розподільчих пристроях, обрив дротів ліній електропередачі внаслідок природних явищ. При цьому в активній зоні реактору через їх велику масу та інерційність фізичних процесів виділяється залишкове тепло. Це потребує інтенсивного охолодження упродовж значного часу. Тому доцільно розглянути можливості зниження ризиків аварійних ситуацій на атомних станціях, зокрема, за рахунок підвищення експлуатаційної надійності електроприводу.

Для України екологічна ситуація погіршується тим, що в умовах війни ймовірність пошкодження об'єктів критичної інфраструктури різко зростає, а фізичне та моральне старіння обладнання протягом останніх років значно випереджає темпи його заміни та оновлення [1]. В результаті знос основних засобів з вищевказаних галузей небезпечних виробництв характеризується не більше 50–90% і відновлювати парк діючого устаткування з економічних причин важко [2].

Аналіз великих аварій в електроенергетиці та вугільній промисловості в США, Росії, Франції, Індії, Італії та Україні показує, що в більшості випадків їх безпосередніми причинами були механічні несправності, а загальною рисою техногенних катастроф, спричинених механічним пошкодженням, був початок аварії з відмови допоміжного, незначного елемента з наступним каскадним розвитком у національну катастрофу [3].

Статистичні дані свідчать, що для багатьох видів обладнання, яке широко застосовується на вищевказаних підприємствах (електродвигуни, редуктори, мішалки, вентилятори і т.д.), напрацювання на відмову найчастіше визначається надійністю підшипникових вузлів [4]. Крім того, до 90% випадків аварійних руйнувань підшипникових вузлів спричинено незадовільною роботою ущільнень [5].

Аналіз виходу з ладу підшипникових вузлів показав, що однією з причин є неможливість забезпечення практично повної герметичності. Потенційні можливості традиційних ущільнень значною мірою вичерпали себе, і забезпечити необхідний рівень герметичності вони не в змозі.

Для захисту підшипникових вузлів за важких умов експлуатації (сильна запиленість, підвищена вологість, наявність абразивних частинок тощо) досить добре себе зарекомендували магніторідинні герметизуючі комплекси (МЖГК). Найбільш широко МРГК встановлювалися в електродвигунах вентиляторів градирень та апаратів повітряного охолодження (АПО), електричних машинах та вентиляторах, поворотних редукторах вугледобувних та прохідницьких комбайнів тощо [6, 7, 8, 9].

Аналіз проведених випробувань, дослідної та промислової експлуатації показує зниження ризику аварій ущільнювальних систем, що включають МРГК, у порівнянні з традиційними ущільненнями за рахунок підвищення безвідмовності та безаварійності роботи технологічного обладнання. Проте кількісну оцінку ризику техногенних аварій можна надати лише з урахуванням системного багаторівневого аналізу.

При оцінці техногенної безпеки слід враховувати загальні принципи інтегрованої системи ризиків, що містить такі компоненти – якість, безпека, екологія, охорона праці. Вони регламентуються міжнародними стандартами серій ISO 9000, ISO 14000 та ISO 18000.

Крім того, слід враховувати, що рівень техногенної безпеки є системною категорією. Сутність системної методології полягає у трактуванні безпеки як функціональної властивості складних динамічних багаторівневих систем. Це пов'язано з тим, що властивість системи є більшою, ніж проста сума властивостей її компонентів. В загальному випадку методи системного аналізу та синтезу розглядають технологічне устаткування як одну з складових частин загальної системи «людина – машина – довкілля». Вивчення та дослідження такої системи – це задача аналізу великих обсягів різномірної інформації та їх взаємозв'язків. Однак така система містить усі типи причин, в результаті яких відбуваються техногенні події – помилки (людина), відмови (техніка), несприятливі впливи на них ззовні (робоче та зовнішнє середовище).

Для аналізу впливу на безпеку МРГК застосуємо принцип системності, який передбачає підхід до нової техніки як до комплексного об'єкта, що є сукупністю взаємозалежних окремих елементів (функцій), реалізація яких забезпечує досягнення необхідного ефекту. Принцип системності передбачає вивчення об'єкта, з одного боку, як єдиного цілого, з іншого – як частини більшої системи, в якій об'єкт, що аналізується, перебуває з іншими системами у певних зв'язках. Отже, принцип системності охоплює всі сторони об'єкта [10].

Це дозволяє перетворити загальну систему на трирівневу ієрархічну систему «магніторідинний герметизуючий комплекс – технологічне обладнання – техногенна безпека», а питання впливу МРГК на забезпечення прийнятної безпеки інтегрувати як функціональну властивість такого складного об'єкта. Важливим є також те, що таку систему можна представити у вигляді моделі, зручної для аналітичного дослідження та синтезування компонентів – підсистем.

На даний час немає загальноприйнятого кількісного показника безпеки технічного об'єкта чи системи. Проте загально визнано, що пожежі, вибухи, травми тощо є випадковими подіями, для опису та кількісної оцінки яких можуть бути застосовані відомі показники та методи теорії ймовірностей. Тому кількісні показники безпеки обладнання пов'язані з показниками безвідмовності та безаварійності, математичні моделі яких добре розроблені [11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз наукових джерел [12, 13, 14] показав, що основна увага наукових праць фокусується на питаннях оцінки ризику під час реалізації процесів життєвого циклу продукції. Слід зауважити, що питанням оцінки ризиків, які виникають під час розробки, впровадження та/або модернізації технологічного обладнання та його елементів, практично майже не приділяється увага. Відповідно в літературі дуже мало висвітлюються питання кліматичних та екологічних особливостей розташування підприємств, а також існуючий технологічний рівень у галузі промисловості.

В роботі [11] вказується, що мета подальших досліджень повинна полягати в оцінці ступеня впливу конкретних властивостей людино-машинної системи на умови прояву та величину техногенного ризику. Насамперед це стосується властивостей технічних систем. Це пов'язано з тим, що дрібні відмови можуть провокувати значні наслідки. Накопичення прихованих пошкоджень, старіння матеріалів, динамічні втомлювальні процеси в конструкціях можуть

приводити до різких якісних змін. Фактор робочого довкілля може виявитися суттєвим навіть для однотипних технічних систем через «вік» та особливості експлуатації. Та чи інша дія, яка виявлена як «вразлива ланка в технічній системі», може призвести до ланцюгової реакції відмов.

Основою аналізу техногенного ризику має бути не порівняння з критеріями прийнятності, а виявлення «вузьких» місць в системі функціонування об'єкта для подальшого обґрунтування заходів безпеки.

На сьогоднішній день у світовій практиці при оцінці ризиків широко використовуються метод аналізу видів та наслідків потенційних невідповідностей (FMEA-Potential Failure Mode and Effects Analysis). Близько 80% розробок технічних виробів і технологій проводиться наразі із застосуванням методу FMEA чи його модифікації [14]. Важливим для цілей даного дослідження є те, що метод охоплює усі етапи життєвого циклу продукції та будь-які технологічні процеси. Причому метод дозволяє аналізувати складні технічні системи, як загалом, так і їх складові [15].

За допомогою цього методу можна вирішувати прямі та зворотні задачі оцінки безпеки. Прямі задачі дозволяють визначити величину ризику конкретного устаткування. Зворотні задачі мають на меті забезпечити технічне рішення таким чином, щоб виконати умову безпеки із заздалегідь заданою кількісною мірою ризику.

Використовуючи кількісні показники ризику, можна «вимірювати» потенційну небезпеку і навіть порівнювати небезпеки різної природи. До таких методів належить різновид FMEA – метод Файн-Кінні (Fine & Kinney) [16]. Відповідно до методу Файн-Кінні техногенний ризик R розраховується за формулою:

$$R = E \times A \times S, \quad (1)$$

де E (Existence) – ймовірність виникнення небезпечної ситуації;

A (Avoidance) – ймовірність того, що небезпечна ситуація призведе до завдання шкоди;

S (Severity) – тяжкість наслідків.

Цей метод враховує також ступінь схильності людини до впливу шкідливих чинників при техногенній загрозі. Тому пропонується його вдосконалити з метою оцінки техногенного ризику.

Величина техногенного ризику R в результаті може мати значення від 1 до 1000. Для R заздалегідь має бути встановлений критерій $R_{\text{гранич}}$. (граничне значення) техногенного ризику. Відповідно до рекомендацій [14] граничне значення $R_{\text{гранич}}$ задається в межах $100 < R_{\text{гранич}} < 125$ (як добуток середніх оцінок $R_{\text{гранич}} = 5 \times 5 \times 5 = 125$). Підприємства, які давно використовують цю методологію, в особливо відповідальних випадках працюють у діапазоні $20 < R_{\text{гранич}} < 40$ [14].

Метою дослідження є вдосконалення методу оцінки техногенних ризиків за рахунок системного багаторівневого аналізу герметизуючих комплексів обладнання небезпечних виробництв для вивчення впливу магніторідинних герметизуючих комплексів на техногенну безпеку і обґрунтування їх застосування у атомній енергетиці.

Виклад основного матеріалу

Надійність та достовірність результатів аналізу багато в чому визначаються повнотою вихідних даних. В якості вихідних даних для аналізу були використані результати стендових, дослідно-промислових випробувань та експлуатації МРГК на різному технологічному обладнанні. Використовувалися журнали технічного стану технологічного обладнання, де запроваджено МРГК. З урахуванням терміну експлуатації МРГК, який на низці об'єктів становить 15–20 років, виходила достовірна статистична вибірка з оцінки надійності та безаварійності роботи обладнання. Також було використано аналізи роботи МРГК, проведені технічними службами заводів, де експлуатуються МРГК [18]. Крім того, технічні служби заводів надали статистичні матеріали у вигляді банку даних щодо відмов, поломок, нещасних випадків, аварій, що сталися з вини традиційних ущільнень (лабіринтні, манжетні тощо).

Вихідними даними для аналізу були також повна документація про об'єкт, його технічні характеристики, режими роботи, діапазон зміни параметрів, проєктувальні, перевірочні розрахунки фізичних процесів, що протікають в об'єкті, дані про різні системи об'єкта та характер взаємозв'язку між системами. Використовувалися дані, отримані на інших видах устаткування, але які мають певні подібні характеристики. Доповнювалися ці відомості наявними рекламациями та претензіями споживачів, що експлуатують це обладнання, до заводів-виробників.

З урахуванням специфіки застосування МРГК (переважно або на дорогому, або відповідальному устаткуванні) було прийнято рішення про недостатність накопиченої статистичної бази для застосування методів теорії ймовірності і тому було проведено якісний аналіз. Це дозволяє зробити групу методів, які також входять до FMEA, де вихідні дані із залученням експертних оцінок зводяться до кваліметричних табличних шкал значущості, що характеризують виникнення небезпечної ситуації та тяжкість її наслідків. Це дозволяє отримувати кількісні характеристики ризику.

Попередні розрахунки за формулою (1) та аналіз отриманих результатів показали, що низку чинників, які впливають на рівень техногенної безпеки, не враховано у кваліметричних таблицях 1 та 2, наведених у [16, 17, 14].

Таблиця 1. Шкала оцінки ймовірності виникнення небезпечної ситуації, E

Критерій ймовірної послідовності події або випадкової обставини	Оцінка P ₁ , бал
Один раз протягом терміну експлуатації (20 років)	1
Один раз між обстеженнями (5 років)	2
П'ять разів між обстеженнями – щорічно	3
Десять разів між обстеженнями – двічі на рік	4
Щомісяця	5
Два рази на місяць	6
Щотижня	7
Два рази на тиждень	8
Щодня	9
Постійна присутність безпеки	10

Таблиця 2. Шкала оцінки ймовірності заподіяння шкоди, А

Критерій ймовірності заподіяння шкоди	Оцінка P ₂ , бал
Мізерна (цілком неможливо)	1
Незначна (практично неможливо)	2
Вельми невелика (майже неможливо)	3
Невелика (ймовірність трохи менше 50%)	4
Помірна (ймовірність близько 50%)	5
Велика (ймовірність приблизно 50–60%)	6
Вельми велика (ймовірно)	7
Висока (дуже ймовірно)	8
Дуже висока (майже гарантовано)	9
Визначена (неминуча)	10

Забезпечити достовірність результатів рівня техногенної безпеки запропоновано за рахунок додаткового обліку ступеня схильності людини до впливу шкідливих факторів від механічних пошкоджень та стану обладнання. Для цього формула (1) була перетворена на вигляд:

$$R = E \times A \times S \times K, \quad (2)$$

де шкала оцінки тяжкості наслідків S була розроблена на основі обробки вихідних даних, що використовуються при аналізі роботи МРГК з урахуванням ступеня схильності людини до впливу шкідливих факторів при механічних пошкодженнях, і представлена в табл. 3.

$K = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6$ – поправочні коефіцієнти, що враховують:

K_1 – коефіцієнт, що враховує термін експлуатації устаткування, ($K_1 = 1,0 \dots 1,1$);

K_2 – коефіцієнт, що враховує вплив фізичного і морального старіння устаткування, його ремонт ($K_2 = 1,0 \dots 1,1$);

K_3 – коефіцієнт, що враховує запровадження нових технічних рішень на етапі модернізації ($K_3 = 0,9 \dots 1,0$);

K_4 – коефіцієнт, що враховує виготовлення технологічного устаткування та його комплектуючих на сертифікованих ділянках ($K_4 = 0,9 \dots 1,0$);

K_5 – коефіцієнт, що враховує взаємне розташування небезпечних об'єктів ($K_5 = 1,0 \dots 1,2$);

K_6 – коефіцієнт, що враховує умови обслуговування та наявність резервування устаткування ($K_6 = 0,9 \dots 1,0$).

Поправочні коефіцієнти $K_1 - K_2$ одержано експертним шляхом на підставі результатів експлуатації.

В даному випадку, зважаючи на те, що детально аналізується тільки один вид небезпеки, пов'язаний з ущільнювальними системами, доцільно розглядати граничне значення техногенного ризику в діапазоні $15 < R_{\text{гранич}} < 30$.

Таблиця 3. Шкала оцінки тяжкості наслідків, S *

Критерій тяжкості наслідків, S		Оцінка S, бал
Для людини	Для технологічного обладнання	
Травми, поранення, опіки або забиття відсутні	Функціональний збій в обладнанні чи процесі – немає потенційної небезпеки	1
Невеликі пошкодження та повне відновлення без необхідності відсутності на робочому місці	Повністю достатньо наявних технічних засобів та заходів захисту	2
Повне відновлення та повернення після відсутності на робочому місці менше 3 днів	Необхідне проведення стандартних процедур у сфері ремонту, екологічної безпеки та охорони праці	3
Повне відновлення та повернення після відсутності на робочому місці від трьох днів до трьох тижнів	Часткове пошкодження обладнання, необхідний ремонт із заміною комплектуючих, пошкодження можна швидко ліквідувати	4
Повне відновлення та повернення після відсутності на робочому місці більше трьох тижнів	Часткове пошкодження обладнання, необхідний ремонт із заміною комплектуючих, пошкодження не можна швидко ліквідувати	5
Повернення на робоче місце після відсутності більше трьох тижнів, проблеми зі здоров'ям	Серйозне пошкодження обладнання вимагає спеціальних заходів захисту та безпеки, для усунення необхідно більш тривалий час	6
Постійне слабе зниження здатності до трудової діяльності	Повне відновлення обладнання неможливе, при експлуатації не витримується ряд технічних характеристик (наприклад, підвищення вібрації тощо)	7
Постійна серйозна інвалідність	Експлуатація обладнання може бути дозволена на обмежений термін спеціальним сертифікаційним центром або галузевим інститутом, що має відповідну ліцензію після усунення всіх отриманих від них зауважень	8
Постійна повна інвалідність	Аварія, неможливість відновлення обладнання, можуть бути серйозні наслідки для навколишнього середовища	9
Смерть	Техногенна катастрофа	10

*Для визначення техногенного ризику R вибирається більш вагомий критерій тяжкості наслідків, S

Запропонований метод дозволяє обґрунтувати вибір заходів щодо забезпечення рівня техногенного ризику шляхом співвідношення величини ризику, визначеного за формулою (2), з граничними значеннями категорій ризику, розроблених авторами на основі умов експлуатації обладнання небезпечних виробництв та викладених у табл. 4.

Таблиця 4. Категорія ризику

Категорії ризику	Техногенний ризик, R	Опис та необхідні заходи
I. Незначний ризик	≤ 15	Спеціальні заходи не потрібні. Документувати ризики не обов'язково
II. Прийнятний ризик	15–30	Спеціальні заходи для зменшення ризику не потрібні, але рекомендується оцінити, які заходи можна було б реалізувати з мінімальними витратами. Ризик все ж таки необхідно контролювати
III. Терпимий ризик	30–125	Необхідні заходи зменшення ризику, але їх не обов'язково реалізовувати негайно, необхідно брати до уваги економічні міркування. Заходи необхідно проводити принаймні протягом 3–5 місяців після оцінки ризику
IV. Значний ризик	125–400	Роботу не можна продовжувати, доки не вжито заходів для зменшення або усунення ризику. Якщо роботу неможливо перервати, то заходи (колективні) необхідно вжити протягом 1–2 місяців залежно від кількості працівників, що піддаються ризику. Необхідно своєчасно придбати засоби індивідуального захисту
V. Неприпустимий ризик	≥ 400	Зменшення ризику є обов'язковим. Якщо через брак коштів немає можливості здійснити превентивні заходи, то робота у небезпечній зоні категорично забороняється.

Результати розрахунків техногенних ризиків згідно з формулою (2) на прикладі синхронних електродвигунів типу СДН виробництва АТ «Завод великих електричних машин» (м. Каховка), при комплектації виносних підшипникових стійок лабіринтними ущільненнями та МРГК представлені на рисунках 1, 2, 3. Зазначені електродвигуни застосовуються в якості приводу для водяних, шламових насосів; цементних, вуглерозмельних, рудорозмельних та інших промислових млинів; шахтних вентиляторів головного провітрювання; на магістральних нафто- та газопроводах і т.п. Вони можуть експлуатуватись як у приміщеннях, так і на відкритому повітрі. Навколишнє середовище під час експлуатації синхронних машин може містити значну кількість вологи, пилу, абразиву (цементний, вугільний пил, штиб і т.ін.)

З рис. 1 видно, що умови експлуатації електродвигунів однакового року випуску (початку 90-х років), однакової потужності та оборотів вала, що обертається, досить сильно впливають на рівень техногенного ризику. Більш комфортні умови експлуатації у приводу водяних насосів, які розташовані в закритих приміщеннях. Це ілюструється низьким рівнем ризику і, мабуть, пояснює той факт, що МРГК за таких умов не встановлювалися. Потреба

у впровадженні МРГК для всіх інших існує на заводах постійно. Найважчі умови експлуатації у шахтних вентиляторів головного провітрювання, оскільки при їх експлуатації обов'язково відбувається налипання пилу на поверхню лопаток, що призводить до дисбалансу ротора та появи підвищеної вібрації підшипникових вузлів. Це збільшує величину техногенного ризику для МРГК.

Можливість МРГК забезпечити практично повну герметичність дозволяє підтримувати техногенну безпеку на постійному та досить високому рівні.

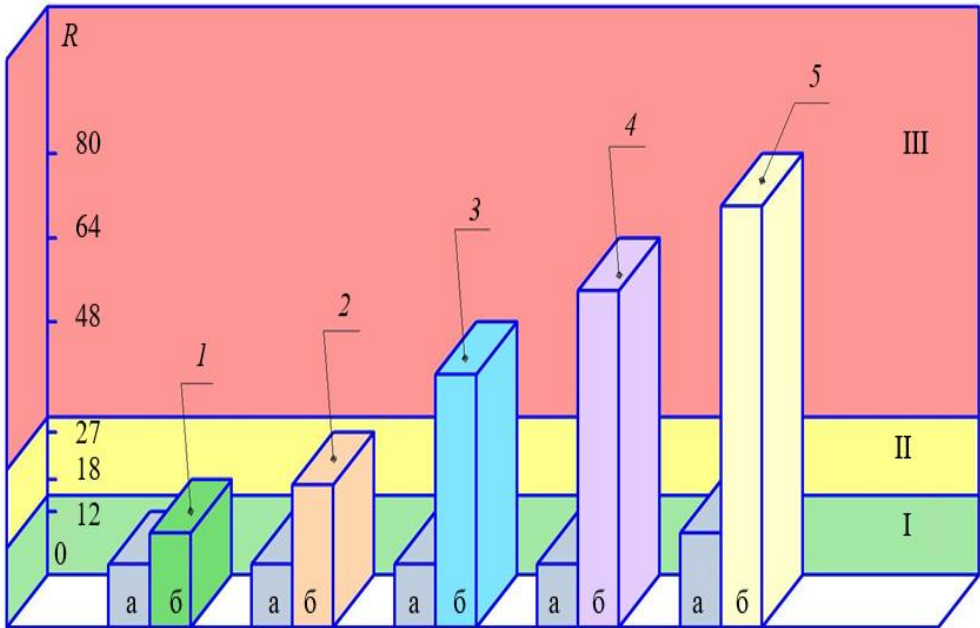


Рис. 1. Залежність техногенного ризику електродвигунів типу СДН залежно від його призначення:

а) з комплектацією МРГК;

б) із комплектацією лабіринтними ущільненнями;

1 – для приводу водяних насосів у закритих приміщеннях;

2 – для приводу водяних насосів на свіжому повітрі;

3 – для приводу цементних млинів;

4 – для приводу вуглерозмольних млинів;

5 – для приводу шахтних вентиляторів

Було проаналізовано техногенний ризик при застосуванні електродвигунів серій СДН-14 та СДН-15 при 1000 об/хв та з різним діапазоном потужності: 800 кВт; 1,25 МВт; 1,6 МВт; 2,5 МВт; 3,2 МВт, які використовувалися в якості приводів водяних насосів. Оцінка ризику показала, що із зростанням потужності електричної машини рівень техногенної безпеки не змінюється, що впливає з рис. 2.

Це дозволило на наступному етапі проаналізувати вплив частоти обертання вала на техногенний ризик за приблизно однакової потужності електродвигунів. Розглядалися електродвигуни серії СДН-14 та СДН-15 випуску початку 90-х років з такими показниками: 375 об/хв., 1000 кВт; 500 об/хв., 1250 кВт; 600 об/хв, 800 кВт; 750 об/хв, 1250 кВт; 1000 об/хв, 1000 кВт.

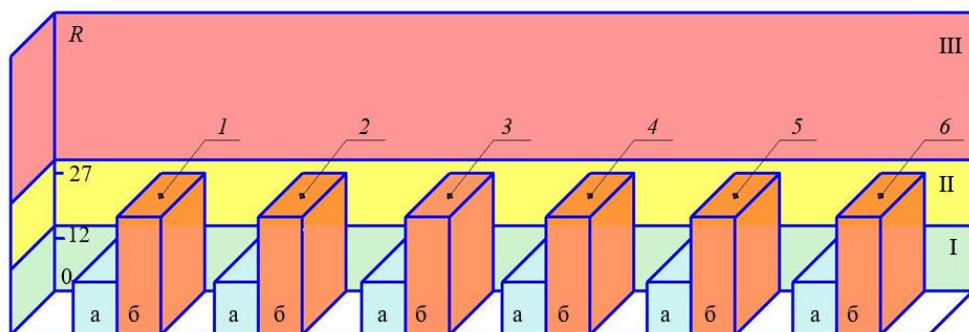


Рис. 2. Техногенний ризик електродвигунів серії СДН-14 та СДН-15 з різним діапазоном потужності:

- а) з комплектацією МРГК;
- б) із комплектацією лабіринтними ущільненнями;
- 1 – за потужності 800 кВт; 2 – за потужності 1,25 МВт;
- 3 – за потужності 1,25 МВт; 4 – за потужності 1,6 МВт;
- 5 – за потужності 2,5 МВт; 6 – за потужності 3,2 МВт

Аналіз результатів рис. 3 показує незначний вплив збільшення обертів вала, що обертається, на техногенний ризик. Збільшений ризик при невеликих оборотах пов'язаний з тим, що конструктивно на них застосовуються манжетні ущільнення, які виявилися менш надійними, ніж лабіринтні. Цей висновок може бути застосований лише до цього конкретного випадку, тому що вивчалися електродвигуни, що експлуатуються близько 20–25 років, в них за рахунок зносу ефективність манжетного ущільнення знизилася. Техногенний ризик при використанні МРГК практично не залежить від кількості обертів вала, що обертається.

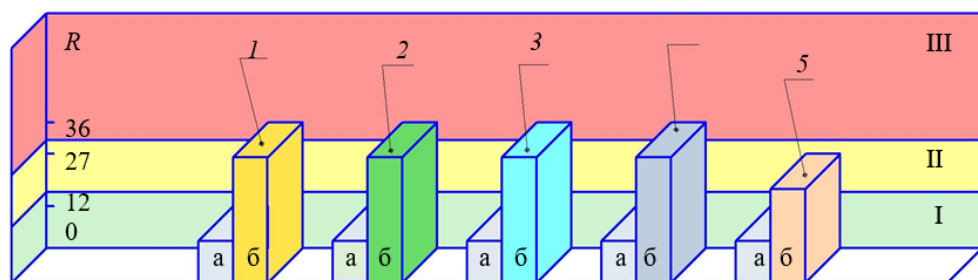


Рис. 3. Залежність техногенного ризику електродвигунів типу СДН залежно від частоти обертання вала:

- а) з комплектацією МРГК у всьому діапазоні частот;
- б) з комплектацією традиційними ущільненнями:
- 1 – 375 об/хв; 2 – 500 об/хв; 3 – 600 об/хв; 4 – 750 об/хв; 5 – 1000 об/хв

Аналіз проведених розрахунків показує, що всі електродвигуни, які досліджуються, знаходяться в зоні терпимого ризику. Це пояснюється тим, що всі електродвигуни знаходяться в експлуатації і тому повинні задовольняти вимогам, що висувуються до них, у тому числі й з екологічної безпеки. При проектуванні нового устаткування чи модернізації чинного потрібно прагнути

максимально можливого зниження техногенного ризику, оскільки аналіз великих техногенних катастроф останнього часу показує, що саме системи ущільнення найчастіше були першою ланкою в ланцюжку відмов, що каскадно переростають в аварію. Саме тому роботи в III категорії (див. табл. 4) щодо зниження ризику є актуальними, що підтверджують впровадження МРГК замість традиційних ущільнень.

Враховуючи викладене, можна дійти висновку щодо доцільності застосування МРГК на усіх ланках атомних електростанцій, де використовується електропривод. Це стосується також турбогенераторів, які є синхронними машинами.

Висновки

1. Аналіз великих техногенних катастроф на об'єктах критичної інфраструктури підтверджує, що у більшості випадків їх причинами були механічні несправності багатьох видів технологічного обладнання (особливо їх підшипникових вузлів), коли відмова відбувається через незадовільну роботу систем ущільнювачів.

2. Забезпечення високого рівня герметичності досягається застосуванням МРГК. Це обумовлено доцільністю їх використання в усіх електродвигунах АЕС з огляду на можливість виникнення аварійних ситуацій на другорядних ланках технологічного процесу з настанням ланцюга нештатних ситуацій.

3. Порівняння рівнів техногенної безпеки при застосуванні різних систем ущільнювачів можливе з використанням удосконаленого методу оцінки ризиків з урахуванням системного багаторівневого аналізу на основі методу Файн-Кінні для трирівневої ієрархічної системи «МРГК – технологічне обладнання – техногенна безпека».

4. Аналіз оцінки ризиків для синхронних електродвигунів серії СДН виробництва АТ «ЗКЕМ» (Нова Каховка) за різних умов експлуатації, потужності та оборотах валу, що обертається, показав зниження техногенного ризику при впровадженні МРГК в діапазоні 1,5...4 рази.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Манец І.Г., Грядущий Б.А., Левіт В.В. (2010). Технічне обслуговування та ремонт шахтних стовбурів. Донецьк. Юго-Восток, 2010. Т. 1. 409 с.
2. Коваль А.Н., Мелковский В.И., Чехлатый Н.А. (2013). Основные направления повышения техногенной безопасности и энергетической эффективности стационарных установок на предприятиях угольной отрасли. Вестник МАНЭБ. №2. С. 23–28.
3. Белов С.А., Литвак В.В., Солод С.С. (2008). Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС. Томск: Изд-во НТЛ. 218 с.
4. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. (2003). Подшипники качения: справочник-каталог. Москва : Машиностроение. 576 с.
5. Павлищев В.Т. (2001). Підшипники кочення: основні параметри, конструкції опор, змащування, ущільнення та розрахунки ресурсу. Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка». 136 с.
6. Radionov A. (2018). Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans. *Magneto hydrodynamics*. Vol. 54, No. 1–2. P. 109–114.
7. Radionov A., Podoltsev A., Peczkis G. (2018). The specific features of high velocity magnetic fluid sealing complexes. *Open Engineering*. Vol. 8, Issue. 1. P. 539–544.

8. Радионов, А.В. (2011). Опыт эксплуатации магнитоожидкостных герметизаторов в промышленной энергетике. Гірничя електромеханіка та автоматика. Вип. 87. С. 134–138.
9. Радионов А.В., Виноградов А.Н. (2009). Комбинированные магнитоожидкостные герметизаторы – эффективная альтернатива бесконтактным уплотнениям подшипниковых узлов с жидкой смазкой. Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. Вип. 35 (76). С. 148–155.
10. Лихолетов, В.В. (2004). Системный анализ и проектирование систем управления. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. 160 с.
11. Белов П.Г. (2014). Управление рисками, системный анализ и моделирование. Москва : Издательство Юрайт. 728 с.
12. Вамболь С.А., Метелев А.В. (2013). Система экологической безопасности с многофазными дисперсными структурами. Технологии техносферной безопасности. №5(49). С. 1–7.
13. Шмандий В.М., Старовойда А.Л. (2002). Оценка техногенной опасности, формируемой промышленными предприятиями. Вісник КДПУ. Кременчук : КДПУ. Вип. 2(13), Розд. 2. С. 77–80.
14. Marhavilas P., Koulouriotis D., Gemeni V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. №24. P. 477–523.
15. Топоров, А. А. (2005). Новый подход к анализу техногенно опасных ситуаций на технологических производствах. Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія. Донецьк, Дон НТУ. 2005. Вип. 95. С. 126–130.
16. Калькис В., Кристиньш И., Роя Ж. (2005). Основные направления оценки рисков рабочей среды. Рига: SIA «Jelgavas tipografija». 74 с.
17. Толмачев, В.В., Федорова И.Н. (2012). Модель для определения значимости риска эксплуатации безшовных баллонов. Компетентность. №9–10 (100–101). С. 42–47.
18. Радионов А.В., Уваров Н.В. (2003). Анализ опыта работы магнитоожидкостных герметизаторов на СГПП «Объединение «Азот»». Химическая техника. 2003. №9. С. 26–28.

Стаття надійшла до редакції 04.11.2022 і прийнята до друку після рецензування 21.02.2023

REFERENCES

1. Manets, I. G., Gryadushchiy, B. A., & Levit, V. V. (2010). Technical maintenance and repair of mine shafts (Vol. 1). Donetsk: Yugo-Vostok [in Ukrainian].
2. Koval, A. N., Melkovsky, V. I., & Chekhlaty, N. A. (2013). The main directions of improving the technogenic safety and energy efficiency of stationary installations at the enterprises of the coal industry. *Bulletin of MANEB*, 2, 23–28 [in Russian].
3. Belov, S. A., Litvak, V. V., & Solod, S. S. (2008). Reliability of thermal power equipment of thermal power plants. Tomsk: NTL Publishing House [in Russian].
4. Chermensky, O. N., & Fedotov, N. N. (2003). Rolling bearings: directory-catalogue. Moscow: Mechanical engineering [in Russian].
5. Pavlishchev, V. T. (2001). Rolling bearings: basic parameters, support designs, lubrication, sealing and resource calculations. Lviv: National Lviv Polytechnic University [in Ukrainian].
6. Radionov, A. (2018). Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans. *Magneto hydrodynamics*, 54(1–2), 109–114.
7. Radionov, A., Podoltsev, A., & Peczkis, G. (2018). The specific features of high velocity magnetic fluid sealing complexes. *Open Engineering*, 8(1), 539–544.
8. Radionov, A. V. (2011). Experience in the operation of magnetic fluid seals in industrial power engineering. *Handling electromechanics and automation*, 87, 134–138 [in Russian].

9. Radionov, A. V., & Vinogradov, A. N. (2009). Combined magnetic fluid seals are an effective alternative to non-contact seals for liquid lubricated bearing arrangements. *Enrichment of minerals: sci.-tech. zb.*, 35(76), 148–155 [in Russian].
10. Likholetov, V. V. (2004). System analysis and design of control systems. Chelyabinsk: SUSU Publishing House [in Russian].
11. Belov, P. G. (2014). Risk management, system analysis and modeling. Moscow: Yurayt Publishing House [in Russian].
12. Vambol, S. A., & Metelev, A. V. (2013). Environmental safety system with multiphase dispersed structures. *Technologies of technosphere safety*, 5(49), 1–7 [in Russian].
13. Shmandiy, V. M., & Starovoyda, A. L. (2002). Assessment of technogenic danger generated by industrial enterprises. *Bulletin of KDPU*, 2(13), 77–80 [in Russian].
14. Marhavalas, P., Koulouriotis, D., & Gemeni, V. (2011). Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24, 477–523.
15. Toporov, A. A. (2005). A new approach to the analysis of technogenically dangerous situations in technological production. *Scientific practices of DonNTU. Series: Chemistry and chemical technology*, 95, 126–130 [in Russian].
16. Kalkis, V., Kristins, I., & Roja, J. (2005). The main directions of risk assessment of the working environment. Riga: SIA "Jelgavas tipografija" [in Russian].
17. Tolmachev, V. V., & Fedorova, I. N. (2012). Model for determining the significance of the risk of operation of seamless cylinders. *Competence*, 9-10(100-101), 42–47 [in Russian].
18. Radionov, A. V., & Uvarov, N. V. (2003). Analysis of the operating experience of magnetic-liquid sealers at the State Enterprise «Association «Azot»». *Chemical engineering*, 9, 26–28 [in Russian].

The article was received 04.11.2022 and was accepted after revision 21.02.2023

Левченко Лариса Олексіївна

доктор технічних наук, професор, професор кафедри цифрових технологій в енергетиці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Адреса робоча: проспект Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7227-9472> **e-mail:** larlevch@ukr.net

Радіонов Олександр Володимирович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри технічного сервісу Сумського національного аграрного університету

Адреса робоча: вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, Україна, 40021

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1112-5146> **e-mail:** ferrohydrodynamica@gmail.com

UDC 330.15:502.33

Marharyta Radomska, PhD, Ass. Prof., Associate Professor of the Department of Environmental Sciences

ORCID ID: 0000-0002-8096-0313 *e-mail*: m.m.radomskaya@gmail.com

Oksana Tykhenko, Doctor of Technical Sciences, Ass. Prof., Professor of the Department of Environmental Sciences

ORCID ID: 0000-0001-6459-6497 *e-mail*: okstih@ua.fm

Taras Nazarkov, MSc, PhD student of the Department of Environmental Sciences

ORCID ID: 0000-0002-9971-9423 *e-mail*: tnazarkov28@gmail.com

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

ECONOMIC VALUATION OF ECOSYSTEM SERVICES OF NATURAL PLANT ASSOCIATIONS OF THE PLUZHNE FORESTRY

***Abstract.** Ecosystem services are the basis of human development and existence. The resilience and balance of ecosystems is the key to the well-being and comfort of the human race, but their role and value of services provided is often underestimated. The aim of the given research is to conduct economic assessment of ecosystem services of natural plant associations of the selected area – Pluzhne forestry. Forests are known to provide the most diverse and comprehensive complex of ecosystem services and thus represent complicated object for assessment. The first step of the assessment included formulation of the list of ecosystem services to be included into the assessment procedure, giving priority to the most well-studied. The second step was aimed at determination of the unit prices for the chosen services. They were elaborated based on similar valuations, sufficiently supported by research data. The resulted cost of ecosystem services provided were compared to the assessments, performed for forest ecosystems in Ukraine and European countries, which is an element of novelty and originality. Although there are noticeable deviations in specific value of ecosystem services per unit of forest area, the general trend is consistent with European experience. The reasons of differences could be explained by the choice of approaches to unit prices evaluation and list of services included into assessment. The obtained data are important for raising awareness of local population and authorities about the importance of ecosystems functioning and need to invest resources in their support and protection. Research works of such kind are still rare in Ukrainian academic sphere despite their high importance for efficient management of environment quality and use. Thus, there is a clear need to develop this research field and the given research contributes theoretical and applied provisions for further assessments of such kind.*

***Keywords:** forest ecosystem; support of ecosystem services; unit service price; direct and indirect valuation.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.43-58>

Introduction

The concept of ecosystem services, as certain benefits received by a person from nature in its modern formulation, originated in 70s and went through some steps of reconsideration and terminological variations: nature services (Holdren, Ehrlich, 1974; Westman, 1977), environmental services (Wilson, Matthews, 1970); public

services of the global environment (Ehrlich et al., 1977) and nature functions (De Groot, 1992), and finally, ecosystem services (ecosystem services Ehrlich, Ehrlich, 1981). The final formulation, which is now widely accepted and used in the given research, was established in the Millennium Ecosystem Assessment (MEA) (2003, 2005) [1]. The central idea of this collective work under the auspices of the UN was to form clear understanding of nature role in our well-being. The reflection of this task is seen in multiple works on the identification and valuation of ecosystem services that followed the publication of this report.

According to the Millennium Ecosystem Assessment, ecosystem services can be divided into the following four classes:

1. Provisioning Services represent materials and products that people extract from nature, including food, drinking water, timber, etc.

2. Regulating Services are natural process, which make life possible for people: cleaning air and water, decomposition of wastes, prevention of erosion. All these processes work together to make environment safe, functional and resilient.

3. Cultural Services include attributes of nature, able to provide spiritual and cultural needs and development of people, recreation, research and education.

4. Supporting Services are fundamental process, which make ecosystems themselves able to exist and function. These are natural processes, such as photosynthesis, nutrient cycling, the creation of soils, the water cycle, etc. Without supporting services, provisional, regulating, and cultural services wouldn't exist.

The formulation of the fact, that nature makes key contribution to our well-being, the concept of ecosystem services implies the need to account these services in making decisions about nature use and expansion of human activity. Therefore, ecosystem services are gaining recognition in the national environmental policies and legislation of many countries, undergo spatial attribution and financial valuation with corresponding market development. The most important achievement in the field of ecosystem services research is the fact that they are not considered inexhaustible and free. Most countries gradually realize that ecosystem services must be paid for and at the same time must be preserved and developed.

Different ecosystems provide the necessary services to varying degrees and assortment. This must be accounted when planning economic and protection measures. Moreover, under current intensity of human intervention into natural ecosystems a compulsory element of any policy or project is the purposeful support of ecosystem services.

Conceptual framework: forest ecosystem services

Existing international guidance documents such as the UN Forest Instrument and the UN Strategic Plan for Forests provide a framework for national actions and international cooperation to sustainable management of forests. This framework is also the tool for integration of forest ecosystem services support into all aspects of national policymaking and planning. Countries must introduce legal incentives to acknowledge the role of ecosystem services in the overall national prosperity and environmental safety.

A range of comprehensive theoretical and practical works cover many of the aspects of forest ecosystems functioning and their role in the balance of biosphere and human civilization. In particular, Jenkins and Schaap state that the support of ecosystem services from forests is the way to achieve not only SDG 15, but generally progress to sustainability at regional and further to national level [2]. Through the analysis of the related publication it is possible to see that number of identified ecosystem services is growing and has already reached 100 [3]. The issues of forest

ecosystem services are most intensively studied in the USA, Australia, the United Kingdom, Canada, Germany and Spain [4]. The number of such research is growing since there is increasing interest to the assessment of ecosystem resilience and ability to sustain the welfare of population.

In Ukrainian research community the theme of ecosystem services is also gaining popularity. L. M. Arkhypova, B. V. Burkynskyi, V. F. Horiachuk, N. V. Dehtiar, E. V. Mishenin, A. A. Osaul, M. M. Prykhodko, I. P. Solovii, M. A. Fedorenko, M. A. Holubets have published relevant works, however, most of them deal with ecosystem services as components of natural resources potential of territories [5]. At the same time ecosystem services are gradually becoming a factor of importance in making decisions about land use practices [6] and in the support of environmental safety at urban areas [7]. As for the forests ecosystem services specifically, a limited number of works is available; the most cited are focused on recreational services [8], restoration of degraded forest for the provision of ecosystem services [9], rural communities' dependence on provisioning forest ecosystem services [10] and source of financial support for sustainable transformations in the region [11].

Mechanisms of forest services provision represent a broad field of research, which grants new opportunities for provision of many human needs and builds up understanding of the nature's functioning regularities [12]. The core of ecosystem services provision by forests is biodiversity of forest communities [13, 14], which is currently decreasing due to practice of substitution reforestation with single species plantations [15]. Moreover, even the commercial plantations of mixed composition have higher potential for ecosystem services provision compared to respective plant monocultures [16]. The other parameters like stand-level forest attributes (including structure, composition, vertical and horizontal stand heterogeneity) and environmental factors (location, soil depth, pH and slope) of the area are also of great importance [17]. Thus, the most favorable preconditions for the supply of ecosystem services exist in natural forest associations or at least well managed mixed plantations [18]. This provides additional solid reason for the preservation of old-stand forests over any form of reforestation. However, this must be clear not only to scientists, but also to the managers and local communities and the best way to deliver such information is through the monetization of the services provided.

Measuring ecosystem services is currently developing in three major directions – monetary valuation, modeling and mapping, with monetary valuation most popular initially and non-monetary valuation (modeling and mapping) has started to gain popularity in recent years [19]. Mapping is able to present spatial distribution of the services provided, but often lacks the demonstration of the interactions between formation, delivery and consumption [20]. Modeling of ecosystem services uses mechanistic, probabilistic, statistical, GIS and conceptual models, and the mechanic approaches and GIS-based models were the most frequently used. Despite the well developed background, modeling is not the top choice for ecosystem services analysis due to the need in extensive data and use of non-specialized software, which reduces quality of the data received [21]. Finally, valuation of ecosystem services using economic tools is the most widely implemented method generally and for those from forests in particular [22].

The fundamental principles of ecosystem services valuation were set by the research compiled by The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB) global initiative. It is an international initiative led by Pavan Sukhdev from 2007 to 2011 to bring into the light the real value of nature functioning [23]. Still the question

of economic assessment of ecosystem services has been raised before that and the first publications on the topic are dated with 1995. Since then over a thousand works were published. A meta-analysis of the papers dealing with valuation of ecosystem services over the period from 1995 to 1997 revealed that most of them (80% of studies) considered multiple functions of forests, but the biggest attention was paid to the regulating services [24]. The same analysis has demonstrated that the study of ecosystem services is more active and covers a variety of forests by types and management status, while forests in mountain regions in low to lower-middle income countries were considered in only few works. Some reasons for this disparity in ES research under four themes are discussed, in connection with the global climate change, biodiversity policies, and national, bilateral and multilateral initiatives.

In Ukraine evaluation of forest ecosystem services is also studied, but mostly in the field of theoretical foundations of the assessments [25], generating funds for implementation of sustainable practices in branches of economy [26] and changing composition of plantations towards greater diversity [27]. However, case studies with real valuation data are very limited, but involve different types of forests communities: shelterbelts [28], protected areas [29, 30] and timberlands and forestries [31]. Under such conditions, there is a need to expand the application of forest ecosystem services valuation to enable comparative analysis of forest communities, attract investments in their protection and conservation, as well as aggregate new theoretical data about the functioning of forest ecosystems and develop practical recommendations for the strengthening of services provision. So, **the aim of the research** was to value ecosystem services of a forest and compare the results obtained with other case studies available for Ukraine. The sample forest ecosystem for investigation was the Pluzhne forestry.

Methods and materials

Valuation methodology

Forests are known to be suppliers of the most diverse ecosystem services among all types of ecosystems [32, 33], but these depends on their attributes [14]. Quite often the value of forest ecosystems is limited to only provisional services [34] and underrates cultural and supporting services [17]. However, it is necessary to account all the services we are aware of by the date of calculation. At the same time, valuation of service is possible if there is a market for it or the mechanism of its provision produces some measurable and sellable outcomes. In all other cases it is necessary to apply some indirect approaches to evaluate the obtained benefits.

Valuation of ecosystem services is still a complicated task, due to multiple issues and the nature of the most of ecosystem services:

- the larger the scale of the study, the more difficult it is to determine the economic value of forest ecosystem services;
- the results of the assessment of the economic value of forest ecosystem services are valid only for one specific area and cannot be extended to others;
- the value of the economic value of forest ecosystem services may change over time, so it is necessary to periodically review and evaluate them;
- the choice of method affects the resulted sums considerably;
- the volume/amount of the service provided can be measured differently or is accepted based on some evidence, but not direct measurements;
- expert opinion is often a part of all steps of the research and computation procedure, which inevitable reduced the reliability of the obtained results.

Accounting all the mentioned limitations of the forest ecosystem services assessment the valuation of ecosystem services, presented in the given paper was based on a combination of direct and indirect methods, depending on the type of service (Table 1) and prices per unit of services were derived from few sources:

- official financial reports of the forestry (OFR);
- recommendations of the international expert groups;
- data from open access publications;
- personal elaborations, based on the available information about the essence of ecosystem service.

Table 1. Unit prices for ecosystem services

Name of service	Subunit	Units	Price, USD/unit	Source of price and comments
Provisional services				
Wood	<i>Round timber</i>	USD/m ³	95	OFR for 2021
	<i>Firewood</i>	USD/m ³	55	OFR for 2021
Non-timber products	<i>Berries</i>	USD/kg;	3	Average market price
	<i>Mushrooms</i>	USD/kg (dry mass)	20	Average market price
	<i>Hazelnut</i>	USD/kg	4	Average market price
	<i>Resin</i>	USD/kg	3.75	Average market price
Game	<i>Roe deer</i>	USD/ind.	750	Average price in the hunting season 2021–22 based on the analysis of the game reserves in the same oblast
	<i>Boar</i>	USD/ind.	250	
	<i>Fox</i>	USD/ind.	8.75	
	<i>Hare</i>	USD/ind.	6.25	
Grass	<i>Hay</i>	USD/t	45	OFR for 2021
	<i>Pasturing</i>	USD/ind.	1.5	Average price established in the oblast based on open data
Medicinal plant	<i>Rosehip</i>	USD/kg	10	Average market price
	<i>Leaves of wild strawberry and Blackberry</i>	USD/kg	8.75	Average market price
	<i>Linden</i>	USD/kg	12.5	Average market price
Regulatory service				
Regulation of climate = carbon sequestration	<i>Carbon storage in soil</i>	USD/t	40	[2], [35], [36] Accepted accounting the growing price under the pressure of climate change threats
	<i>Carbon used by phytomass</i>	USD/t	40	
Soil stability	<i>Erosion prevention</i>	USD/ha	96	[37]
Soil formation	<i>Soil profile development</i>	USD/ha	10	[37]
Flood prevention	<i>Water retention</i>	USD/ha	820	Elaborated from [37] and [38], accounting low flood risk of study area

Name of service	Subunit	Units	Price, USD/unit	Source of price and comments
Air quality regulation	<i>Dust retention</i>	USD/ha	416	[37]
	<i>Oxygen generation</i>	USD/ha	400	Oxygen generated from ha was taken from [39] and combined with market price of oxygen
	<i>Cooling effect</i>	USD/ha	20.75	[37]
Clean water	<i>Water purification</i>	USD/ha	96	Elaborated from [40]
Supporting services				
Nutrient cycling and provision	<i>Mobilization of atmospheric nitrogen</i>	USD/ha	146	[37]
Adsorption of waste and toxins	<i>Mineralization and decomposition of dead matter</i>	USD/kg	87	[37]
Biodiversity	<i>Genetic resources</i>	USD/ha	19	Mean values for contingent assessment at the study area and results from [41–42]
Cultural services				
Aesthetic value	<i>Scenery</i>	USD/ha	3.5	Data obtained by contingent assessment
Recreation	<i>Non-organized visitors</i>	USD/person	4	
Ecotourism	<i>Organized tourists</i>	USD/person	5	Data provided by the staff of the forestry, based on the price for excursion.
Educational	<i>Venue for education</i>	USD/hour	4	Standard payment for training

Contingent assessment of cultural ecosystem services was conducted according to the recommendations of [43] and involved survey among the population, local to the area. The survey involved 62 respondents, each of whom is a native of the area and has lived there for more than 10 years. The age of the respondents is 18–75 years. The survey was conducted through a personal meeting with each respondent, which included a short 3-minute information introduction. The respondents were asked to suggest how much they are ready to pay for keeping the forest view intact and how much they would pay for the access to the forest for recreation if it stopped to be open access.

Site description

The Pluzhne forestry is a part of the state enterprise "Izyaslav forest enterprise" and is located in its northern part at the territory of Shepetivka administrative district of Khmelnytskyi oblast. The area of forestry location belongs to the zone of western forests of the Male (Small) Polissya region. The forest area is 7490 hectares. The climate is temperate continental. The average annual temperature is +7 and the average annual rainfall is 510–580 millimeters. The duration of the growing season is 202 days from April 15 to October 25. The average depth of soil freezing is 73 cm,

the maximum – 114 cm. A characteristic feature of the Pluzhne forestry is intensive erosive footprint – the area here is sometimes hilly with gentle slopes. The area is characterized by heavily eroded gray forest and podzolic soils.

The territory includes only forests. There are no water bodies on the territory. The composition of the plant community is dominated by coniferous trees, including Scots pine, Weymouth pine, European spruce and European larch. Overall, the main tree species on the territory of the forestry are pine (59%), oak (20%), birch (8%), alder (7%), spruce and other species (1–2%). The undergrowth mainly consists of buckthorn, mountain ash, hornbeam, hazel, etc.

The annual growth of wood in the tract is 6.7 m³/ha per year. Recently, much attention has been paid to European and Japanese larch wood species, which are fast-growing and technically valuable wood.

Typical representatives of the fauna: hare, roe deer, wild boar, fox. Moose were spotted a few years ago, but have not been seen in these areas recently. There is also Pluzhne ornithological reserve of local importance in the western part of the Pluzhne forestry. The area of the reserve is 1.4 hectares. It was created in 1992 in order to preserve the natural hydrophytic complex of the wetland forest with a predominance of boreal (coniferous) forest-swamp, swamp and forest plant species, where blue pigeons and black storks (listed in the Red Book of Ukraine and Annex II of the Berne Convention) often settle. Among the species of plants listed in the Red Book, the reserve grows prickly plantain, Devella sedge, large astrantia, and common thicket. Accounting the presence of rare species the position “biodiversity” was added to the list of ecosystem services for the following assessment.

Economic and social importance of the forestry for local community is very high. Large number of local people works directly in forestry, so they assess forest resources as an opportunity for formal employment. Simultaneously, most of population use forest resources to meet their own needs: harvest firewood, building material, medicinal plants, mushrooms and berries. The forest itself plays a recreational role, but its recreational potential is not fully developed, since there is only one recreation area at the forestry, called "Pine Forest" and ecotourism and other forms of cultural services are just single cases. However, the forestry conducts active education program for school children and that was also accounted in the ecosystem services valuation.

The anthropogenic pressure on the ecosystem is quite noticeable, since mass felling of the tree stand takes place on a constant base, even though it is done according to all requirements. However, this does not negate the fact that this type of economic activity inflicts anthropogenic pressure. As for illegal logging, it is not common in this area. A more serious factor is illegal hunting of animals in terms of seasonal terms, volumes and methods used. The uncontrolled harvesting of medicinal plants, berries, mushrooms by local population is also the case for the given area. However, according to the opinion of the forestry staff and personal survey results during the field trips, the condition of the forest ecosystem at the site is normal, since it doesn't demonstrate degradation of the physical environment quality and plant community depression.

Results and discussions

Using the defined unit prices and specific parameters of the Pluzhne forestry, we have evaluated ecosystem services of this site (Table 2).

Table 2. Calculated costs of ecosystem services

Name of service	Subunit	Price, USD/unit	Number/Units	Cost, USD
Provisional services total = 540116.656 USD				
Wood	<i>Round timber</i>	95	50180 ¹	4767100
	<i>Firewood</i>	55	9792 ²	538560
Non-timber products	<i>Berries</i>	3	684 ¹	2052
	<i>Mushrooms</i>	20	1764 ¹	35280
	<i>Hazelnut</i>	4	476 ¹	1904
	<i>Resin</i>	3.75	57.175 ¹	214.41
Game	<i>Roe deer</i>	750	25 ³	18750
	<i>Boar</i>	250	10 ³	2500
	<i>Fox</i>	8.75	32 ³	280
	<i>Hare</i>	6.25	63 ³	393.75
Grass	<i>Hay</i>	45	450 ¹	20250
	<i>Pasturing</i>	1.5	175 ¹	262.5
Medicinal plant	<i>Rosehip</i>	10	7 ¹	70
	<i>Leaves of wild strawberry and blackberry</i>	8.75	400 ¹	3500
	<i>Linden</i>	12.5	800 ¹	10000
Regulatory services total = 20932677.5 USD				
Regulation of climate = carbon sequestration	<i>Carbon storage in soil</i>	40	149800 ⁴	5992000
	<i>Carbon storage in phytomass</i>	40	25466 ⁴	1018640
Soil stability	<i>Erosion prevention</i>	96	7490 ⁵	719040
Soil formation	<i>Soil profile development</i>	10	7490 ⁵	74900
Flood prevention	<i>Water retention</i>	820	7490 ⁵	6141800
Air quality regulation	<i>Dust retention</i>	416	7490 ⁵	3115840
	<i>Oxygen generation</i>	400	7490 ⁵	2996000
	<i>Cooling effect</i>	20.75	7490 ⁵	155417.5
Clean water	<i>Water purification</i>	96	7490 ⁵	719040
Supporting services total = 1887480 USD				
Nutrient cycling and provision	<i>Mobilization of atmospheric nitrogen</i>	146	7490 ⁵	1093540
Adsorption of waste and toxins	<i>Mineralization and decomposition of dead matter</i>	87	7490 ⁵	651630
Biodiversity	<i>Genetic resources</i>	19	7490 ⁵	142310

Name of service	Subunit	Price, USD/unit	Number/Units	Cost, USD
Cultural services total = 50521 USD				
Aesthetic value	<i>Scenery</i>	3.5	7490 ⁵	26215
Recreation	<i>Non-organized visitors</i>	4	3700 ⁶	14800
Ecotourism	<i>Organized tourists</i>	5	1870 ⁷	9350
Educational	<i>Venue for education</i>	4	39 ⁸	156

Comments:

¹Data represent maximal possible harvest based on the type of forest and percentage of productive area (based on the staff assessment), as well as records of the forestry for the previous years.

²Data about volumes of goods and services are derived from the official financial reports of the forestry.

³Number of each game type allowed for hunting at the territory of the forestry from official call for hunting season 2021–2022.

⁴Average annual sequestration rate of carbon by phytomass and soil was derived from [44] and [45] respectively and multiplied by the area of the forested territory.

⁵Service is provided by the whole area of the forest.

⁶Recreation is only possible at the territory, limited by the economic activity area and preserved area.

⁷Areas, possessing ecotourism potential represent approximately 25% of the forestry according to the staff.

⁸The area of 39 ha is allocated for the educational activity according to the official information from the staff.

So, for the given forestry provides ecosystem services by 28271795.16 USD annually, based on the above presented methodology and approximation. The most financially valuable are regulatory services, accounting limitations of our knowledge and market for most of them, this figure might be even underestimated. The supporting services are obviously underestimated too, since only three of them, for which some economic valuations are available in the open source publications, are accounted. Provisional services are the most accurately calculated, because they are provided by market prices and data on quantitative characteristics from official reports of the forestry. Direct cultural services occupy the last place due to their underdevelopment and non-prevalence in this area.

The most important issue of the obtained valuation is the choice of unit prices. They are partially derived from open access works for forests of the similar type or at least the same natural zone. Moreover, some of them are referred to different periods and are the subject of the USD purchasing power changes. However, the cost of the service might be modified by other environmental, economic and political issues, which doesn't follow financial trends. This is especially seen in the case of carbon sequestration, which will probably increase its value under the pressure of environmental problems induced and international responsibilities on climate change mitigation taken by the countries. This possibility is already under consideration in the recent research and was accounted in the unit price definition. But the factors of anthropogenic pressure and climate change and other impacts may change over time, modifying the quality and quantity of the delivered services.

Another possible limitation of the valuation covers the indirect valuation of cultural prices using contingent assessment. The results of such studies are highly

dependent on the educational component, public awareness and environmental policy of the country on the whole. They are also affected by the demographic characteristics of respondents and focus of the assessment, for which survey is conducted, which is widely discussed in literature [46].

In general, all the data obtained are relevant only for this area and for a short period of time. There are not many similar research results for the forests of Ukraine, but their comparison (Table 3) shows that there is a immense difference in the results obtained by assessments due to lack of single standard methodology. However, this is also the case for the similar assessments across Europe, demonstrated in recent meta-analysis [47]. Of the total 60 papers analyzed, the mean value of temperate broadleaf and mixed forests was set at the level of 1204 USD/ha per year, which was much larger compared to the corresponding figure for Mediterranean and conifer forest biomes. The valuations were done using mostly cost-based and price-based methods, when over 80% of provisioning services were valued by direct price-based approaches and cultural services were calculated using indirect (survey) methods, as in the given study. The valuation obtained is based on a limited number of services, on average 8 group of services, including timber and non-timber provision, air quality, climate regulation, habitat maintenance, liquid flows, and leisure.

In the given research the obtained value is higher than those in European publications due to higher number of services accounted and different approach to the calculation of climate regulation: it was done based on the amount of carbon sequestered in phytomass and soil, rather than cost-based approach widely used in similar publications.

Table 3. Comparative analysis of the ecosystem services valuation for selected forests

Name of forest	State enterprise "Pluzhne forestry"	State enterprise "Vovchanske forestry"	National natural park "Holosiivsky"
Location	Shepetivka administrative district of Khmelnytskyi oblast	Vovchansk, Kharkiv and Chuhuiv administrative district of Kharkiv oblast	Kyiv city, Kyiv oblast
Area, ha	7490	27930	10988
Composition of phytocenosis	Mixed forest (pine, oak, birch, alder)	Mixed forest (oak, pine, aspen, maple, birch)	Deciduous forest (hornbeam, oak, maple, linden)
Services accounted	Provisioning, regulatory, supporting and cultural	Provisioning, regulatory	Provisioning, regulatory, supporting and cultural
Methods of valuation	Direct, indirect	Direct	Direct
Total value of services provided, USD/ha*	3774.6	4894.8	249297.9
References	Current research	[28]	[29, 48, 49]

*In order to enable a comparison between economic values, they were standardized to 2021 international US\$ dollars per hectare per year.

The provision of ecosystem services by the natural environment has always been free of charge. From the point of view of financial payment, few people understand that all natural resources, even if they cannot be assessed as a market commodity, must be paid for. However, the information about the real value of the forests people leave by is important to raise their awareness about the dependence of their well-being on forests. This will contribute to more balanced personal use of forest resources and more attentive public control over the management of forests by authorities. It will also substantiate the need to invest efforts and finance in the actions aimed at the support of ecosystem services provision. In particular, at the local level there is a need to improve environmental awareness of local residents and authorities and develop ecological tourism on the basis of the forestry. At the level of forest enterprises and protected areas the study and valuation of ecosystem services provided should be initiated and supported. For this, the national regulatory framework must be created, including the following measures:

- formulate the role of ecosystem services as a separate commodity/value in legal documents;
- update methodological approaches to the assessment of ecosystem services;
- develop ecosystem services inventory for protected areas and forest enterprises;
- develop and implement action plans at protected areas and forest enterprises directly aimed at the support of ecosystem services.
- develop payment mechanism for these services;
- introduce the closed cycle of funds circulation in the environmental protection system – to self-support nature at the cost of funds received from its own resources.

These measures will develop more sensible and frugal use of natural resources and land use decisions. It will in turn contribute to the resilience of forest ecosystems and sustainability of local communities.

Conclusions

1. Stability and well-being in human existence and ecosystems are interdependent and inseparable. Natural complexes create conditions for humans' existence through a complex of functional processes and interactions, known as ecosystem services.

2. Adequate assessment is needed to preserve and maintain these processes, and currently there is a wide range of methods applicable for the valuation of ecosystem services, including direct and indirect approaches. In most cases a combination of methods should be used to obtain accurate results. And the exact methods applied depend on the type of service. The main valuation methods used in the work are direct and indirect market valuation, contingent assessment.

3. Forests are the most diverse and complex natural ecosystems, and as such they provide the widest range of services that need to be clearly identified and valued in order to be appreciated and protected.

4. The object under investigation was Pluzhne forestry, a part of the state enterprise "Iziaslav forestry". This area is characterized by a fairly high level of biodiversity and natural value, despite the anthropogenic impact. The territory has no water bodies, but is covered by mixed forest, dominated by pine and oak by 90%. It is actively logged according to the regulatory limits and also provides a wide range of non-timber products.

5. The list of ecosystem services, provided by the forestry, was formulated and evaluated using direct and indirect marketing valuation. The results demonstrated that the value of services far exceeds the direct incomes from traditional timber and non-timber products supply to the market. The regulatory services turned to be the most valuable, while cultural ones are the least expensive due to low development of recreational potential of such ecosystems. The supporting services were valued partially – only those, for which some approximations of unit prices are available in the literature. The resulted ecosystem value of 1 ha of the Pluzhne forestry was compared to similar research works of Ukraine and EU showing considerable deviations due to lack of consistent methodology. However, the order of numbers in the value was close to average European assessments.

6. The results of this work are the basis for further study of the forest ecosystem services in our country, both at the local and national level. The recommendations on the support of ecosystem services through the creation of legal framework were given together with the need to improve population and authorities' awareness about the ecosystem services to promote reasonable use and protection of forests and their resources.

REFERENCES

1. Millennium Ecosystem Assessment (MEA) (2005). *Ecosystems and human well-being*. Island Press, Washington.
2. Jenkins, M., & Schaapm B. (2018). *Forest Ecosystem Services: Background Analytical Study*. Background study prepared for the thirteenth session of the United Nations Forum on Forests.
3. Martín-López, B., Oteros-Rozas, E., Cohen-Shacham, E., Santos-Martín, F., Nieto-Romero, M., Carvalho-Santos, C., ... & Cramer, W. (2016). Ecosystem services supplied by Mediterranean Basin ecosystems. In *Routledge Handbook of Ecosystem Services* (pp. 405–414). Routledge.
4. Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., López-Serrano, M. J., & Velasco-Muñoz, J. F. (2018). Forest ecosystem services: An analysis of worldwide research. *Forests*, 9(8), 453. <https://doi.org/10.3390/f9080453>.
5. Prykhodko, M., Arkhypova, L., Horal, L., & Kozhushko, S. (2020). Concept of ecosystem services and its implementation in Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29, 387–397. <https://doi.org/10.15421/112034>.
6. Havrylenko, O., & Tsyhanok, E. (2018). Degradation of ecosystem services of protected areas in urbanized zones. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv*, 4(73), 10–14. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2019.73.2>.
7. Soloviy, I. P., Nijnik, M.S., Deyneka, A.M., & Melnykovich, M.P. (2017). Reimagining forest policy, institutions and instruments through concepts of ecosystem services and social innovations: Ukraine in the focus. *Scientific bulletin of UNFU*, 27(8), 82–87. <https://doi.org/10.15421/40270812>.
8. Holubchak, O., Korol, S., Melnychuk, I., & Prykhodko, M. (2019, October). Optimization of forest ecosystem recreational services formation in conditions of decentralization in Ukraine. In *2019 7th International Conference on Modeling, Development and Strategic Management of Economic System (MDSMES 2019)* (pp. 227–231). Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/mdsmes-19.2019.43>.
9. Drebot, O., Shvydenko, I., Raichuk, L., Yaremko, O., Symochko, L., Vysochanska, M., ... & Kuchma, M. (2022). Rehabilitation of forest ecosystems taking into account modern international ecological trends in the context of the European green deal. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*, 12(2), 575–584. <https://doi.org/10.31407/ijeec12.2>.

10. Zhyla, T., Soloviy, I., Zhyla, A., & Volosyanchuk, R. (2018). Mountain communities' households dependency on provisioning forest ecosystem services: the case of Ukrainian Carpathians. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 11 (2), 63–80.
11. Dankevych, S. (2021). Development potential of forest ecosystem services in Ukraine as a financial tool to ensure balanced land use. *Agrosvit*, 11, 45–56. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2021.11.45>.
12. Mori, A. S., Lertzman, K. P., & Gustafsson, L. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 12–27. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>.
13. Isbell, F., Calcagno, V., Hector, A. *et al.* (2011). High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature*, 477, 199–202. <https://doi.org/10.1038/nature10282>.
14. Gamfeldt, L., Snäll, T., Bagchi, R., Jonsson, M., Gustafsson, L., Kjellander, P., ... & Bengtsson, J. (2013). Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature communications*, 4(1), 1340. <https://doi.org/10.1038/ncomms2328>.
15. Brockerhoff, E. G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D. I., Gardiner, B., González-Olabarria, J. R., ... & Jactel, H. (2017). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 26(13), 3005–3035. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2>.
16. Jonsson, M., Bengtsson, J., Gamfeldt, L., Moen, J., & Snäll, T. (2019). Levels of forest ecosystem services depend on specific mixtures of commercial tree species. *Nature plants*, 5(2), 141–147. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0346-z>.
17. Felipe-Lucia, M. R., Soliveres, S., Penone, C., Manning, P., van der Plas, F., Boch, S., ... & Allan, E. (2018). Multiple forest attributes underpin the supply of multiple ecosystem services. *Nature communications*, 9(1), 4839. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07082-4>.
18. Le Provost, G., Schenk, N. V., Penone, C., Thiele, J., Westphal, C., Allan, E., ... & Manning, P. (2022). The supply of multiple ecosystem services requires biodiversity across spatial scales. *Nature ecology & evolution*, 7, 236–249. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01918-5>.
19. Ajrrough, S., Maanan, M., Alaoui, H. M., Rhinane, H., & El Arabi, E. H. (2019). Mapping Forest Ecosystem Services: A Review. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 17–22. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W19-17-2019>.
20. García-Nieto, A. P., García-Llorente, M., Iniesta-Arandia, I., & Martín-López, B. (2013). Mapping forest ecosystem services: from providing units to beneficiaries. *Ecosystem Services*, 4, 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.03.003>.
21. Olosutean, H. (2015). Methods for Modeling Ecosystem Services: A Review. *Management of Sustainable Development*, 7(1), 5–12. <https://doi.org/10.1515/msd-2015-0014>.
22. Alix-Garcia, J., & Wolff, H. (2014). Payment for ecosystem services from forests. *Annual Review of Resource Economics*, 6(1), 361–380. Vol. 6:361–380 <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100913-012524>.
23. Bishop, J., Brink, P. T., Gundimeda, H., Kumar, P., Nesshöver, C., Schröter-Schlaack, C., ... & Wittmer, H. (2010). The economics of ecosystems and biodiversity: mainstreaming the economics of nature: a synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB. (No. 333.95 E19). UNEP, Ginebra (Suiza).
24. Acharya, R. P., Maraseni, T., & Cockfield, G. (2019). Global trend of forest ecosystem services valuation—An analysis of publications. *Ecosystem Services*, 39, 100979. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100979>.
25. Shashula, L.O., Sakal, O.V., & Tretiak, N.A. (2019). Payment for Ecosystem Services in Ukraine: Priority Direction of Revitalization. *Mechanism of Economic Regulation*, 2, 6–16. <https://doi.org/10.21272/mer.2019.84.01>.
26. Dankevych, S. (2021). Development potential of forest ecosystem services in Ukraine as a financial tool to ensure balanced land use. *Agrosvit*, 11, 45–56. <https://doi.org/10.32702/2306&6792.2021.11.45>.

27. Zahvoyska, L. (2014). Theoretical approaches to determining economic value of forest ecosystems services: benefits of pure stands transformation into mixed stands. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 201–209.
28. Vysotska, N., Kalashnikov, A., Sydorenko, S., & Yurchenko, V. (2021). Ecosystem services of shelterbelts as the basis of compensatory mechanisms of their creation and maintenance. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 22, 199–208. <https://doi.org/10.15421/412118>.
29. Shyshchenko, P. H., Havrylenko O. P., & Tsyhanok, Ye. Yu. (2019). Ecosystem value of Holosiyivskiy forest as an urban protected area: causes and consequences of degradation. *Ukrainian geographical journal*, 4(108), 40–49. (<https://doi.org/10.15407/ugz2019.04.040>).
30. Andreieva, V., Voitiuk, V., Kychyliuk, Shepeliuk, M., Hetmanchuk, A., & Derkach, V. (2021). Economic estimation of Cheremsky swamp on the basis of ecosystem services. *Notes in Current Biology*, 1(1), 15–24. <https://doi.org/10.29038/NCBio.21.1.15-24>.
31. Anisimova, S., & Okovyta, Y. (2022). Ecological and economic assessment of forest ecosystem services on the example of SE "Vovchanske forestry". *Bulletin of Kharkiv National Automobile And Highway University*, 97, 114–121. <https://doi.org/0.30977/BUL.2219-5548.2022.97.0.114>.
32. Almeida, I., Rösch, C., & Saha, S. (2018). Comparison of Ecosystem Services from Mixed and Monospecific Forests in Southwest Germany: A Survey on Public Perception. *Forests*, 9(10), 627. <https://doi.org/10.3390/f9100627>.
33. Bengtsson, J., Bullock, J. M., Egoh, B., Everson, C., Everson, T., O'Connor, T., O'Farrell, P. J., Smith, H. G., & Lindborg, R. (2019). Grasslands – more important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere*, 10(2), e02582. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2582>.
34. McGrath, M. J., Luysaert, S., Meyfroidt, P., Kaplan, J. O., Bürgi, M., Chen, Y., Erb, K., Gimmi, U., McInerney, D., Naudts, K., Otto, J., Pasztor, F., Ryder, J., Schelhaas, M.-J., & Valade, A. (2015). Reconstructing European forest management from 1600 to 2010. *Biogeosciences*, 12, 4291–4316. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4291-2015>.
35. Richards, K. R., & Stokes, C. A. (2004). Review of Forest Carbon Sequestration Cost Studies: A Dozen Years of Research. *Climatic Change*, 63, 1–48. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000018503.10080.89>.
36. Fuller, M., & Dwivedi, P. (2021) The Cost of Carbon Stored on Afforested Lands in the Southern United States. *Trees, Forests and People*, 6, 100129. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100129>.
37. Krieger, D. J. (2001). The economic values of forest ecosystem services: a review. The Wilderness Society. Washington, DC, USA.
38. Barth, N.-C., & Döll, P. (2016). Assessing the ecosystem service flood protection of a riparian forest by applying a cascade approach. *Ecosystem Services*, 21(A), 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.07.012>.
39. Monson, R. K. (2014). Ecology of Temperate Forests. In *Ecology and the Environment, the Plant Sciences* (pp. 273–296). Springer: New York, NY, USA.
40. Vesna, V., Maes, J., Petersen, J.E., La Notte, A., Vallecillo, S., Aizpurua, N., Ivits, E., Teller, A. Accounting for ecosystems and their services in the European Union (INCA). (2021). Final report from phase II of the INCA project aiming to develop a pilot for an integrated system of ecosystem accounts for the EU. Statistical report. Publications office of the European Union, Luxembourg.
41. Czajkowski, M., Buszko-Briggs, M., & Hanley, N. (2009). Valuing changes in forest biodiversity. *Ecological Economics*, 68(12), 2910–2917. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.06.016>.
42. Garcia, S., Harou, P., Montagné, C., & Stenger, A. (2011). Valuing forest biodiversity through a national survey in France: a dichotomous choice contingent valuation. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 7(2), 84–97. <https://doi.org/10.1080/21513732.2011.628338>.

43. Hirons, M., Combetti, C., & Dunford, R. (2016). Valuing cultural ecosystem services. *Annual Review of Environment and Resources*, 41(1), 545–574. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085831>.
44. Myers, N., & Goreau, T. J. (1991). Tropical forests and the greenhouse effect: a management response. *Climatic Change*, 19(1-2), 215–225. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3608-4_22.
45. Paustian, K., Larson, E., Kent, J., Marx, E., & Swan, A. (2019). Soil C sequestration as a biological negative emission strategy. *Frontiers in Climate*, 1, 8. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>.
46. Barrio, M., & Loureiro, M. L. (2010). A meta-analysis of contingent valuation forest studies. *Ecological Economics*, 69(5), 1023–1030. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.016>.
47. Grammatikopoulou, I., & Vačkářová, D. (2021). The value of forest ecosystem services: A meta-analysis at the European scale and application to national ecosystem accounting. *Ecosystem Services*, 48, 101262. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101262>.
48. National Natural Park “Holosiivsky”. Kyiv, Environment. People. Law, 2018.
49. Shyshchenko, P. H., Havrylenko, O. P., & Tsyhanok, Y. Y. (2019). Ecosystem value of holosiyivskyi forest as an urban protected area: Causes and consequences of degradation. *Ukrainian Geographical Journal*, 4(108), 40–49. <https://doi.org/10.15407/ugz2019.04.040>.

The article was received 17.11.2022 and was accepted after revision 14.02.2023

М.М. Радомська, О.М. Тихенко, Т.І. Назарков
ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ ПРИРОДНИХ
РОСЛИННИХ АСОЦІАЦІЙ ПЛУЖНЕНСЬКОГО ЛІСГОСПУ

Анотація. Екосистемні послуги є основою безпечного середовища існування людини та забезпечення потреб суспільства. Разом з цим роль і цінність послуг, що надаються природними екосистемами, часто недооцінюють. Метою даного дослідження є проведення економічної оцінки екосистемних послуг природних рослинних угруповань обраної території – Плуженського лісництва. Відомо, що ліси надають найрізноманітніший комплекс екосистемних послуг і тому є складним об'єктом оцінки. На першому етапі дослідження було сформульовано перелік екосистемних послуг лісів, що підлягали наступній оцінці, віддаючи пріоритет найбільш добре вивченим. Другий етап був спрямований на визначення одиничних цін на обрані послуги. Вони були розроблені на основі аналогічних оцінок, достатньо підтверджених даними досліджень. Отриману вартість наданих екосистемних послуг порівнювали з результатами інших авторів, виконаними для лісових екосистем України та країн Європи, що є елементом новизни та оригінальності роботи. Хоча є помітні відхилення в питомій вартості екосистемних послуг на одиницю лісової площі, загальна тенденція узгоджується з європейським досвідом. Причини відмінностей можна пояснити вибором підходів до оцінки одиничних цін та переліку послуг, що були враховані в оцінці. Отримані дані є важливими для підвищення обізнаності місцевого населення та органів влади про важливість функціонування екосистем та необхідність вкладення ресурсів у їх підтримку та захист. Дослідження такого роду все ще є рідкістю в українському науковому середовищі, незважаючи на їх велике значення для ефективного управління якістю та використанням навколишнього середовища. Таким чином, існує очевидна потреба розвивати цю галузь досліджень і дана робота доповнює теоретичні та прикладні положення для подальших оцінок такого роду.

Ключові слова: лісова екосистема; підтримка екосистемних послуг; ціна одиниці послуги; пряма та непряма оцінка.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2022 і прийнята до друку після рецензування 14.02.2023

Радомська Маргарита Мирославівна

к.т.н., доц., доцент кафедри екології Національного авіаційного університету

Адреса робоча: пр. Л. Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

ORCID ID: 0000-0002-8096-0313 **e-mail:** m.m.radomska@gmail.com

Тихенко Оксана Миколаївна

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

Адреса робоча: пр. Л. Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

ORCID ID: 0000-0001-6459-6497 **e-mail:** okstih@ua.fm

Назарков Тарас Ігорович

магістр, аспірант кафедри екології Національного авіаційного університету

Адреса робоча: пр. Л. Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

ORCID ID: 0000-0002-9971-9423 **e-mail:** tnazarkov28@gmail.com

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

УДК 538.61.331.45

Tetiana Tkachenko¹, D.S., Professor

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 **e-mail:** tkachenko.tm@knuba.edu.ua

Oksana Ilchuk², PhD, Senior Lecturer

ORCID ID: 0000-0001-6352-5320 **e-mail:** oksanailchukpki@gmail.com

Olena Zemlyanska², Senior Lecturer

ORCID ID: 0000-0002-9608-3677 **e-mail:** olenazemlyanska@gmail.com

¹Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

PRINCIPLES OF DESIGNING ELECTROMAGNETIC SCREENS OF THE RESONANT TYPE BASED ON LIQUID PROTECTIVE COMPOSITIONS

Abstract. *The work explores the possibilities of creating resonance-type electromagnetic shields to protect workers and the population from man-made electromagnetic fields. It is shown that traditional resonant screens are not technological enough to cover large surfaces and are tuned to monochrome or narrow-band electromagnetic fields. Based on the analysis of the experience of using liquid shielding mixtures, the possibility of creating a multilayer structure without fixed layer thicknesses, which will allow protection against the influence of the frequency band, has been proven. At the same time, the wave resistance of the outer layer allows you to minimize the reflection coefficients of electromagnetic waves, which makes the material practically absorbent. A calculator for the preliminary calculation of the electrophysical properties of each layer is presented, which allows rationalizing the required coefficients. For calculations, the formulas of Odelevsky and Debye for the dielectric constant of mixtures are adapted. Experimentally obtained empirical coefficients are presented, which are a component of the ratio for obtaining acceptable screen parameters. To determine the exact concentration of the shielding filler in the matrix, a correction factor is provided. This is associated with errors when determining the volume content of the filler of low dispersion and differences in the morphology of the filler particles, which does not allow for an accurate calculation of the depolarization coefficient of the filler particles. Given the lack of reference data on the electrophysical parameters of the compositions due to their diversity, it is advisable to conduct thorough laboratory studies with different compositions of the compositions. This will make it possible to form a reference database that will speed up the execution of electromagnetic safety work and reduce their cost.*

Keywords: *electromagnetic safety; shielding; resonant absorption; electrophysical properties.*

Т.М. Ткаченко¹, О.С. Ільчук², О.В. Землянська²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ЗАСАДИ ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ РЕЗОНАНСНОГО ТИПУ НА ОСНОВІ РІДКИХ ЗАХИСНИХ КОМПОЗИЦІЙ

Анотація. У роботі досліджено можливості створення електромагнітних екранів резонансного типу для захисту працюючих і населення від електромагнітних полів техногенного походження. Показано, що для облицювання поверхонь великих площ традиційні резонансні екрани недостатньо технологічні і налаштовані на монохромні або вузькосмугові електромагнітні поля. На основі аналізу досвіду застосування рідких екрануючих сумішей доведено можливість створення багатошарової структури без фіксованих товщин шарів, яка дозволить реалізувати захист від впливу смуги частот. При цьому хвильовий опір зовнішнього шару дозволяє мінімізувати коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль, що робить матеріал практично поглинальним. Наведено розрахунковий апарат щодо попереднього розрахунку електрофізичних властивостей кожного шару, що дозволяє раціоналізувати потрібні коефіцієнти. Для розрахунків адаптовані формули Оделевського і Дебая для діелектричної проникності сумішей. Представлені експериментально отримані емпіричні коефіцієнти, які є складовою співвідношення для отримання прийнятних параметрів екранів. Для визначення точної концентрації екрануючого наповнювача у матриці надано поправочний коефіцієнт. Це пов'язане з похибками при визначенні об'ємного вмісту наповнювача малої дисперсності та розбіжності у морфології частинок наповнювача, що не дозволяє точно розрахувати коефіцієнт деполаризації частинок наповнювача. Враховуючи відсутність довідкових даних щодо електрофізичних параметрів композицій через їх різноманітність, доцільно провести ґрунтовні лабораторні дослідження за різних складів композицій. Це дозволить сформувати довідкову базу даних, що пришвидшить виконання робіт з електромагнітної безпеки та знизить їх вартість.

Ключові слова: електромагнітна безпека; екранування; резонансне поглинання; електрофізичні властивості.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.59-67>

Вступ

Основною тенденцією останніх років у галузі електромагнітної безпеки є розроблення і дослідження захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів. Це обумовлено тим, що традиційні металеві екрани апіорі мають високі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. При цьому коефіцієнт відбиття практично не змінюється у діапазонах ультрависоких і вищих частот. У результаті разом з небажаними випромінюваннями блокуються сигнали бездротового зв'язку, що у сучасних умовах неприпустимо. Крім того, відбиття хвиль може відбуватися у небажаних напрямках, додатково погіршуючи електромагнітну обстановку.

Але більшість захисних композицій широкосмугові, принаймні у межах одного частотного діапазону. А у реальних виробничих умовах майже завжди

існують техногенні електромагнітні поля вузької частотної смуги або монохромні. Для захисту від впливу таких полів доцільно застосовувати покриття, призначені для їх екранування, причому переважно за рахунок поглинання електромагнітної енергії. Це потребує розроблення теоретичних та технологічних засад їх проектування.

Стан питання

Створенню та випробуванню захисних властивостей композиційних матеріалів щодо екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону приділяється багато уваги. Особливістю композиції є необхідність використовувати різні складові (екрануючі наповнювачі) для ефективного екранування електромагнітних полів низької частоти (в основному наднизької – 50 Гц та її гармонік) та високої частоти (в основному ультрависоких та вищих частот).

У діапазоні ультрависоких частот ефективність екранування пропорційна питомій провідності матеріалу. Тому наповнювачем матриці повинен бути провідний матеріал. У роботі [1] таким наповнювачем є мідний порошок зі сферичною формою частинок. Різке зростання коефіцієнта екранування відбувається за проявлення перколяційного ефекту – зростання провідності матеріалу. Це відбувається за об'ємного вмісту наповнювача 15–16%. Це великий ваговий вміст, що робить матеріал досить дорогим. При цьому виникає проблема його ізотропності – рівномірності розподілу мідних частинок у матриці. Більш прийнятним є додавання у матрицю електропровідного вуглецю. У дослідженнях [2–7] застосовувався лускоподібний графіт, графітизована сажа та графени. Ці матеріали мають високі ефективності екранування (20 дБ і вище), але вартість наповнювачів обумовлює велику вартість кінцевого продукту, що робить його непридатним для покриття великих площ. Високі коефіцієнти екранування автоматично забезпечують екранування усіх видів бездротового зв'язку, що вкрай небажано. В останні роки багато уваги приділяється наноматеріалам [5]. Але надзвичайно висока для масового використання вартість вироблення наповнювачів нанорозмірів гальмує поширення подібних композицій. Навіть застосування для цілей екранування магнітних рідин, що виробляються у великих кількостях для ущільнювачів електродвигунів та генераторів, з наповнювачем з нанозаліза не вирішує проблеми економічної доцільності їх застосування [6–8]. При цьому екрануються поля дуже широкої смуги, що теж впливає на якість мобільного зв'язку. Але у магнітних рідин є певна перевага через можливість їх застосування для виготовлення захисних конструкцій як від високочастотних полів, так і полів наднизьких частот. Для захисту від впливу магнітних полів наднизької частоти з високою ефективністю застосовувався наповнювач з концентрату залізної руди, головним компонентом якого є магнетит (60–80%) [9, 10]. Такий наповнювач може бути отриманий у результаті очищення промислових стічних вод, що знімає проблему його утилізації [11, 12]. Ефективність екранування електромагнітних полів ультрависоких частот із застосуванням такого наповнювача відносно невисока (коефіцієнти екранування 3–4), але у реальних умовах, з огляду на рівні цих полів навіть поблизу радіотехнічних об'єктів, такі параметри задовільні. Це відкриває можливість підтримати сигнали бездротового зв'язку на належному рівні одночасно з екрануванням полів

небажаних частот. Зазвичай у виробничих умовах існують вузькосмугові електромагнітні поля, які можливо частково знизити прямим поглинанням у захисному матеріалі та екрануванням за рахунок резонансних явищ у багатошаровому матеріалі. Це потребує розроблення методологічних засад та математичного апарату для проєктування захисних конструкцій необхідної ефективності.

Мета роботи – розроблення загальних засад проєктування електромагнітних екранів резонансного типу та надання розрахункового апарату щодо їх максимальної ефективності на визначених частотах або смугах частот.

Виклад основного матеріалу

Резонансні захисні покриття призначені, у першу чергу, для мінімізації коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль. За спектральними характеристиками поглинальні матеріали поділяються на широкосмугові з перекриттям частотного діапазону (відношення максимальної і мінімальної частоти від 2 до 20 і більше) та вузькосмугові з перекриттям частотного діапазону $\pm 3\text{--}10\%$ відносно центральної (резонансної) частоти діапазону (смуги).

Широкосмугові матеріали зазвичай виробляються у вигляді багатошарових градієнтних структур. Мінімально досяжне значення коефіцієнта відбиття визначається діелектричною проникністю поверхневого шару.

Якщо діелектрична проникність поверхневого шару дорівнює ε_n (у поверхневого шару вона практично дійсна), то у широкій смузі частот важко зробити коефіцієнт відбиття нижчим за коефіцієнт відбиття на межі розділу повітря і поверхневого шару. Для немагнітних матеріалів за нормального падіння електромагнітної хвилі коефіцієнт відбиття визначається як:

$$K_g = \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_n}}{1 + \sqrt{\varepsilon_n}}. \quad (1)$$

Вузькосмугові поглинальні матеріали у більшості резонансні, у яких на частоті резонансу напруженості поля хвилі, відбитої від зовнішньої поверхні, і напруженості хвилі, відбитої від внутрішнього шару з більшою електропровідністю, перебувають у протифазі. Існуючі підходи до забезпечення мінімальних коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль передбачають узгодження товщин шарів покриття, що автоматично підвищує загальну товщину екрана та ускладнює його вироблення безпосередньо на місці використання [13]. Потребує розроблення методологія раціоналізації (а за певних умов – оптимізації) параметрів поглинального матеріалу, за яких матеріал має найменші коефіцієнти відбиття на сітці частот у заданому діапазоні. У відповідності до цього залежність коефіцієнта відбиття від частоти падаючої електромагнітної хвилі f надається у вигляді багатопараметричної функції F :

$$K_g(f) = F(f_1, p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (2)$$

p_i – параметри матеріалу.

Оптимізаційним параметром для кожного шару у випадку багатошарової структури є діелектрична проникність матриці без екрануючого наповнювача, об'ємний вміст наповнювача, товщина шарів за фіксованої (заданої) сумарної товщини, морфологія наповнювача (відношення середньої довжини частинок до їх діаметра).

Це надає змогу раціоналізувати коефіцієнти відбиття переважно за рахунок вмісту наповнювача, електрофізичних показників кожного шару та обирання наповнювача певної морфології і дозволяє уникнути фіксованої товщини шарів. Реалізація такого підходу можлива із застосуванням рідких композицій різного складу. За жорстких умов щодо високого коефіцієнта екранування кількість шарів може збільшуватися до 3–4, але їх нанесення не викликає проблем, якщо не потрібно витримувати товщину кожного шару.

У процесі проектування матеріалу із заданими захисними властивостями використовується залежність діелектричної проникності від частоти, розрахованої з використанням формули Оделевського для сумішей. Для малих концентрацій наповнювача (до 30% за вагою) її можна привести до співвідношення Дебая для діелектричної проникності [14].

Це співвідношення враховує поляризаційні процеси типу релаксацій. Розрахунок діелектричної проникності здійснюється за формулою, аналогічною формулі Дебая із введенням параметричних коефіцієнтів $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

$$\varepsilon_{екв.} = \varepsilon_m + \frac{D \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2}{1 + (i \frac{\lambda_p}{\lambda})}, \quad (3)$$

де ε_m – відносна діелектрична проникність матриці, λ – довжина хвилі у вільному просторі, λ_p – довжина хвилі релаксації.

$$D = \frac{\varepsilon_m V_n}{F}, \quad (4)$$

де V_n – об'ємна концентрація наповнювача.

Найбільш імовірна довжина хвилі релаксації визначається як:

$$\lambda_p = \frac{\varepsilon_m \rho_n}{60F}, \quad (5)$$

де ρ_n – питомий опір наповнювача.

Коефіцієнт деполіаризації визначається зі співвідношення:

$$F = \frac{\ln(2 \frac{l}{d})}{l/d}, \quad (6)$$

де l, d – середні довжина і діаметр частинок наповнювача.

Коефіцієнт α_1 враховує орієнтацію вектора напруженості електричного поля відносно орієнтації частинок $\alpha_1=0,33$ за хаотичної орієнтації частинок, $\alpha_1=1,00$ за орієнтації частинок у напрямку вектора напруженості електричного поля.

Наведене дозволяє керувати цим коефіцієнтом за допомогою впливу електричного поля на орієнтацію частинок наповнювача, як це реалізовано щодо феромагнітного наповнювача, концентрації і орієнтація якого змінюється впливом неоднорідного магнітного поля [15].

Емпіричний коефіцієнт α_2 визначається експериментально для конкретного матеріалу і конкретної технології та враховує необхідність збільшення потрібної реальної концентрації, порівняно з теоретичною. Це викликає певні труднощі у процесі проектування композицій. Але у будь-якому випадку ця робота вимагає лабораторних досліджень через відсутність довідкових даних щодо композиційних матеріалів, які розробляються за гнучкими технологіями. До того ж формула Оделевського дає тільки орієнтовні показники щодо діелектричної проникності суміші. По-перше, вона оперує об'ємним вмістом наповнювача, який для дрібнодисперсної субстанції визначити важко (зазвичай робиться перерахунок вагового вмісту в об'ємний у відповідності зі співвідношеннями питомих густин матеріалу матриці і наповнювача). По-друге, коефіцієнт деполаризації F теж приблизний через відмінності у морфології частинок наповнювача. Досвід свідчить, що для концентрацій наповнювача на межі протікання електроструму (14–16% за об'ємом) коефіцієнт α_2 приблизно дорівнює 0,5. Це ж стосується коефіцієнта α_3 , який доцільно визначити експериментально, враховуючи певний розкид довжини хвилі релаксації. Для наведених вище умов він близький до 0,16–0,17.

Застосування наведеного підходу дозволяє обрати і реалізувати найбільш прийнятні для конкретної електромагнітної обстановки електрофізичні властивості кожного шару багатшарової структури. Але необхідність виконувати попередні лабораторні дослідження значно підвищує час розробки та її вартість. Тому доцільно попередньо виконати дослідницьку роботу щодо параметрів композицій, розроблених на основі різних матриць і наповнювачів різних електрофізичних властивостей, дисперсності, морфології, концентрації для формування бази даних, яка дозволить на основі обстежень електромагнітної обстановки розробляти електромагнітні екрани на принципах розумної достатності.

Висновки

1. Недоліком більшості електромагнітних екранів резонансного типу є складність конструкції (необхідність точного дотримання товщин шарів) і практична монохромність екранованого поля.
2. Показано, що для отримання резонансних захисних покриттів доцільно використовувати рідкі захисні суміші з різними електрофізичними властивостями. Це надає змогу отримати потрібні коефіцієнти екранування у певній смузі частот із забезпеченням мінімальних коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль.
3. Для прогнозування захисних властивостей матеріалів доцільно використовувати формули Оделевського та Дебая для діелектричної проникності сумішей. Наявність емпіричних коефіцієнтів за необхідності врахування багатьох параметрів композиції і недостатня точність попередніх розрахунків обумовлює необхідність виконання ґрунтовних лабораторних досліджень з метою отримання довідкових даних, які дозволять зменшити час реалізації заходів електромагнітної безпеки та їх вартість.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. O V Panova, G Iu Krasnianskyi and I O Aznaurian. (2021). Evaluation of electromagnetic radiation shielding characteristics of facing building materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1164, 8th International Scientific Conference 'Actual Problems of Engineering Mechanics' (APEM 2021) 11th-14th May 2021, Odesa, Ukraine. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1164/1/012057>.
2. Viacheslav Barsukov, Ilona Senyk, Olena Kryukova, Oksana Butenko (2018). Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation. *Shielding Materials Today: Proceedings*, V. 5, No 8, Part 1, pp. 15909-15914.
3. Butenko, O., Boychuk, V., Savchenko, B., Kotsyubynsky V., Khomenko, V., Barsukov, V. (2019). Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. *Materials Today: Proceedings*, v. 6, pp. 270–278.
4. Senyk, I., Kuryptia, Y., Barsukov, V., Butenko, O., Khomenko, V. (2020). Development and application of thin wide-band screening composite materials. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(4), pp. 771–778.
5. Tudose Ioan Valentin, Mouratis Kyriakos, Ionescu Octavian Narcis, Romanitan Cosmin, Pachiu, Cristina, Popescu Marian, Khomenko Volodymyr, Butenko Oksana, Chernysh Oksana, Kenanakis George, Barsukov Viacheslav Z., Suche Mirela Petruta, Koudoumas Emmanouel, (2022) Novel Water-Based Paints for Composite Materials Used in Electromagnetic Shielding Applications, *Nanomaterials*, 12(3), 487.
6. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.V., Radionov A.V. (2018) A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. № 4. P. 14–18. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>.
7. Тихенко О. М., Багрій М. М., Левченко Л. О., Ходаковський О. В., Резнік Д. В. (2019). Розроблення та дослідження захисних властивостей металотекстильних електромагнітних екранів. *Вісті Донецького гірничого інституту, Покровськ*. Вип. № 1(44). С. 100–106.
8. Glyva V., Barabash O., Kasatkina N., Katsman M., Levchenko L., Tykhenko O., Nikolaiev K., Panova O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O. (2020). Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Iss. 1/10 (103). PP. 26–31.
9. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. (2018). Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Iss. 6/5 (96). P. 54–61.
10. Glyva V., Kasatkina N., Nazarenko V., Burdeina N., Karaieva N., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O. (2020). Development and research of protective properties of composite materials for screening electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Iss. 2/12 (104). PP. 40–47.
11. Kochetov, G., Prikhna, T., Samchenko, D., Prysiazhna, O., Monastyrov, M., Mosshchil, V., Mamalis, A. (2021). Resource-efficient ferritization treatment for concentrated wastewater from electroplating production with aftertreatment by nanosorbents. *Nanotechnology Perceptions*, 17 (1), 9-18. <https://doi.org/10.4024/N22KO20A.ntp.17.01>.
12. Kochetov, G., Kovalchuk, O., & Samchenko, D. (2020). Development of technology of utilization of products of ferritization processing of galvanic waste in the composition of alkaline cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (107), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215129>.
13. Glyva V., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Radomska M. (2020). The composite facing material for electromagnetic fields shielding. *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020): IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 907. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/907/1/012043>.

14. Касаткіна Н. В., Тихенко О. М., Панова О. В., Бірук Я. І. (2020). Підвищення ефективності композиційних електромагнітних екранів регулюванням морфології ферромагнітного наповнювача. Збірник наукових праць «Системи управління навігації та зв'язку», – 2020. Вип. № 3(61), С. 115–119. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.115>.
15. Спосіб виготовлення електромагнітного екрана з градієнтом електрофізичних властивостей. Патент 149126, Україна МПК 2021.01. G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01). Винахідники: Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Колумбет В.П., Левченко Л.О., Панова О.В., Ходаковський О.В. Власник: Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Колумбет В.П., Левченко Л.О., Панова О.В., Ходаковський О.В.; № у 2021 02561; заявл. 17.05.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. № 42.

Стаття надійшла до редакції 06.12.2022 і прийнята до друку після рецензування 15.03.2023

REFERENCES

1. Panova, O. V., Krasnianskyi, G. I., & Aznaurian, I. O. (2021). Evaluation of electromagnetic radiation shielding characteristics of facing building materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1164(1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1164/1/012057>.
2. Barsukov, V., Senyk, I., Kryukova, O., & Butenko, O. (2018). Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation. *Shielding Materials Today: Proceedings*, 5(8), part 1, 15909–15914.
3. Butenko, O., Boychuk, V., Savchenko, B., Kotsyubynsky, V., Khomenko, V., & Barsukov, V. (2019). Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. *Materials Today: Proceedings*, 6, 270–278.
4. Senyk, I., Kuryptia, Y., Barsukov, V., Butenko, O., & Khomenko, V. (2020). Development and application of thin wide-band screening composite materials. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21(4), 771–778.
5. Tudose, I. V., Mouratis, K., Ionescu, O. N., Romanitan, C., Pachi, C., Popescu, M., Khomenko, V., Butenko, O., Chernysh, O., Kenanakis, G., Barsukov, V. Z., Suche, M. P., & Koudoumas, E. (2022). Novel water-based paints for composite materials used in electromagnetic shielding applications. *Nanomaterials*, 12(3), 487. <https://doi.org/10.3390/nano12030487>.
6. Glyva, V. A., Podoltsev, A. D., Bolibruxh, B. V., & Radionov, A. V. (2018). A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*, 4, 14–18. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>.
7. Tyhenko, O. M., Bagriy, M. M., Levchenko, L. O., Khodakovskiy, O. V., & Reznik, D. V. (2019). Development and research of protective properties of metal-textile electromagnetic screens. *News of the Donetsk Mining Institute, Pokrovsk*, 1(44), 100–106.
8. Glyva, V., Barabash, O., Kasatkina, N., Katsman, M., Levchenko, L., Tykhenko, O., Nikolaiev, K., Panova, O., Khalmuradov, B., & Khodakovskyy, O. (2020). Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10(103), 26–31.
9. Glyva, V., Lyashok, J., Matvieieva, I., Frolov, V., Levchenko, L., Tykhenko, O., Panova, O., Khodakovskyy, O., Khalmuradov, B., & Nikolaiev, K. (2018). Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/5(96), 54–61.
10. Glyva, V., Kasatkina, N., Nazarenko, V., Burdeina, N., Karaieva, N., Levchenko, L., Panova, O., Tykhenko, O., Khalmuradov, B., & Khodakovskyy, O. (2020). Development and research of protective properties of composite materials for screening electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/12(104), 40–47.

11. Kochetov, G., Prikhna, T., Samchenko, D., Prysiashna, O., Monastyrov, M., Mosshchil, V., & Mamalis, A. (2021). Resource-efficient ferritization treatment for concentrated wastewater from electroplating production with aftertreatment by nanosorbents. *Nanotechnology Perceptions*, 17(1) 9-18. <https://doi.org/10.4024/N22KO20A.ntp.17.01>.
12. Kochetov, G., Kovalchuk, O., & Samchenko, D. (2020). Development of technology of utilization of products of ferritization processing of galvanic waste in the composition of alkaline cements. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (107)), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215129>.
13. Glyva, V. A., Levchenko, L. O., Panova, O. V., Tykhenko, O. M., & Radomska, M. M. (2020). The composite facing material for electromagnetic fields shielding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 907(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/907/1/012043>.
14. Kasatkina, N. V., Tykhenko, O. M., Panova, O. V., & Biruk, Y. I. (2020). Increasing the efficiency of composite electromagnetic screens by adjusting the morphology of the ferromagnetic filler. *Collection of scientific works "Navigation and communication management systems"*, 3(61), 115–119. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.115>.
15. Bourdeina, N. B., Biruk, Y. I., Kolumbet, V. P., Levchenko, L. O., Panova, O. V., & Khodakovskiy, O. V. (20.10.2021). The method of manufacturing an electromagnetic screen with a gradient of electrophysical properties. Patent 149126, Ukraine IPC 2021.01. G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01).

The article was received 06.12.2022 and was accepted after revision 15.03.2023

Ткаченко Тетяна Миколаївна

доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID: 0000-0003-2105-5951 **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

Льчук Оксана Степанівна

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Адреса робоча: вул. Борщагівська 115/3, к. 22, м. Київ, Україна, 03056

ORCID: 0000-0001-6352-5320 **e-mail:** oksanailchukkpi@gmail.com

Землянська Олена Василівна

старший викладач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Адреса робоча: вул. Борщагівська 115/3, к. 22, м. Київ, Україна, 03056

ORCID: 0000-0002-9608-3677 **e-mail:** olenazemlyanska@gmail.com

УДК 537.87:669.162.12 (045)

Nataliia Burdeina¹, PhD, Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2812-1387> **e-mail:** burdeina.nb@knuba.edu.ua

Yana Biruk¹, Assistant

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3669-9744> **e-mail:** biruk.iai@knuba.edu.ua

Kyrylo Nikolaiev², PhD, Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0404-6113> **e-mail:** nikolaev.kirill@gmail.com

¹Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

²National Aviation University, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF MATERIALS WITH A MULTILAYER STRUCTURE OF THE GRADIENT TYPE BASED ON LIQUID COMPOSITIONS FOR THE SHIELDING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

Abstract. Nowadays, for shielding and absorption of electromagnetic fields of a wide frequency range, composite materials or solid metal structures are offered and widely used. The article deals with research and development of multilayer protective liquid materials for shielding electric, magnetic and electromagnetic fields of a wide frequency range. A series of liquid shielding mixtures based on standard certified paints and finely dispersed magnetite was produced. Testing of the protective properties of these mixtures was carried out by sequentially applying 2–3 layers of mixtures to the surface, each of which had a certain concentration of the shielding substance. The shielding and reflection coefficients for these multilayer structures are given. It is shown that the advantage of the developed multilayer protective liquid materials lies in obtaining a gradient of electrophysical and magnetic properties of the protective structure with the possibility of calculating dielectric and magnetic permeabilities, taking into account the morphology of the shielding particles. A method of obtaining protective materials of the gradient type, which reduce the influence of electromagnetic fields, is proposed, which is possible for the treatment of surfaces of large areas and complex configurations.

Keywords: electromagnetic field; shielding; liquid compositions.

Н.Б. Бурдейна¹, Я.І. Бірук¹, К.Д. Ніколаєв²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

²Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ БАГАТОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ ГРАДІЄНТНОГО ТИПУ НА ОСНОВІ РІДКИХ КОМПОЗИЦІЙ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

Анотація. На сьогодні для екранування і поглинання електромагнітних полів широкого частотного діапазону пропонують і широко застосовують композитні матеріали або суцільні металеві конструкції. У статті розглянуто дослідження і розроблення багатошарових захисних рідинних матеріалів для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Виготовлено серію рідких екрануючих сумішей на основі стандартних сертифікованих фарб та дрібнодисперсного

магнетиту. Випробування захисних властивостей даних сумішей відбувалося послідовним нанесенням на поверхню 2–3 шарів сумішей, кожна з яких мала певну концентрацію екрануючої субстанції. Наведено коефіцієнти екранування та відбиття для даних багатошарових структур. Показано, що перевага розроблених багатошарових захисних рідинних матеріалів полягає в отриманні градієнта електрофізичних та магнітних властивостей захисної конструкції з можливістю розрахункового прогнозування діелектричних та магнітних проникностей з урахуванням морфології екрануючих частинок. Запропоновано спосіб отримання захисних матеріалів градієнтного типу, які зменшують вплив електромагнітних полів, що є можливим для обробки поверхонь великих площ і складних конфігурацій.

Ключові слова: електромагнітне поле; екранування; рідкі композиції.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.68-75>

Вступ

Питання екранування працюючих та населення, комп'ютерної техніки, електронних приладів та пристроїв від електромагнітних полів, незважаючи на велику кількість теоретичних ідей та практичних розробок, залишається актуальним. Ці об'єкти є вразливими до дії зовнішніх електромагнітних полів. Окрім природного магнітного поля, на працюючих і населення, комп'ютерну техніку, електронні прилади та пристрої діють електромагнітні поля, що генеруються системами забезпечення і функціонування засобів бездротового зв'язку, лініями електропередачі, відкритими розподільними пристроями, до складу яких входять комутаційні апарати, пристрої захисту й автоматики, вимірювальні прилади, а також радіотехнічні об'єкти, телевізійні та радіолокаційні станції, термічні цехи, телевізори, дисплеї, мікрохвильові (надвисокочастотні) печі, холодильники, кабіни автомашин, станції радіолокації і радіопеленгації, персональні комп'ютери, радарні установки тощо. У побуті джерелами електромагнітного поля і випромінювання є телевізори, дисплеї, мікрохвильові печі та інші пристрої, а також синтетичні килими, інші полімерні покриття в умовах зниженої вологості – менше ніж 70%.

Більшість матеріалів, пропонованих для екранування електромагнітних полів, мають значні коефіцієнти відбиття. Суперпозиція великої кількості електромагнітних полів, які поширюються від техногенних джерел та відбитих полів від екрануючих поверхонь призводить до посилення або послаблення природного магнітного поля Землі. Відхилення від нормальних значень природного магнітного поля як у бік посилення, так і у бік послаблення негативно впливає на стан працюючих та населення. Тому актуальним завданням є розроблення таких матеріалів, які екранують і поглинають електромагнітні поля, не відбиваючи їх.

Оскільки в останні роки спостерігається стале підвищення електромагнітного навантаження на людей, докільля та виробниче середовище, що обумовлюється підвищенням кількості і щільності розташування вищеприписаного електричного та електронного обладнання, систем забезпечення і функціонування засобів бездротового зв'язку, збільшенням навантаження на силові електричні мережі тощо, тому виникає потреба в проектуванні та розробленні захисних матеріалів, які екранують і поглинають електромагнітні поля широкого частотного діапазону.

Для екранування і поглинання електромагнітних полів широкого частотного діапазону пропонують і застосовують суцільні металеві конструкції або композитні матеріали. Дані конструкції і матеріали не в повній мірі відповідають цим вимогам, оскільки тверді кристалічні і аморфні матеріали мають великий коефіцієнт відбиття електромагнітних полів та випромінювання. Для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону доцільним є розроблення матеріалів, що мають багат шарову структуру градієнтного типу електрофізичних та магнітних властивостей на основі рідких композицій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Електромагнітне екранування актуальне для захисту людини та електронних пристроїв від небезпечного впливу електромагнітного випромінювання. На даний час проблемі розроблення та дослідження захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів приділяється багато уваги [1]. У статті [2] досліджено захисні властивості металополімерних електромагнітних екранів. Експериментально показано можливість отримання електромагнітного екрана градієнтного типу в одношаровому матеріалі. У дослідженні [3] наведено розроблені засади проектування та дослідження захисних властивостей рідинних матеріалів для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів широкого частотного діапазону. В публікації [4] проведено експериментальні дослідження екрануючих та електромагнітних властивостей тонкого електромагнітного екрана, який має композитну структуру і виготовлений способом нанесення магнітної рідини на діелектричну підкладку. У роботі [5] розроблено спосіб виготовлення електромагнітного екрана з градієнтом електрофізичних властивостей, який полягає у поступовому підвищенні концентрації дрібнодисперсних феромагнітних частинок наповнювача у діелектричні матриці від лицевого до тильного боку листового матеріалу. У [6, 7] розроблено методологічні засади оптимізації параметрів екранування електромагнітних полів різного походження у будівлях та спорудах. Запропоновано рідкий матеріал на основі серійних фарб та дрібнодисперсного концентрату залізної руди. Показано, що зниження захисних властивостей на водно-дисперсійному носії відбувається за рахунок окислення наповнювача. У роботі [8] розглянуто основні принципи проектування та вироблення матеріалів для екранування електромагнітних полів широко частотного діапазону включно з промисловою частотою та різноманітним діапазоном її гармонік та інтергармонік, які генеруються при виробництві та передачі електроенергії. У дослідженні [9] визначено основні засади розроблення та прогнозування захисних властивостей металополімерних електромагнітних екранів.

Метою дослідження є розроблення матеріалів багат шарової структури градієнтного типу на основі рідких композицій для екранування електромагнітних полів широко частотного діапазону.

Виклад основного матеріалу

Сучасні облицювальні матеріали повинні відповідати багатьом загальним і спеціальним вимогам. Загальні вимоги до механічних властивостей

включають міцність, питому вагу, надійність, надійне кріплення до робочих поверхонь, а також високу вогнестійкість і мінімальне виділення шкідливих речовин. До спеціальних вимог облицювальних матеріалів відносять високі коефіцієнти екранування в широкому діапазоні частот та мінімальні коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. Забезпечення усіх наведених вимог в одному матеріалі на оптимальному рівні практично не є можливим. Найпростішою задачею є зниження рівнів електромагнітних полів дуже високих, ультрависоких та надзвичайно високих частот. Будівлю або окремі приміщення можна заекранувати металевим або композиційним пласким матеріалом, враховуючи малу довжину електромагнітної хвилі і незначні дифракційні явища на кромках захисних конструкцій. Проте, великий внесок у захист від високочастотних випромінювань припадає на відбиття електромагнітних хвиль, що є небажаним. Уникнення такого ефекту можливе за рахунок застосування градієнтних екрануючих матеріалів, які не відбивають, а поглинають електромагнітні поля.

Відомо, що ефективність екранування збільшується, якщо у товщі композиційного захисного матеріалу є градієнт електрофізичних або магнітних властивостей [8]. Тобто діелектрична і магнітна проникність зростають від зовнішньої поверхні матеріалу до внутрішньої. При цьому, якщо вміст провідної та магнітної субстанції у верхніх шарах мінімальний та значення цих параметрів близькі до одиниці, то хвильовий опір поверхневого шару буде близький до опору середовища розповсюдження електромагнітних хвиль, для повітря він складає 377 Ом. За таких умов коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль близький до нуля. Таке явище зменшує поширення поля у небажаних напрямках, а екранування зони або об'єкта забезпечується за рахунок поглинання електромагнітної енергії шаром захисного матеріалу. У розробці [8] це реалізується обробкою рідкої металополімерної суміші неоднорідним магнітним полем, у результаті якої у нижньому шарі суміші збільшується концентрація феромагнітних екрануючих частинок. Але така технологія потребує багато витрат через необхідність здійснення обробки великої площі матеріалу у процесі полімеризації. При цьому для досягнення суттєвого ефекту товщина матеріалу повинна бути досить великою – 1–3 мм.

Аналогічний ефект можна отримати у інший спосіб. Для цього було виготовлено серію рідких екрануючих сумішей на основі стандартних сертифікованих фарб (матриця) та дрібнодисперсного магнетиту (екрануючий наповнювач). Результати випробувань захисних властивостей таких сумішей наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти

Серія рідких екрануючих сумішей	Коефіцієнт екранування при різних концентраціях сумішей			
	15%	30%	45%	60%
Суміш № 1	1,2–1,3	1,3–1,4	1,8–1,9	4,0–4,1
Суміш № 2	1,3–1,4	1,6–1,7	2,9–3,0	5,5–5,6
Суміш № 3	1,7–1,8	2,3–2,4	4,0–4,1	7,8–7,9

У наведеній таблиці коефіцієнтом екранування вважається загальне зниження щільності потоку енергії електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц.

Випробування щодо внеску у загальний коефіцієнт екранування відбиття електромагнітних хвиль наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Коефіцієнти відбиття електромагнітного поля ультрависокої частоти

Серія рідких екрануючих сумішей	Коефіцієнт відбиття при різних концентраціях сумішей			
	15%	30%	45%	60%
Суміш № 1	-	-	0,10–0,15	0,22–0,23
Суміш № 2	-	-	0,15–0,18	0,28–0,29
Суміш № 3	-	-	0,22–0,24	0,32–0,34

На наступному етапі на поверхню наносилися послідовно 2–3 шари сумішей. Нижній шар мав концентрацію екрануючої субстанції 60%, верхній – 30–45%.

У результаті дослідження отриманий коефіцієнт відбиття багатошарової структури не перевищував 0,1, а загальний коефіцієнт екранування був більший за сумарний коефіцієнт екранування окремих шарів.

Наприклад, для двошарового покриття на основі водно-дисперсної фарби з концентраціями 45 та 60% коефіцієнт відбиття складав не більше 0,1, а загальний коефіцієнт екранування становив 6,2–6,3.

Для тришарового покриття на основі геополімерної фарби (30, 45, 60%) коефіцієнт відбиття складав 0,15–0,16, а загальний коефіцієнт екранування – 11–12. Значне підвищення ефективності тришарової структури порівняно з сумарною ефективністю шарів можна пояснити додатковим розсіюванням електромагнітних хвиль на границях розділу шарів.

Перевагою таких захисних конструкцій є отримання градієнта електрофізичних та магнітних властивостей з можливістю розрахункового прогнозування діелектричних та магнітних проникностей з урахуванням морфології екрануючих частинок, які закладені у коефіцієнт деполяризації.

Для визначення ефективності матеріалу необхідно попередньо розрахувати магнітні та електрофізичні властивості кінцевого матеріалу. Це доцільно здійснювати за співвідношенням Лоренца для магнітної проникності магнітодіелектриків:

$$\mu = 1 + \frac{\nu_m(\mu_m - 1)}{1 + \frac{1 - \nu_m}{3}(\mu_m - 1)}, \quad (1)$$

де μ – ефективна магнітна проникність магнітодіелектрика,

μ_m – магнітна проникність наповнювача,

ν_m – об’ємний вміст наповнювача у матеріалі.

Для визначення ефективності діелектричної проникності матеріалів доцільно використовувати співвідношення Максвелла-Гарнета:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_d}{\varepsilon + 2\varepsilon_d} = v_m \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_d}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_d}, \quad (2)$$

$\varepsilon_d, \varepsilon_m$ – діелектричні проникності матриці та наповнювача,
 v_m – об’ємна доля наповнювача у діелектричній матриці.

Для визначення ефективної діелектричної проникності композиції доцільно скористатися формулою Оделевського:

$$\varepsilon = \varepsilon_d \left[1 + \frac{v_m(\varepsilon_m - \varepsilon_d)}{(1 - \frac{v_m}{v_k}) * F * (\varepsilon_m - \varepsilon_d) + \varepsilon_d} \right], \quad (3)$$

де $\varepsilon_d, \varepsilon_m$ – діелектричні проникності матриці та наповнювача,

v_m – об’ємний вміст наповнювача,

v_k – критичний об’ємний вміст наповнювача, за якого екрануючі частинки контактують між собою,

F – коефіцієнт деполаризації.

Для проектування захисних матеріалів необхідні відомості про магнітні та електрофізичні властивості матеріалів за визначених об’ємних концентрацій наповнювача. Наведені співвідношення дозволяють проектувати багат шарові покриття з потрібними захисними властивостями у залежності від конкретної електромагнітної обстановки.

Висновки

1. Для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів найбільш поширених частот доцільним є розроблення матеріалів багат шарової структури градієнтного типу на основі рідких композицій.
2. Було виготовлено серію рідких екрануючих сумішей, в яких матрицею виступають стандартні сертифіковані фарби, а в якості екрануючого наповнювача – дрібнодисперсний магнетит.
3. Результати досліджень свідчать, що коефіцієнти відбиття поверхневого шару двошарової структури становили не більше 0,1, а поверхневого шару тришарової структури – 0,15–0,16, при цьому загальні коефіцієнти екранування для двошарової структури становили – 6,2–6,3, для тришарової – 11–12.
4. Перевагою запропонованого способу є зручність і простота у виготовленні і використанні екрануючого матеріалу, його низька вартість, можливість оброблення поверхонь великих площ і складних конфігурацій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bartłomiej Salski. (2012). The Extension of the Maxwell Garnett Mixing Rule for Dielectric Composites with Nonuniform Orientation of Ellipsoidal Inclusions. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 30, 173–184, <https://doi.org/10.2528/PIERL12020202>.
2. Glyva, V., Kovalenko, V., Levchenko, L., & Tykhenko, O. (2017). Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12 (87), P. 50–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103167>.

3. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., & Biruk, Y. (2021). Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(6 (111)), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.23147>.
4. Glyva V. A., Podoltsev A. D., Bolibrukh B. V., Radionov A. V. (2018). A thin electromagnetic shield of a composite structure made on the basis of a magnetic fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. – № 4. – P. 14–18. <https://doi.org/10.15407/techned.2018.04.014>.
5. Патент 149126, Україна МПК 2021.01. G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01). Спосіб виготовлення електромагнітного екрана з градієнтом електрофізичних властивостей. Винахідники: Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Колумбет В.П., Левченко Л.О., Панова О.В., Ходаковський О.В. Володілець: Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Колумбет В.П., Левченко Л.О., Панова О.В., Ходаковський О.В.; № у 2021 02561; заявл. 17.05.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. № 42.
6. Касаткіна Н.В., Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Ченчевой В.В. (2020). Оптимізація параметрів екранування електромагнітних полів різнорідних джерел у виробничих будівлях. *ВІСТІ Донецького гірничого інституту* № 1 (46). ISSN 1999-981X/Розділ – безпеки життєдіяльності. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-1-181-188>.
7. Панова О.В., Бірук Я.І. (2022). Засади розроблення рідких сумішей для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вісті Донецького гірничого інституту»*, Вип. 1 (50), С. 108-113. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-108-113>.
8. Левченко Л.О., Осадчий Б.М., Панова О.В., Бірук Я.І. (2021). Електромагнітний екран градієнтного типу. *Науково-технічний інформаційно-аналітичний журнал «Новини енергетики»*. № 4, С. 3.
9. Глива В. А., Коваленко В. В., Тихенко О. М. (2017). Сучасні підходи до розроблення і впровадження матеріалів для екранування електромагнітних полів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Вип. 2 (42). 176–178.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2022 і прийнята до друку після рецензування 31.01.2023

REFERENCES

1. Salski, Bartlomiej. (2012). The Extension of the Maxwell Garnett Mixing Rule for Dielectric Composites with Nonuniform Orientation of Ellipsoidal Inclusions. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 30, 173–184. <https://doi.org/10.2528/PIERL12020202>.
2. Glyva, V., Kovalenko, V., Levchenko, L., & Tykhenko, O. (2017). Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12 (87)), 50–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103167>.
3. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., & Biruk, Y. (2021). Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(6 (111)), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.23147>.
4. Glyva, V. A., Podoltsev, A. D., Bolibrukh, B. V., & Radionov, A. V. (2018). A thin electromagnetic shield of a composite structure made on the basis of a magnetic fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*, 4, 14–18. <https://doi.org/10.15407/techned.2018.04.014>.
5. Patent 149126, Ukraine IPC 2021.01. G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01). The method of manufacturing an electromagnetic screen with a gradient of electrophysical properties. Inventors: Burdeina N.B., Biruk Y.I., Kolumbet V.P., Levchenko L.O., Panova O.V., Khodakovskiy O.V. Owner: Burdeina N.B., Biruk Y.I., Kolumbet V.P., Levchenko L.O., Panova O.V., Khodakovskiy O.V.; No. u 2021 02561; statement 05/17/2021; published 20.10.2021, Bul. №. 42.

6. Kasatkina, N. V., Levchenko L. O., Panova O. V., Tikhenko O. M., & Chenchevoi V. V. (2020). Optimization of shielding parameters of electromagnetic fields of heterogeneous sources in industrial buildings. *NEWS of the Donetsk Mining Institute*, 1(46), 181–188 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-1-181-188>.
7. Panova, O.V., & Biruk, Y.I. (2022). Principles of development of liquid mixtures for shielding electromagnetic fields of a wide frequency range. *All-Ukrainian scientific and technical journal "News of the Donetsk Mining Institute"*, 1(50), 108–113 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-108-113>.
8. Levchenko, L. O., Osadchiy, B. M., Panova, O. V., & Biruk, Y. I. (2021). Gradient-type electromagnetic screen. *Scientific and technical information and analytical magazine "Energy News"*, 4, 3 [in Ukrainian].
9. Glyva, V. A., Kovalenko, V. V., & Tyhenko, O. M. (2017). Modern approaches to the development and implementation of materials for shielding electromagnetic fields. *Control, navigation and communication systems*, 2(42), 176–178 [in Ukrainian].

The article was received 25.10.2022 and was accepted after revision 31.01.2023

Бурдейна Наталія Борисівна

кандидат педагогічних наук, доцент, професор кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: orcid.org/0000-0002-2812-1387 **e-mail:** burdeina.nb@knuba.edu.ua

Бірук Яна Ігорівна

асистент кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3669-9744> **e-mail:** biruk.iai@knuba.edu.ua

Ніколаєв Кирило Дмитрович

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології Національного авіаційного університету

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0404-6113> **e-mail:** nikolaev.kirill@gmail.com

ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION SYSTEMS AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 004.773

Stanislav Dovgii, Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, D. S. (Computer science), professor, Director-organizer
ORCID ID: 0000-0003-1078-0162 *e-mail*: s.dovgii@gmail.com

Oleh Kopyika, D. S. (Computer science), professor, Head of department
ORCID ID: 0000-0003-0189-3915 *e-mail*: okopyika@gmail.com

Oleksii Kozlov, Postgraduate
ORCID ID: 0000-0003-1889-3153 *e-mail*: alexey.ua84@gmail.com

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

TRANSMISSION OF INFORMATION IN AUTOMATED SPECIAL PURPOSE SYSTEMS

Abstract. *This paper is devoted to solving the problem of optimizing the message transport service, which is one of the basic for automated special purpose systems. The NATO model of network-centric transformation of automated control and communication systems, which is presented in the form of a general plan for the development of information systems, was taken as the basis for the construction of special-purpose systems. An analysis of the development of information systems was carried out within the framework of the program of modernization and improvement of automated management systems. Under this program, large-scale work was carried out on the creation of new mobile nodes and means of communication for the perspective automated communication system at the tactical level Warfighter Information Network-Tactical. Therefore, it is proposed to use wireless, decentralized, mobile IP networks such as MANET (Mobile Ad hoc Network) for automated special purpose systems at the tactical level. Each of the mobile devices of such network can move independently in any direction, and, as a result, often break and establish connections with neighbors. For the MANET network the messaging service is considered in the context of: one automated workplace, one domain and interconnection between domains. The efficiency of information transmission systems is considered. Circular transmission algorithms for messages with the highest urgency category are defined and a control algorithm is provided for selecting the optimal message transmission channel in which the time spent on message transmission between these subscribers is minimal (dynamic programming problem with additive effect function). Bellman's functional equation for the conditional optimization stage was adapted for this problem.*

Keywords: *message transport service; network-centric model.*

С.О. Довгий, О.В. Копійка, О.С. Козлов

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

ПЕРЕДАЧА ІНФОРМАЦІЇ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

***Анотація.** Стаття присвячена розв'язанню задачі оптимізації сервісу транспорту повідомлень, який є одним з базових для автоматизованих систем спеціального призначення. За основу побудови систем спеціального призначення взята модель НАТО мережецентричної трансформації автоматизованих систем управління та зв'язку, яка презентована у вигляді загального плану розвитку інформаційних систем. Проведено аналіз розвитку інформаційних систем в рамках виконання програми модернізації та вдосконалення автоматизованих систем управління. За цією програмою проведено широкомасштабні роботи зі створення нових рухомих вузлів та засобів зв'язку для перспективної автоматизованої системи зв'язку на тактичному рівні Warfighter Information Network-Tactical. Тому, пропонується для автоматизованих систем спеціального призначення на тактичному рівні використовувати бездротові, децентралізовані, мобільні IP-мережі типу MANET (Mobile Ad hoc Network). Кожен з мобільних пристроїв такої мережі може незалежно пересуватися у будь-яких напрямках і, як наслідок, часто розривати і встановлювати з'єднання з сусідами. Для мережі MANET розглянуто сервіс обміну повідомлень в розрізі: одного АРМ, одного домену та інтерконекту між доменами. Розглянута ефективність систем передавання інформації. Визначені алгоритми циркулярної передачі для повідомлень з вищою категорією терміновості та наданий алгоритм управління щодо вибору оптимального маршруту передачі повідомлення, при якому витрати часу на передачу повідомлення між даними абонентами мінімальні (задача динамічного програмування з адитивною функцією ефекту). Функціональне рівняння Беллмана для етапу умовної оптимізації було адаптоване для даної задачі.*

***Ключові слова:** сервіс транспорту повідомлень; мережецентрична модель.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.76-90>

1. ВСТУП

Постановка завдання

В НАТО прийнята модель мережецентричної трансформації автоматизованих систем управління та зв'язку, яка презентована у вигляді загального плану розвитку інформаційних систем. В плані виділено чотири етапи розвитку інформаційних технологій [1]. На кожному з цих етапів для проектування Автоматизованих систем управління використовувались різні технології для побудови процесу прийняття управлінських рішень [2–5]. Поточний етап розвитку технологій ставить за мету повну сумісність усіх міжвідомчих інформаційних систем. Основні характеристики поточного етапу наступні: програмне забезпечення розробляється як сервіси; архітектура інформаційних систем є сервісно-орієнтованою; мережа є програмно-конфігурованою – SDN (*software-defined networking*).

Аналіз останніх досліджень

SDN – це підхід до управління мережею, який забезпечує динамічну, програмно ефективну конфігурацію мережевих елементів з метою покращення продуктивності мережі та моніторингу, що робить її більше схожою на хмарні обчислення, ніж на традиційне керування мережею [6]. SDN призначена для створення статичної архітектури традиційних мереж. SDN намагається централізувати дані про мережу в одному мережевому компоненті, відокремлюючи процес пересилання мережевих пакетів (площина даних) від процесу маршрутизації (площина керування) [7]. 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, масштабованість та гнучкість [6], і це головна проблема SDN [8].

SDN зазвичай асоціювалась з протоколом OpenFlow (для віддаленого зв'язку з елементами мережевої площини з метою визначення шляху мережевих пакетів через мережеві комутатори) з моменту появи останнього в 2011 році. Однак з 2012 року цей термін також використовували власні системи [9, 10]. До них належать відкрите мережеве середовище Cisco Systems і платформа віртуалізації мережі Nicira.

Для автоматизованих систем спеціального призначення на тактичному рівні за принципом SDN будуються мережі типу MANET (Mobile Ad hoc Network). MANET – бездротова, децентралізована, мобільна IP-мережа, що здатна до самоорганізації та забезпечує встановлення з'єднань між довільними вузлами [11]. Кожен з мобільних пристроїв такої мережі може незалежно пересуватися у будь-яких напрямках і, як наслідок, часто розривати і встановлювати з'єднання з сусідами.

Виходячи з плану розвитку інформаційних систем, командування сухопутних військ (СВ) США у рамках виконання програми модернізації та вдосконалення автоматизованих систем управління провело широкомасштабні роботи зі створення нових рухомих вузлів та засобів зв'язку для перспективної автоматизованої системи зв'язку на тактичному рівні WIN-T (Warfighter Information Network-Tactical) [12–15]. Не останню роль при виборі моделі застосування засобів зв'язку на тактичному рівні відіграють і фінансові показники [16].

Принцип роботи перспективної АСУ WIN-T сухопутних військ США (рис. 1).

Основні зусилля американських фахівців були зосереджені на розробці рухомих (високомобільних) вузлів зв'язку (ВЗ), командно-штабних машин (КШМ) та комплектів апаратури зв'язку, таких як:

- рухомий тактичний ВЗ TCN v1 (Tactical Communications Node) для ланки "дивізія – бригада – батальйон";
- рухомий ВЗ роти SNE (Soldier Network Extension node);
- командно-штабна машина PoP v1 (Point of Presence);
- автомобільний комплект апаратури радіозв'язку VWP v1 (Vehicle Wireless Package).

Крім того, велика увага приділяється створенню апаратно-програмних засобів для центрів безпеки зв'язку та управління мережею (ЦБЗУМ) NOSC (Network Operations and Security Center).

Розглядалися тільки ВЗ для забезпечення зв'язку у русі.

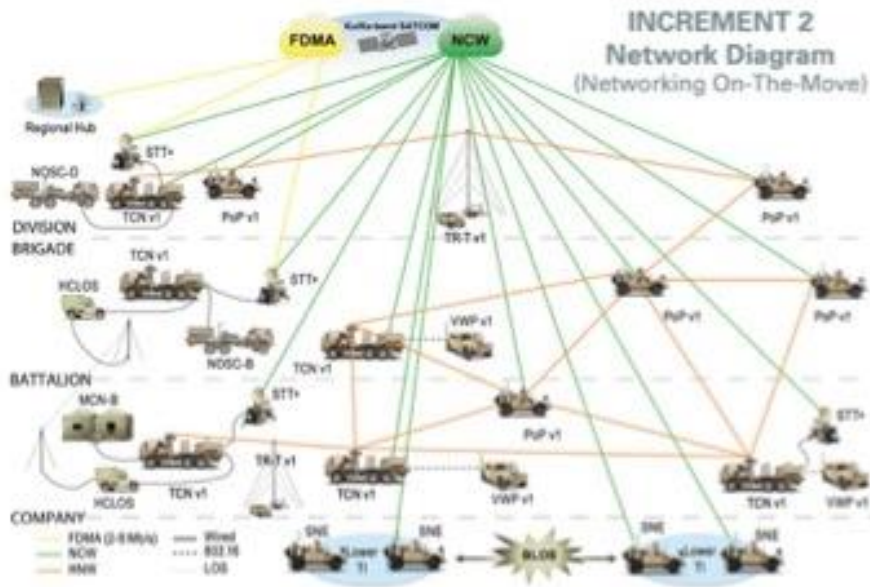


Рис. 1. Автоматизована система зв'язку на тактичному рівні WIN-T

Командно-штабна машина (КШМ) PoP v1 забезпечує радіодоступ до опорної широкосмугової мережі зв'язку WTN-T дивізії (бригади) як у русі, так і на зупинках, а також сполучення з тактичними УКВ-радіомережами бригади.

Цю КШМ передбачається активно задіяти в системі бойового управління та зв'язку ланки "бригада і нижче". Вона повинна забезпечувати необхідну ситуаційну обізнаність на командних пунктах, а також своєчасне доведення графічної інформації, повідомлень та бойових наказів до командирів та штабів різного рівня та вищого командування. Крім того, апаратура зв'язку КШМ може використовуватися як радіоретранслятор, забезпечувати доступ у мережі тактичної ланки в зоні прямої видимості та безшовне з'єднання між будь-якими абонентами на полі бою.

Рухомий ВЗ роти SNE v1 призначений для забезпечення закритого супутникового зв'язку в русі, з коротких зупинок та розширення зони дії радіомереж бойового керування. Фактично він виконує функцію базової станції зв'язку у тактичній ланці.

У кожній бригааді та дивізії планується мати на озброєнні один центр безпеки зв'язку та мережевих операцій відповідного рівня.

ЦБЗУМ бригади та дивізії забезпечують:

- планування, організацію, управління та контроль функціонування мереж, а також аналіз та зміну їх конфігурації та пропускну здатності;
- визначення зон дії (електромагнітної доступності) засобів радіо- та радіорелейного зв'язку, що входять до складу ВЗ;
- управління та контроль інформаційної безпеки в локально обчислювальних мережах (ЛОМ);
- розподіл спектра радіочастот для всіх типів радіопередаючих пристроїв та управління передавачами бездротових локальних мереж;
- роботу із системами шифрування з відкритими та закритими ключами, а також розподіл шифру ключів.

За таким принципом будується перспективна автоматизована система зв'язку на тактичному рівні WIN-T.

Таким чином, на думку американських фахівців, розгортання в сухопутних військах США системи зв'язку нового покоління у ланці "рота – батальйон – бригада" призведе до значного підвищення бойових можливостей і маневреності військ, а також збільшення пропускної спроможності зв'язку в тактичній ланці.

Мета досліджень

Основним недоліком використання ширококугової системи радіозв'язку є її нестійкість при роботі засобів радіоелектронної боротьби.

Самим завадостійким засобом радіозв'язку залишається УКХ-радіозв'язок в режимі псевдовипадкового перелаштування робочої частоти ППРЧ.

У цьому випадку для інформаційного обміну в автоматизованих системах управління (АСУ) збройних сил використовуються повідомлення: накази, доповіді (підтвердження про одержання наказів, донесення про виконання наказів), інформація про стан виконавчих органів і сил, про наявність запасів ресурсів спеціального (зброя, військова техніка, засоби радіозв'язку) і загального (паливно-мастильні матеріали, матеріали, майно) призначення, службова інформація про стан вузлів і ліній радіозв'язку тощо [17–24]. Т.я. УКХ-радіозв'язок в режимі ППРЧ має низьку пропускну здатність, то треба використовувати додаткові заходи для успішної передачі повідомлень.

Тому, метою даної статті є розв'язання задачі оптимізації сервісу транспорту повідомлень, який є одним з базових для автоматизованих систем спеціального призначення.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Один з основних сервісів для автоматизованих систем управління для бойових дій на тактичному рівні, який вимагає найбільшої завадостійкості при заданій ефективності, є сервіс транспорту повідомлень.

Розглянемо структурні діаграми обміну повідомлень для різних варіантів побудови радіомережі типу MANET.

2.1 Структурна діаграма обміну повідомленнями в розрізі одного АРМ

Виникає проблема при розробці програмного забезпечення відносно посилення на сервіс транспорту повідомлень. Виникає складна задача використання різних технологій при застосуванні різних радіомереж.

Тому, для поділу задач прикладного програмування і задачі транспорту повідомлень була обрана архітектура, яка використовує загальну шину для обміну між різними рівнями. Тобто при необхідності у такій архітектурі можемо програмувати і міняти модулі на окремому рівні без переписування програмного забезпечення іншого рівня.

Наприклад, можливо замінити транспорт для повідомлень між автоматизованими робочими місцями (АРМ) з brokercentric MQTT на brokerless ZeroMQ, не міняючи прикладні програми. І навпаки, можна, наприклад, поміняти Java-backend на Go-backend, не перероблюючи забезпечення на рівні мережі. Іншим прикладом може бути перехід від використання протоколів TCP/IP чи UDP без переписування програмного забезпечення.

MQTT в якості загальної внутрішньої шини обрано за такими факторами:

- широко розповсюджений протокол з коннекторами практично до будь-якої бібліотеки чи софту;
- використовує архітектуру public-subscribe, не прив'язаний до формату повідомлень (data-agnostic);
- використання протоколу та і сам протокол достатньо легкий по відношенню до ресурсів;
- і саме головне – при необхідності є можливість переключати клієнтські коннекти з внутрішньо-комп'ютерних на зовнішньо-мережеві без структурних змін.

На рисунку 2 наведена схема такого обміну через загальну шину.

Наступною задачею є структурні діаграми обміну повідомлень у розрізі одного та декількох доменів.

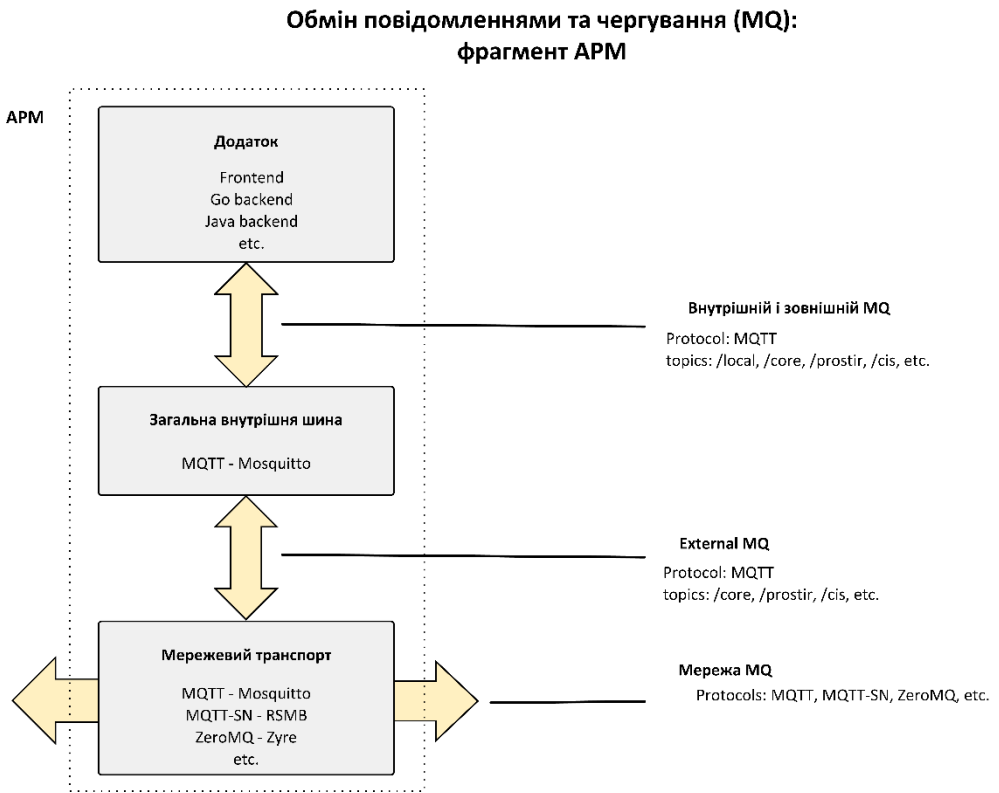


Рис. 2. Схема обміну через загальну шину

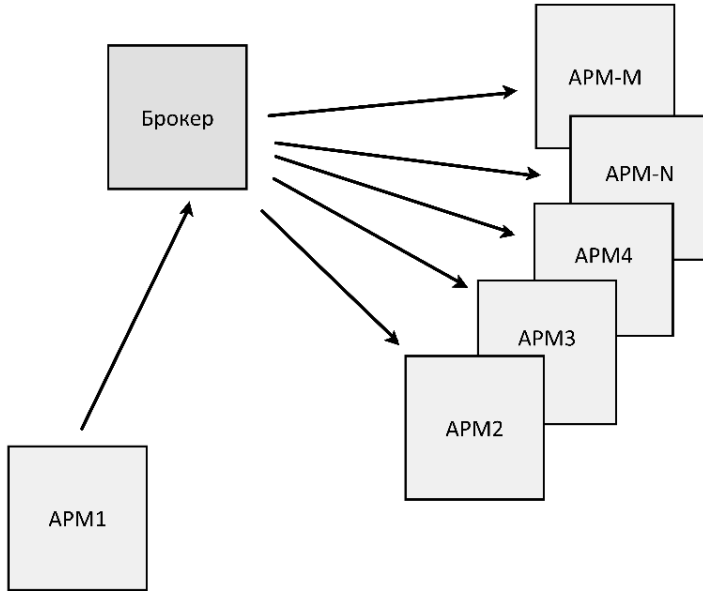
2.2 Структурна діаграма обміну повідомленнями в розрізі одного домену

Розглянемо декілька типів обміну повідомленнями в рамках одного домену. Розподіл за типами організації обміну: система з центральним брокером і системи без виділеного брокеру. І другий розподіл – обмін повідомленнями Peer-to-Peer (P2P, зазвичай TCP unicast) або ж One-to-Many (зазвичай це UDP multicast). На рисунку 3 наведені діаграми відповідно до таких типів обміну:

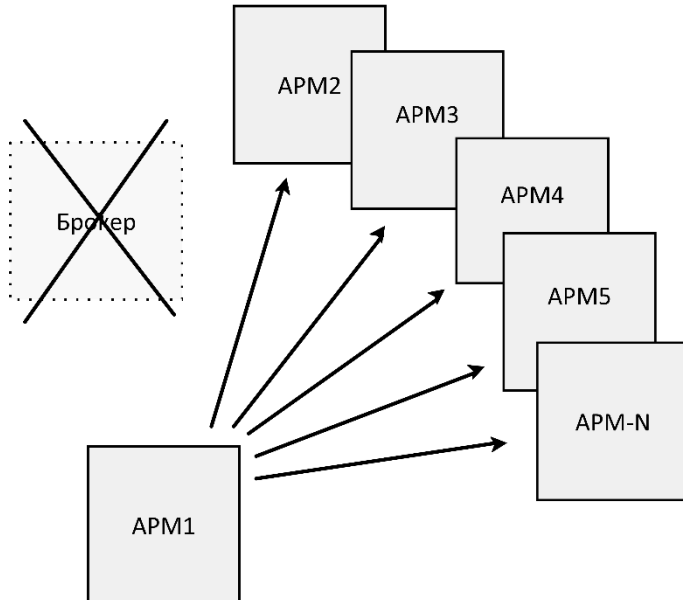
- A: Broker-centric + Peer-to-Peer;
- B: Broker-less + Peer-To-Peer;
- C: Broker-less + One-to-Many.

Обмін повідомленнями та чергування (MQ): сегмент домену

Варіант А – модель, орієнтована на брокер



Варіант В – без брокерів і P2P (одноранговий)



Варіант С – без брокера та багатоадресна передача (один до багатьох)

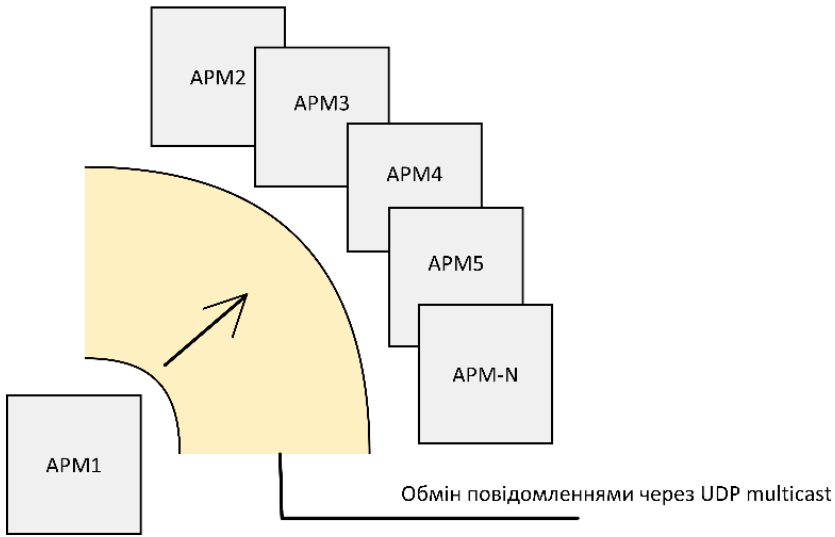


Рис. 3. Діаграми відповідно до таких типів обміну: А: Broker-centric + Peer-to-Peer; В: Broker-less + Peer-To-Peer; С: Broker-less + One-to-Many

Слід відмітити, що немає одного єдиного типу обміну, найкращого в усіх випадках, – при деяких шаблонах роботи краще використовувати, наприклад, p2p обмін, в інших – multicast розсилку. Тому, можливо, що в деяких застосуваннях оптимальним є використання двох типів в рамках однієї моделі.

Реалізація, яка використовується найчастіше, – модель з центральним брокером і розсилкою повідомлень один-всім в усіх випадках. Така модель застосовується для реалізації функції «Загальна оперативна картина» (COP – A common operational picture). COP – це єдине ідентичне відображення відповідної (оперативної) інформації (наприклад, позиції власних військ та ворожих військ, позиції та статусу важливої інфраструктури, таких як мости, дороги тощо), що ділиться більш ніж однією командою. COP сприяє спільному плануванню та комбінованому виконанню та допомагає всім ешелонам для досягнення ситуаційної обізнаності [25–32].

2.3 Структурна діаграма обміну повідомленнями в розрізі інтерконнекту між доменами

В складних системах сервіс транспорту повідомлень проектується з використанням декількох доменів, які діляться за функціональним принципом (розвідка, артилерія, сухопутні підрозділи і т.п.).

Виходячи з сутності інтерконнекту, це зазвичай P2P з'єднання (Peer-to-Peer). Відповідно – найбільш природно на такому з'єднанні виглядає P2P мост між брокерами.

Наприклад, на рисунку 4 наведено діаграму такого з'єднання між двома доменами різного типу (між Peer-to-Peer та One-to-Many доменами).

2.4 Алгоритм оптимального маршруту передачі повідомлення

Для передачі «повідомлень» (наказів) з вищою категорією терміновості в інформаційних системах спеціального призначення використовується

алгоритм циркулярної передачі («хвиля»), при цьому повідомлення видається від абонента в усі лінії радіозв'язку одночасно і розповсюджується по телекомунікаційній мережі (ТМ) по усіх можливих маршрутах – функція «Загальна оперативна картина» (COP – A common operational picture).

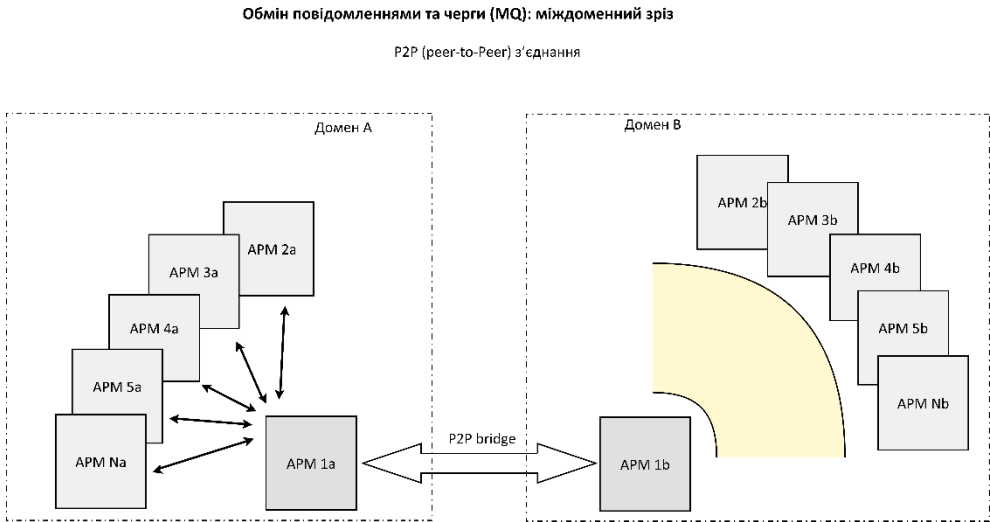


Рис. 4. Діаграма з'єднання між двома доменами різного типу (між Peer-to-Peer та One-to-Many доменами)

Перевагами «хвильового» алгоритму передачі є наступні:

- доведення повідомлення до абонента-одержувача за мінімальний час (оскільки один із повної множини маршрутів завжди є оптимальним);
- висока надійність доведення повідомлення, що визначається імовірністю здатного стану хоча б одного з повної множини маршрутів;
- відсутність необхідності збору службової інформації про стан ліній радіозв'язку і вирішення задачі управління рухом повідомлення по ТМ.

Але циркулярна передача повідомлення приводить до максимального завантаження ТМ єдиним повідомленням.

Тому, розглянемо алгоритм управління щодо вибору оптимального маршруту передачі повідомлення в конкретний момент часу [33–36].

Нехай для ТМ відома матриця середнього часу τ передачі 1 повідомлення (пакета) по кожній лінії радіозв'язку, тобто між n суміжними вузлами (d_i, d_j)

$$T = \|\tau_{ij}\|_{n \times n} . \tag{1}$$

Для передачі повідомлення між абонентами (a_r, a_s) даної ТМ на множині можливих «управлінь» $\{U\}$ (щодо складання маршруту радіозв'язку), кожне з котрих є вектор – ланцюг $k = n - 1$ дуг-ліній радіозв'язку між (a_r, a_s) матриці суміжності вершин-вузлів ТМ

$$U = \|\mathbf{u}_{ij}\|_{n \times n} , \tag{2}$$

де u_{ij} – вибрана лінія радіозв’язку на k -й ділянці маршруту, «придатна» для наявної структури ТМ, потрібно знайти таке (оптимальне) управління (скласти маршрут)

$$U^o = \left\| u_{ij}^o \right\|, \quad U^o \subset \{U\}, \quad (3)$$

при якому витрати часу на передачу повідомлення між даними абонентами мінімальні

$$T(a_r, a_s, U^o) = \min_{(U)} T(U) = \sum_{u_{ij}^o \subset U^o} \tau_{ij}(u_{ij}^o). \quad (4)$$

Це – задача динамічного програмування з адитивною функцією ефекту.

Функціональне рівняння Беллмана для етапу умовної оптимізації, адаптоване для даної задачі, має вигляд –

$$T_k(d_i^{(k)}, u_{ij}^o) = \min_{\{u_{ij}\}} \{ \tau_{ij}(d_i^{(k)}, u_{ij}) + T_{k+1}(d_i^{(k+1)}, u_{ij}) \}, \quad k = \overline{s, r}, \quad (5)$$

де $d_i^{(k)}, d_i^{(k+1)}$ – суміжні вузли радіозв’язку для k -ї ділянки маршруту;

T_k, T_{k+1} – «потенціали» (рівень ефекту) суміжних вузлів радіозв’язку для k -ї ділянки маршруту;

u_{ij}^o – умовне оптимальне управління для k -ї ділянки маршруту.

Якщо для ТМ відома матриця імовірності незанятості ліній радіозв’язку між суміжними вузлами –

$$P = \left\| p_{ij} \right\|_{n \times n}, \quad (6)$$

то складання маршруту з максимальною імовірністю його незанятості потребує пошуку такого (оптимального по даному критерію) управління U^o , при котрому

$$P(a_r, a_s, U^o) = \max_{\{U\}} P(U) = \prod_{u_{ij}^o \subset U^o} p_{ij}(u_{ij}^o). \quad (7)$$

Це – задача динамічного програмування з мультиплікативною функцією ефекту. Функціональне рівняння Беллмана для етапу умовної оптимізації, адаптоване для даної задачі, має вигляд –

$$P_k(d_i^{(k)}, u_{ij}^o) = \max_{\{u_{ij}\}} \{ p_{ij}(d_i^{(k)}, u_{ij}) \times P_{k+1}(d_i^{(k+1)}, u_{ij}) \}, \quad k = \overline{s, r}, \quad (8)$$

де $d_i^{(k)}, d_i^{(k+1)}$ – суміжні вузли радіозв’язку для k -ї ділянки маршруту;

P_k, P_{k+1} – «потенціали» (рівень ефекту) суміжних вузлів радіозв’язку для k -ї ділянки маршруту;

u_{ij}^o – умовне оптимальне управління (напрямок) для k -ї ділянки маршруту.

Алгоритми динамічного управління потоками інформації є найбільш ефективними при врахуванні як імовірності занятості ліній радіозв’язку, так і їх фактичного стану для складання найкоротшого за терміновістю чи достатнього за пропускну здатністю маршруту між абонентами.

3. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

За основу побудови систем спеціального призначення взята модель НАТО мережецентричної трансформації автоматизованих систем управління та зв'язку.

Проведено аналіз розвитку інформаційних систем в рамках виконання програми модернізації та вдосконалення автоматизованих систем управління. За цією програмою проведено широкомасштабні роботи зі створення нових рухомих вузлів та засобів зв'язку для перспективної автоматизованої системи зв'язку на тактичному рівні Warfighter Information Network-Tactical.

Пропонується для автоматизованих систем спеціального призначення на тактичному рівні використовувати бездротові, децентралізовані, мобільні IP-мережі типу MANET (Mobile Ad hoc Network).

1. Основним елементом інформаційного обміну в автоматизованих системах управління збройних сил на тактичному рівні визначено передачу повідомлень.

2. Розглянуто сервіс обміну повідомлень в розрізі: одного АРМ, одного домену та інтерконекту між доменами.

3. Визначені алгоритми циркулярної передачі для повідомлень (наказів) з вищою категорією терміновості.

4. Наданий алгоритм управління щодо вибору оптимального маршруту передачі повідомлення, при якому витрати часу на передачу повідомлення між абонентами мінімальні (задача динамічного програмування з адитивною функцією ефекту).

5. Функціональне рівняння Беллмана для етапу умовної оптимізації адаптоване для даної задачі.

6. Роботи буде продовжено для різних чисельних прикладів вибору оптимальних маршрутів радіомережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Паршин, С., & Кожанов, Ю. (2010). Концепции сетецентрического боевого управления ВС США, Великобритании и ОВС НАТО. Общее и различия. URL: http://factmil.com/publ/strana/velikobritanija/koncepcii_setecentricheskogo_boevogo_upravlenija_vs_ssha_velikobritanii_i_ovs_nato_obshhee_i_razlichija_2010/9-1-0-420.
2. Довгий, С.О., & Копійка, О.В. (2001). Автоматизована система для підтримки прийняття рішень при ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС. К.: Наук. думка, 211-266.
3. Довгий, С.А. (2001). Новые технологии в телекоммуникации: выбор технологической архитектуры. Современные тенденции развития. К.: Укртелеком.
4. 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.
5. Довгий, С. (2000). Стан та проблеми розвитку телекомунікаційної мережі України. Наука та наукознавство.
6. Benzekki, Kamal, & El Fergougui, Abdeslam, & Elbelrhiti Elalaoui, Abdelbaki (2016). Software-defined networking (SDN): A survey. Security and Communication Networks, 9 (18): 5803–5833. doi:10.1002/sec.1737.
7. Montazerolghaem, Ahmadreza (2020). Software-defined load-balanced data center: design, implementation and performance analysis. Cluster Computing, 24 (2), 591–610, doi:10.1007/s10586-020-03134-x. ISSN 1386-7857. S2CID 220490312.

8. Montazerolghaem, Ahmadrza (2021). Software-defined Internet of Multimedia Things: Energy-efficient and Load-balanced Resource Management. *IEEE Internet of Things Journal*, 9 (3): 2432–2442. doi:10.1109/JIOT.2021.3095237. ISSN 2327-4662. S2CID 237801052.
9. Software-defined networking is not OpenFlow, companies proclaim. (2022). URL: searchsdn.techtarget.com.
10. InCNTRE's OpenFlow SDN testing lab works toward certified SDN product. (2022). URL: <https://www.techtarget.com/news/>.
11. Слюсар, В.И. (2008). Военная связь стран НАТО: проблемы современных технологий. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес. № 4*, 66–71.
12. URL: <https://gdmissionsystems.com/communications/warfighter-information-network-tactical>.
13. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/PM_WIN-T.
14. Warfighter Information Network-Tactical (WIN-T). (2012). URL: <https://peoc3t.army.mil/wint/index.php>.
15. Army tactical communication network organization reflects on its rich history. The United States Army. (2012). Army.mil. Retrieved 2012-10-14. URL: <https://www.army.mil/article/78284/>.
16. Barabash, O., Open'ko, P., Kopiika, 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.
17. 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, April 2008, pp. 195-206.
18. 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*.
19. Волошин, О. Ф. & Машченко, 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".
20. Довгий, С.О. (2001). Приватизація, інвестиції та фондовий ринок: правові засади та практика. У 4 т., Відкрите акціонерне товариство «Укртелеком», К.: Укртелеком.
21. Rubinstein, A. (2013). *Lecture Notes in Microeconomic Theory*. 2nd., Princeton University Press, ISBN 978-0-691-15413-8.
22. Копейка, О. В. (2014). Архитектура системы управления ИТ-инфраструктурой в современных Дата-центрах. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*, № 29, 29-37.
23. Choi, M.-J., & Hong, J.W.-K. (2007). Towards Management of Next Generation Networks. *IEICE Transaction Communications E Series B*, Vol. 90., No. 11, 3004-3014.
24. Балашов, В.А., Копийка, О.В., Ляховецкий, Л.М. (2005) VDSL – ближайшее будущее цифрового абонентского доступа. *Зв'язок*, № 4, 10-16.
25. P 1-02, DOD Dictionary of Military and Associated Terms (2001). As amended through 17 October 2008."Archived copy" (PDF).
26. URL: https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/CommonOpER_HLT_0908-508.pdf.
27. URL: <https://constanttech.com/what-a-common-operating-picture-means-for-mission-critical/>.
28. Kristine Steen-Tveit & Bjorn Erik Munkvold (2021). From common operational picture to common situational understanding. An analysis based on practitioner perspectives. *Safety Science*. Volume 142, October 2021, 105381. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105381>.

29. Kumsap, C., Mungkung, V., Amatacheewa, I. & Thanasomboon, A. (2018). Conceptualization of Military's Common Operation Picture for the Enhancement of Disaster Preparedness and Response during Emergency and Communication Blackout. *Procedia Engineering* 212, 1241–1248.
30. Lelardeux, C.P., Panzoli, D., Lubrano, V., Minville, V., Lagarrigue, P. & Jessel, J.-P. (2017). Communication system and team situation awareness in a multiplayer real-time learning environment: application to a virtual operating room. *The Visual Computer* 33 (4), 489–515.
31. Munkvold, B. E., Radianti, J., Rød, J. K., Opach, T., Snaprud, M., Pilemalm, S., & Bunker, D. (2019). Sharing Incident and Threat Information for Common Situational Understanding. *Proceedings of the 16th ISCRAM Conference Spain*.
32. Steen-Tveit, K. (2020). Identifying Information Requirements for Improving the Common Operational Picture in Multi-Agency Operations. *Proceedings of the 17th ISCRAM Conference, Virginia*.
33. Стеклов, В.К. (2006). Теорія електричного зв'язку. Підручник для ВНЗ, К.: Техніка.
34. Стеклов, В.К., Беркман, Л.Н. & Кільчицький, Є.В. (2004). Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку. Підруч. Для вищ. навч. закл., К.: Техніка.
35. Беркман, Л.Н. (2014). Теоретичні основи методології синтезу інформаційно-комунікаційних систем. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, №4, С. 12–20.
36. Стеклов, В.К. & Беркман, Л.Н. (2002). Проектування телекомунікаційних мереж. Підручник для ВНЗ, К. : Техніка, ISBN 966-575-070-4.

Стаття надійшла до редакції 23.11.2022 і прийнята до друку після рецензування 14.02.2023

REFERENCES

1. Parshin, S. & Kozhanov, Yu. (2010). Concepts of network-centric combat control of the US Armed Forces, Great Britain and NATO Allied Forces. *Common and Differences*. Retrieved from: http://factmil.com/publ/strana/velikobritanija/koncepcii_setecentricheskogo_boevogo_upravlenija_vs_ssha_velikobritanii_i_ovs_nato_obshee_i_razlichija_2010/9-1-0-420 [in Russian].
2. Dovgiy, S. O., & Kopiika, O. V. (1996). Automated system for the process of taking decisions during the liquidation of the inheritance of an accident at the CNPP. K.: VPC TYRAG [in Ukrainian].
3. Dovgiy, S. O. (2001). New technologies in telecommunications: the choice of technological architecture, Modern development trends. Kyiv: Ukrtelecom [in Russian].
4. Kopiika, O. V. (2013). Network services and network device services in Data Centers. *Control, navigation and communication systems*, 4 (28), 98-104 [in Russian].
5. Dovgiy, S. (2000). The state and problems of the development of the telecommunications network of Ukraine. *Science and scientific studies* [in Ukrainian].
6. Benzekki, Kamal, & El Fergougui, Abdeslam, & Elbelrhiti Elalaoui, Abdelbaki (2016). Software-defined networking (SDN): A survey. *Security and Communication Networks*, 9 (18): 5803–5833. <https://doi.org/10.1002/sec.1737>.
7. Montazerolghaem, Ahmadrza (2020). Software-defined load-balanced data center: design, implementation and performance analysis. *Cluster Computing*, 24 (2), 591–610. <https://doi.org/10.1007/s10586-020-03134-x>.
8. Montazerolghaem, Ahmadrza (2021). Software-defined Internet of Multimedia Things: Energy-efficient and Load-balanced Resource Management. *IEEE Internet of Things Journal*, 9 (3): 2432–2442. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3095237>. ISSN 2327-4662. S2CID 237801052.
9. Software-defined networking is not OpenFlow, companies proclaim. (2022). Retrieved from: searchsdn.techtarget.com.

10. InCNTRE's OpenFlow SDN testing lab works toward certified SDN product. (2022). Retrieved from: <https://www.techtarget.com/news/>.
11. Slyusar, V. I. (2008). Military communication of NATO countries: problems of modern technologies. *Electronics: Science, Technology, Business*, № 4, 66–71 [in Russian].
12. Retrieved from: <https://gdmissionsystems.com/communications/warfighter-information-network-tactical>.
13. Retrieved from: https://en.wikipedia.org/wiki/PM_WIN-T.
14. Warfighter Information Network-Tactical (WIN-T). (2012). Retrieved from: <https://peoc3t.army.mil/wint/index.php>.
15. Army tactical communication network organization reflects on its rich history. The United States Army. (2012). Army.mil. Retrieved 2012-10-14 from: <https://www.army.mil/article/78284/>.
16. Barabash, O., Open'ko, P., Kopiika, 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>.
17. 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”, 63 (3-4), 195–206.
18. 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.
19. 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].
20. Dovgyi, S. O. (2001). Privatization, Investment and the Stock Market: Legal Principles and Practice. In the 4th grade: Ukrtelecom [in Ukrainian].
21. Rubinstein, A. (2013). Lecture Notes in Microeconomic Theory. 2nd., Princeton University Press, ISBN 978-0-691-15413-8.
22. Kopiika, 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*, 29, 29–37 [in Ukrainian].
23. Choi, M.-J., & Hong, J.W.-K. (2007). Towards Management of Next Generation Networks. *IEICE Transaction Communications E Series B*, 90 (11), 3004-3014.
24. Balashov, V. A., Kopiika, O. V., & Lyakhovetsky, L. M. (2005). VDSL – near future of digital subscriber access. *Communication*, 4, 10–16 [in Russian].
25. P 1-02, DOD Dictionary of Military and Associated Terms (2001). As amended through 17 October 2008. "Archived copy" (PDF).
26. Retrieved from: https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/CommonOpER_HLT_0908-508.pdf
27. Retrieved from: <https://constanttech.com/what-a-common-operating-picture-means-for-mission-critical/>.
28. Kristine Steen-Tveit & Bjorn Erik Munkvold (2021). From common operational picture to common situational understanding. An analysis based on practitioner perspectives. *Safety Science*. Volume 142, October 2021, 105381. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105381>.
29. Kumsap, C., Mungkung, V., Amatacheewa, I., & Thanasomboon, A. (2018). Conceptualization of Military's Common Operation Picture for the Enhancement of Disaster Preparedness and Response during Emergency and Communication Blackout. *Procedia Engineering*, 212, 1241–1248.
30. Lelardeux, C. P., Panzoli, D., Lubrano, V., Minville, V., Lagarrigue, P. & Jessel, J.-P. (2017). Communication system and team situation awareness in a multiplayer real-time learning environment: application to a virtual operating room. *The Visual Computer*, 33 (4), 489–515.

31. Munkvold, B. E., Radianti, J., Rød, J. K., Opach, T., Snaprud, M., Pilemalm, S., & Bunker, D. (2019). In *Sharing Incident and Threat Information for Common Situational Understanding. Proceedings of the 16th ISCRAM Conference*, Spain.
32. Steen-Tveit, K. (2020). Identifying Information Requirements for Improving the Common Operational Picture in Multi-Agency Operations. In *Proceedings of the 17th ISCRAM Conference*, Virginia.
33. Steklov, V. K., & Berkman, L. N. (2006). Theory of electrical communication: Textbook for universities. K.: Technology [in Ukrainian].
34. Steklov, V. K., Berkman, L. N., & Kilchytskyi, E. V. (2004). Optimization and modeling of communication devices and systems. Understudy For higher education closing K.: Technology [in Ukrainian].
35. Berkman, L. N. (2014). Theoretical bases of methodology of synthesis of information and communication systems. *Telecommunication and information technologies*, 4, 12–20 [in Ukrainian].
36. Steklov, V. K., & Berkman, L. N. (2002). Designing telecommunication networks: a textbook for universities. K.: Technology. ISBN 966-575-070-4 [in Ukrainian].

The article was received 23.11.2022 and was accepted after revision 14.02.2023

Довгий Станіслав Олексійович

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

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

ORCID ID: 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, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: 0000-0003-0189-3915 **e-mail:** okopiyka@gmail.com

Козлов Олексій Сергійович

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: 0000-0003-1889-3153 **e-mail:** alexey.ua84@gmail.com

УДК 551.46.08

Oleksandr Shyptsov¹, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Corresponding Member of National Academy of Sciences of Ukraine, Director
ORCID ID: 0000-0002-6285-0663 *e-mail*: shiptsov53@gmail.com

Anton Gordeev¹, Doctor of Geographical Sciences, Senior Researcher, Deputy Director
ORCID ID: 0000-0002-7263-0525 *e-mail*: drangoru@gmail.com

Oleksii Lebid², Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-4003-8068 *e-mail*: o.g.lebid@gmail.com

Viacheslav Okhariev², Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6270-6293 *e-mail*: okhariev.vo@gmail.com

Roman Telychko², leading engineer
ORCID ID: 0000-0002-3574-7919 *e-mail*: roman.telychko@gmail.com

Sergiy Fedoseienkov¹, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of panoramic acoustic systems
ORCID ID: 0000-0002-9576-2977 *e-mail*: 22lex22s@ukr.net

Oleksiy Shundel¹, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-3076-9553 *e-mail*: lixyta666@gmail.com

¹State Institution «Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

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

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR AUTOMATION OF HYDDROPHISICAL SITUATION MOLELLING AND FORECASTING IN THE BLACK SEA REGION

***Abstract.** The article offers a solution to the scientific and applied problem of automating the acquisition and analysis of a certain set of hydrophysical indicators with the subsequent formation of a forecast of the hydrophysical situation in the Black Sea water area. This topic is of great relevance both in peacetime and in the conditions of the current armed aggression of the Russian Federation against Ukraine. The solved task is an important element of solving the more complex problem of operational obtaining of oceanographic data for highlighting the hydrographic situation in the Black Sea water area, collection, accumulation and visualization of oceanographic data in the interests of navigation and hydrographic support of users of such information. To solve this problem, a software environment was created for automatic search and selection of hydrophysical data, as well as their automatic input into specialized software for modeling and forecasting the hydrophysical situation with subsequent calculation of forecasts of hydrophysical fields. A set of the most important data was formed, which includes indicators of salinity, temperature, circulation. Automatic search and selection of meteorological and hydrophysical data takes place from international GFS and COPERNICUS profile databases. Also, to increase the effect of the simulations and forecasts,*

a specialized interface was developed for searching, visualization, and the possibility of downloading by the user the results of the forecast module of the mathematical modeling of the spatio-temporal variability of the hydrophysical fields of the northwestern part of the Black Sea. The developed scientific and practical approaches and toolkit are designed to function within the framework of the distributed and centralized Bank of Oceanographic Data of the National Academy of Sciences of Ukraine, part of which is an intellectual information system for highlighting the hydrographic situation in the Black Sea water area. The obtained results are also aimed at increasing the level of environmental safety in the Black Sea water area and can be used to monitor nature management in this region.

Keywords: hydrophysical situation; water area of the Black Sea; mathematical modeling; predictive model; automated information system; environmental safety.

О.А. Щипцов¹, А.Ю. Гордєєв¹, О.Г. Лебідь², В.О. Охарєв², Р.І. Теличко², С.Г. Федосєєнков¹, О.І. Шундель¹

¹Державна установа «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України», м. Київ, Україна

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ГІДРОФІЗИЧНОЇ ОБСТАНОВКИ В АКВАТОРІЇ ЧОРНОГО МОРЯ

***Анотація.** В статті пропонується вирішення науково-прикладної задачі автоматизації отримання та аналізу визначеного набору гідрофізичних показників з подальшим формуванням прогнозу гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря. Дана тематика має значну актуальність як для мирного часу, так і в умовах поточної збройної агресії Російської Федерації проти України. Розв'язана задача є важливим елементом вирішення більш комплексної проблеми оперативного отримання океанографічних даних для висвітлення гідрографічної обстановки в акваторії Чорного моря, збору, накопичення та візуалізації океанографічних даних в інтересах навігаційно-гідрографічного забезпечення користувачів такої інформації. Для вирішення даної задачі було створено програмне середовище для автоматичного пошуку та відбору гідрофізичних даних, а також їх автоматичного введення в спеціалізоване програмне забезпечення моделювання та прогнозування гідрофізичної обстановки з подальшим розрахунком прогнозів гідрофізичних полів. Було сформовано набір найбільш важливих даних, до якого входять показники солоності, температури, циркуляції. Автоматичний пошук та відбір метеорологічних та гідрофізичних даних відбувається з міжнародних профільних баз даних GFS та COPERNICUS. Також для підвищення ефекту від проведених моделювання та прогнозування було розроблено спеціалізований інтерфейс для пошуку, візуалізації та можливості завантаження користувачем результатів прогнозу модуля математичного моделювання просторово-часової мінливості гідрофізичних полів північно-західної частини Чорного моря. Розроблені науково-практичні підходи та інструментарій призначені для функціонування в рамках розподіленого та централізованого Банку океанографічних даних НАН України, частиною якого є інтелектуальна інформаційна система висвітлення гідрографічної обстановки в акваторії Чорного моря. Отримані результати також спрямовані на підвищення*

рівня екологічної безпеки в акваторії Чорного моря та можуть бути використані для моніторингу природокористування в цьому регіоні.

Ключові слова: *гідрофізична обстановка; акваторія Чорного моря; математичне моделювання; прогнозна модель; автоматизована інформаційна система; екологічна безпека.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>

Вступ

Україна від самого початку здобуття своєї незалежності здійснювала планомірні дослідження Чорного моря і, в першу чергу, північно-західної його частини [1–3]. Стратегічне значення даної акваторії зараз значно зросло внаслідок збройної агресії Російської Федерації проти України, відповідно, оперативне отримання прогнозів гідрофізичної обстановки стає критично важливою складовою національної безпеки.

В таких умовах важливого значення набуває задача оперативного отримання прогнозу гідрофізичної обстановки в Чорному морі. Її виконання забезпечується в рамках функціонування експериментального зразку гідрофізичного програмно-технологічного комплексу. Комплекс являє собою сукупність океанографічних методів досліджень, технічних засобів і обладнання, програмного забезпечення, які призначаються для використання в інтересах реалізації наукової складової військово-морської діяльності з метою досягнення очікуваного результату.

Виміри таких показників проводяться в безперервному режимі як контактними (безпосередньо в акваторії за допомогою спеціалізованих буїв та іншого обладнання), так і дистанційними (зондування Землі з космосу) методами [4]. Багаторічні масиви даних агрегуються у профільних міжнародних базах знань, деякі з яких (наприклад, COPERNICUS) надають відкритий доступ користувачам для подальшої обробки. Аналіз динаміки показників та побудова прогнозу гідрофізичної обстановки проводиться методами математичного моделювання, реалізованими у спеціалізованому програмному забезпеченні. Вибір, отримання та введення даних у таке ПЗ потребує часу та зусиль, а подальший процес побудови математичної моделі також потребує спеціалізованих знань та навичок, якими не завжди володіє оператор інформаційної системи. Відповідно, постає науково-прикладна задача розробки програмного середовища, що забезпечує автоматизацію вищеописаних процесів аж до побудови прогнозу гідрофізичної обстановки [5].

Мета роботи. Розробка програмного середовища автоматичного пошуку та відбору визначеного переліку гідрофізичних даних та автоматичного їх введення в спеціалізоване програмне забезпечення Delft 3D Mesh Suite із подальшою побудовою 10-добових прогнозів гідрофізичних полів для північно-західної частини Чорного моря, що розширить технічні можливості експериментального зразка гідрофізичного програмно-технологічного комплексу за рахунок створення на береговому сервері централізованого Банку океанографічних даних НАН України інтерфейсу модуля для пошуку, візуалізації та можливості завантаження користувачем результатів прогнозу гідрофізичних (метеорологічних) параметрів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Враховуючи специфіку поставленої в роботі науково-прикладної задачі, необхідно визначити критерії, за якими буде сформований перелік необхідних даних, що характеризують гідрофізичну обстановку. Під «гідрофізичною обстановкою» в даній роботі розуміємо результати вимірювань параметрів, що отримані як інструментальним шляхом (вимірювання безпосередньо в акваторії), так і дистанційними методами (космічний моніторинг тощо).

Основними вимогами до даних будемо вважати наступні:

- вимірність. Інформація повинна мати кількісний характер, це є необхідним для подальшого моделювання та прогнозування;
- регулярність. Дані мають надходити через рівний проміжок часу, причому така регулярність має бути забезпечена в довгостроковому аспекті;
- оперативність. Дані мають бути актуальними, тобто час на отримання та обробку має бути незначним;
- наочність. Інформація має адекватно висвітлювати динаміку гідрофізичної обстановки та відповідати саме тим задачам, які поставлені перед користувачем прогнозної моделі [6].

Отримувачем та агрегатором даних має бути розроблена в Науковому гідрофізичному центрі НАН України берегова інтелектуальна інформаційна система висвітлення гідрографічної обстановки в акваторії Чорного моря, зокрема Банк океанографічних даних як її критично важлива складова.

Враховуючи вимоги до даних та об'єктивні можливості їх отримання в поточних умовах, методом експертної оцінки [7, 8] був сформований наступний набір:

- гідрофізичні дані: солоність, температура, рівень поверхні води;
- океанографічні дані: цифрова модель рельєфу акваторії, представлена у вигляді набору батиметричних величин;
- метеорологічні дані: швидкість вітру; атмосферний тиск; хмарність; вологість; температура повітря.

Отримати океанографічні дані можна за допомогою різних методів доставки – правильний для вас залежить від випадку використання. Наприклад, історичні океанографічні дані зазвичай доступні для масового завантаження. З іншого боку, якщо необхідні оперативні дані, можна придбати дані у реальному часі, канали та потоки, щоб завантажити найновішу інформацію [9]. При цьому, існують авторитетні бази даних, що надають багаторічні дані у вільному режимі, потребуючі лише реєстрації на відповідному сервісі. Для виконання задач, поставлених в науково-технічній роботі, було обрано один з таких ресурсів, який надає оперативні, регулярні та достатньо повні актуалізації даних, в тому числі щодо акваторії Чорного моря, а саме базу знань проєкту Copernicus.

Copernicus заснований на трьох компонентах:

- космічна складова (спутники спостереження та відповідний наземний сегмент для спостереження наземних, атмосферних та океанографічних параметрів) [10]. Це включає в себе два типи супутникових місій, п'ять сімейств ESA Sentinel та інших космічних агентств;

- польові вимірювання (наземні та бортові мережі збору даних, що надають інформацію про акваторії, континентальну поверхню та атмосферу);
- сервіси, розроблені та керовані Copernicus і запропоновані своїм користувачам і громадськості в цілому.

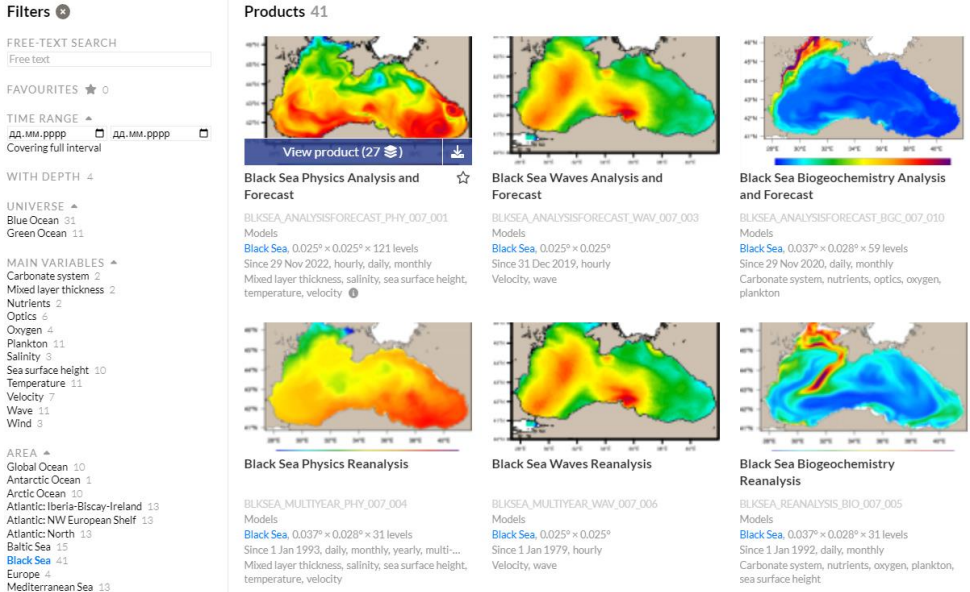


Рис. 1. Вікно виборки акваторії дослідження та типу гідрофізичних даних на порталі Copernicus Marine

Прогнозування гідрофізичної обстановки неможливе без точних та оперативних метеорологічних даних, таких як швидкість вітру; атмосферний тиск; хмарність; вологість; температура повітря [11]. Прогнозування метеорологічної ситуації – надзвичайно складна задача з точки зору математичного моделювання та вимог до програмної реалізації, відповідно, в світі працює лише декілька авторитетних прогнозних моделей, наприклад, ECMWF, GFS, METEOBLUE, ICON-EU. Для вирішення задач роботи було обрано застосування системи Global Forecast System (GFS) від NOAA (Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США).

Глобальна система прогнозування (GFS) – це система чисельного прогнозування погоди, яка містить глобальну комп’ютерну модель і варіаційний аналіз, що виконується Національною службою погоди США (NWS).

Математична модель запускається чотири рази на день і створює прогнози на 16 днів наперед, але зі зниженою просторовою роздільною здатністю через 10 днів. Здатності прогнозування зазвичай зменшуються з часом (як і з будь-якою моделлю числового прогнозування погоди), і для довгострокових прогнозів лише більші масштаби зберігають значну точність. Це одна з найкращих синоптичних моделей середньої дальності загального користування.

Модель GFS є моделлю з приблизною горизонтальною роздільною здатністю 13 км для днів (0-16 днів). По вертикалі модель поділена на

127 шарів і поширюється на мезопаузу (приблизно ~80 км), а тимчасово вона створює прогнозні дані щогодини протягом перших 120 годин, три години на 10-й день і 12 годин на 16-й день. Вихідні дані з GFS також використовуються для отримання статистики вихідних даних моделі.

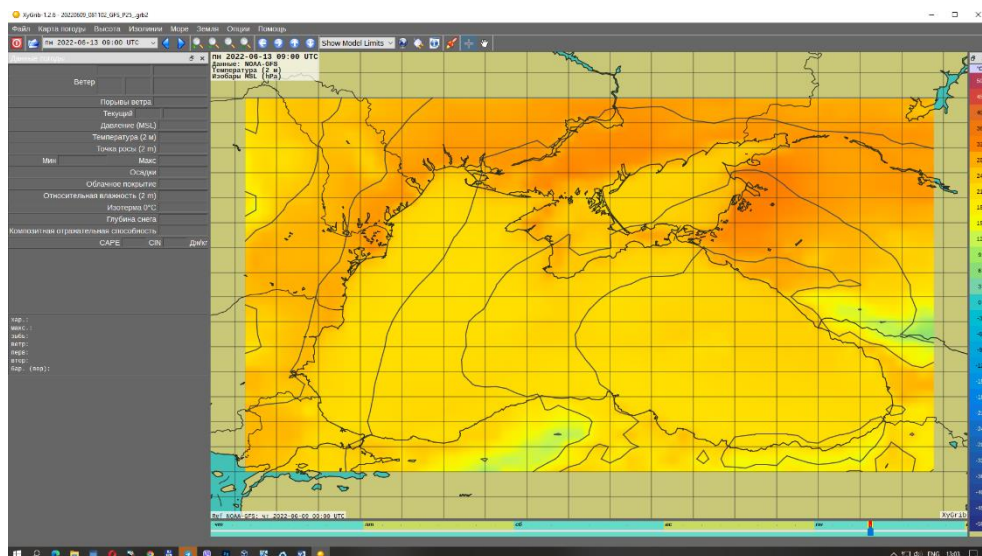


Рис. 2. Вікно вибору та завантаження гідрометеорологічних даних системи GFS проекту OpenGrib3

Для задач моделювання та прогнозування гідрофізичних показників пропонується використання спеціалізованого програмного забезпечення. Для цього було обрано програмний пакет Delft 3D Mesh Suite виробництва Deltares (Нідерланди). Delft3D – це провідний у світі пакет 3D-моделювання для дослідження гідродинаміки, транспортування наносів, морфології та якості води для річкових, естуарних і прибережних середовищ. Станом на сьогодні модулі Delft3D flow (FLOW), морфології (MOR) і хвиль (WAVE) доступні у форматі open source.

Модель Delft3D може бути застосована у таких областях:

- приливні та вітрові потоки, щільнісні градієнти та хвильові індуковані потоки;
- поширення спрямованих коротких хвиль над нерівною поверхнею дна, включаючи взаємодію хвильових течій;
- адвекція та дисперсія стоків рік;
- морфодинамічні обчислення;
- перенос домішок, наносів та осаду;
- дослідження якості води, включаючи екологічне моделювання, прогнозування концентрації важких металів, взаємодія з органічними та неорганічними зваженими наносами, взаємодія між водою та дном (наприклад, споживання кисню), цвітіння водоростей;
- відстеження частинок, включаючи розлив нафти тощо;
- початкові та/або динамічні (тимчасові) двовимірні морфологічні зміни, включаючи вплив хвиль на перемішування осаду та донних наносів.

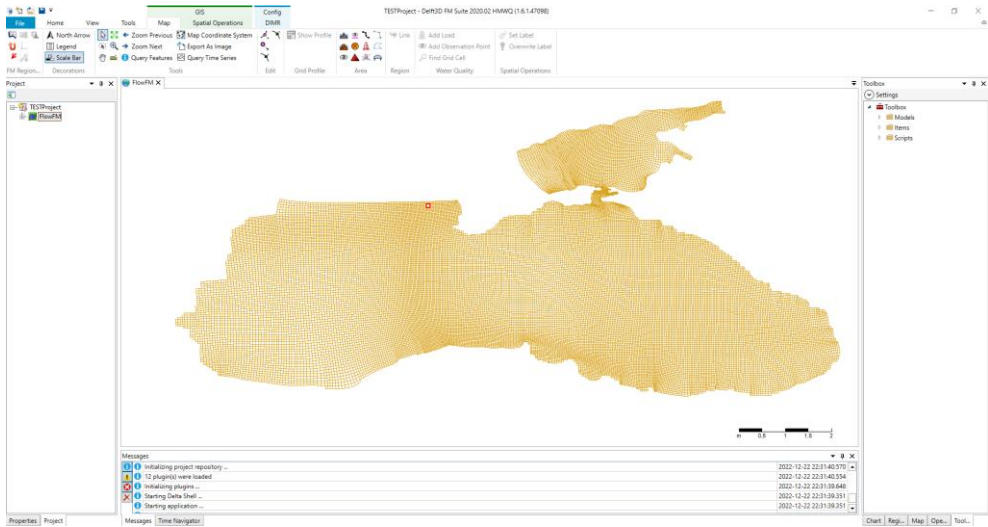


Рис. 3. Вікно проекту у програмному середовищі Delft 3D

Результати розрахунку можна візуалізувати та конвертувати в один із зручних графічних форматів (наприклад, PNG або GeoTIFF) у модулі QUICKPLOT, що розроблений у програмному середовищі MATLAB. Вікно побудови кінцевого зображення показано нижче на рисунку 4.

Задача створення спеціалізованого програмного середовища, що забезпечує автоматичний (без участі оператора) процес збору визначеного масиву даних, їх отримання та аналізу шляхом математичного моделювання та прогнозування у спеціалізованому програмному забезпеченні із подальшою побудовою прогнозу, зумовлює необхідність сформулювати вимоги до кінцевого продукту [5]. Перелік вимог є наступним:

- програмний продукт має бути інтегрованим з функціонуючим Банком океанографічних даних НАН України;
- розміщуватись на береговому сервері Наукового гідрофізичного центру НАН України;
- забезпечувати у визначений час із визначеною регулярністю пошук та завантаження даних температури, солоності, рівня поверхні води з ресурсу Copernicus.Marine (деталі наведені у додатку А) у форматі netCDF (.nc);
- забезпечувати пошук та завантаження даних метеорологічної моделі GFS;
- виконувати введення початкових даних у програмне середовище Delft3D Mesh Suite і проводити розрахунок прогнозів гідрофізичних полів (солоності, температури, циркуляції, вітру, атмосферного тиску) північно-західної частини Чорного моря на 10 діб із подальшою візуалізацією отриманої картографічної моделі в загальноприйнятих графічних форматах GeoTIFF та PNG;
- забезпечувати розміщення отриманих результатів на береговому сервері Банку океанографічних даних НАН України у спеціальному розділі.

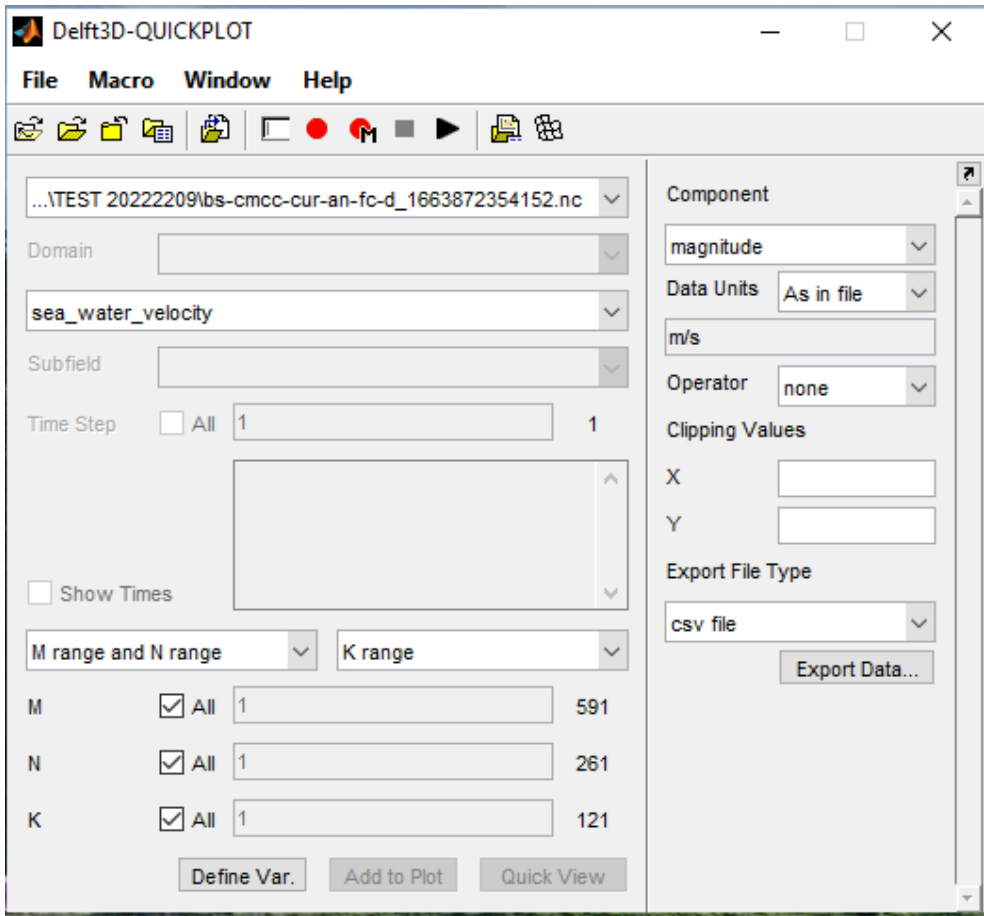


Рис. 4. Вікно побудови візуальної геомоделі у модулі QUICKPLOT

Модуль розташований на береговому сервері Банку океанографічних даних НАН України та частково інтегрований з його функціоналом. Модуль включає в себе наступні складові:

- Складова пошуку гідрофізичних даних;
- Складова відбору гідрофізичних даних;
- Складова прогнозування динаміки гідрофізичних показників;
- Складова візуалізації результатів прогнозування.

Характеристики розробленого модуля дозволяють забезпечувати автоматизований режим роботи вищеперерахованих складових.

Програмна складова звертається до встановленого на сервері програмного забезпечення Delft 3D Mesh Suite у автоматичному режимі. Також у автоматичному режимі відбувається візуалізація результатів шляхом автоматичного звернення до модуля QUICKPLOT (функціонує в середовищі MATLAB у рамках Delft 3D Mesh Suite). Скріншот робочого вікна та приклад результатів прогнозування наведені на рис. 5 та 6.

```
** INFO : Min. salinity limited, number of cells Limin = 1
** INFO : Min. salinity limited, min = -9.622455058695998E-004
** INFO : Min. salinity limited, number of cells Limin = 1
** INFO : Min. salinity limited, min = -7.437677439540357E-004
** INFO : Min. salinity limited, number of cells Limin = 1
** INFO : Min. salinity limited, min = -5.318552499746034E-004
** INFO : Min. salinity limited, number of cells Limin = 1
** INFO : Min. salinity limited, min = -3.203276324618805E-004
** INFO : Min. salinity limited, number of cells Limin = 1
** INFO : Min. salinity limited, min = -1.036162332718582E-004
** INFO : 0d 2:25:00 1d 21:35:00 0d 0:01:08 0d 0:21:30 547 5.0% 27.27273
** INFO : 0d 4:40:00 1d 19:20:00 0d 0:02:08 0d 0:19:46 520 9.7% 27.27273
** INFO : 0d 6:50:00 1d 17:10:00 0d 0:03:07 0d 0:18:45 494 14.2% 27.27273
** INFO : 0d 9:00:00 1d 15:00:00 0d 0:04:06 0d 0:17:47 468 18.8% 27.27273
** INFO : 0d 11:15:00 1d 12:45:00 0d 0:05:06 0d 0:16:39 441 23.4% 27.27273
** INFO : 0d 13:30:00 1d 10:30:00 0d 0:06:05 0d 0:15:34 414 28.1% 27.27273
** INFO : 0d 15:45:00 1d 8:15:00 0d 0:07:05 0d 0:14:31 387 32.8% 27.27273
** INFO : 0d 18:00:00 1d 6:00:00 0d 0:08:04 0d 0:13:27 360 37.5% 27.27273
** INFO : 0d 20:15:00 1d 3:45:00 0d 0:09:04 0d 0:12:25 333 42.2% 27.27273
** INFO : 0d 22:30:00 1d 1:30:00 0d 0:10:03 0d 0:11:23 306 46.9% 27.27273
** INFO : 1d 0:45:00 0d 23:15:00 0d 0:11:02 0d 0:10:22 279 51.6% 27.27273
** INFO : 1d 3:00:00 0d 21:00:00 0d 0:12:02 0d 0:09:21 252 56.2% 27.27273
** INFO : 1d 5:15:00 0d 18:45:00 0d 0:13:01 0d 0:08:20 225 60.9% 27.27273
** INFO : 1d 7:30:00 0d 16:30:00 0d 0:14:00 0d 0:07:20 198 65.6% 27.27273
** INFO : 1d 9:45:00 0d 14:15:00 0d 0:14:59 0d 0:06:20 171 70.3% 27.27273
** INFO : 1d 12:00:00 0d 12:00:00 0d 0:15:58 0d 0:05:19 144 75.0% 27.27273
** INFO : 1d 14:15:00 0d 9:45:00 0d 0:16:58 0d 0:04:19 117 79.7% 27.27273
** INFO : 1d 16:30:00 0d 7:30:00 0d 0:17:57 0d 0:03:20 90 84.4% 27.27273
** INFO : 1d 18:45:00 0d 5:15:00 0d 0:18:57 0d 0:02:20 63 89.1% 27.27273
** INFO : 1d 21:00:00 0d 3:00:00 0d 0:19:56 0d 0:01:20 36 93.8% 27.27273
** INFO : 1d 23:15:00 0d 0:45:00 0d 0:20:55 0d 0:00:20 9 98.4% 27.27273
```

Рис. 5. Робоче вікно модуля прогнозування гідрофізичної обстановки

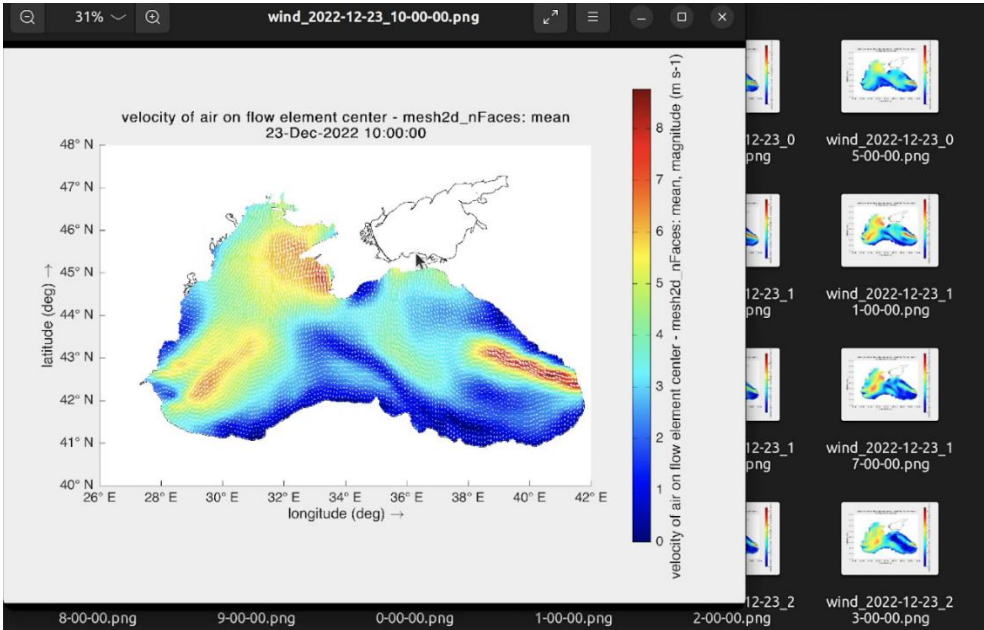


Рис. 6. Вікно видачі результатів роботи програмної складової, візуалізованих у форматі просторової геомоделі акваторії Чорного моря

Завершальним етапом роботи є створення модуля пошуку, візуалізації та можливості завантаження користувачем результатів прогнозу гідрофізичних параметрів. Нижче сформовані вимоги до його функціоналу:

- модуль має бути інтегрованим в єдину систему з Банком океанографічних даних НАН України;
- обов'язковою є наявність графічного інтерфейсу, що у зручній формі дозволяє проводити вибірку серед масиву прогнозних моделей за визначеним набором показників;

- модуль має містити блок пошуку прогнозу за наступними характеристиками: дата та час прогнозу; гідрофізичний параметр (солоність, температура води, циркуляція, вітер); глибина шару води, на який побудовано прогноз;
- наявність вікна візуалізації прогнозу у вигляді картографічної геомоделі, побудованої засобами Delft 3D Mesh Suite (конкретно, модуля QUICKPLOT).

Модуль математичного моделювання просторово-часової мінливості

Пошук прогнозу

Класичний

Дата:

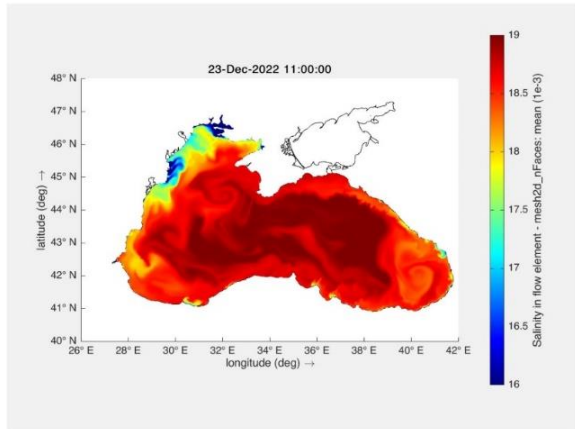
Час:

Гідрофізичний параметр:

Альтернативний

Гідрофізичний параметр:

Дата і час:



Завантаження прогнозу

[Зображення PNG](#)
[ГеоTIFF](#)
[Таблиця CSV](#)

Рис. 7. Інтерфейс модуля пошуку, візуалізації та можливості завантаження користувачем результатів прогнозу гідрофізичних параметрів

Висновки

За результатами досліджень, описаних в даній роботі, розглянуто питання збору багаторічних масивів гідрофізичної, океанографічної та метеорологічної інформації з міжнародних баз знань; визначено оптимальний перелік інформації, що є критично необхідною для оперативної оцінки гідрофізичної обстановки; створено програмне середовище, що забезпечує автоматизацію процесу збору визначеного масиву даних, їх отримання та аналізу шляхом математичного моделювання та прогнозування у спеціалізованому програмному забезпеченні із подальшою побудовою прогнозу; створено інтерфейс виведення результатів прогнозу модуля математичного моделювання просторово-часової мінливості гідрофізичних (метеорологічних) параметрів північно-західної частини Чорного моря, який дозволяє користувачу здійснювати пошук результатів прогнозу за датою, отримувати візуалізацію результатів прогнозу у вигляді картограм, завантажувати файли результатів прогнозу у графічних та ps.-форматах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Комплексные экспедиционные исследования 4-го рейса НИС «Киев» / Шипцов А.А., Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Лебедь А.Г. // Геофиз. журн. 1996. Т. 18, № 4, С. 83–84.
2. Геология Черного моря. (По результатам геологических и геофизических исследований 5-го рейса НИС «Киев») / Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Стажилов А.Г. и др. – Киев: ОМГОР ННПМ Украины, 1997. – 188 с.
3. Геология, геофизика и гидрография северо-западной части Черного моря / Е.Ф. Шнюков, А.В. Иванников, В.П. Коболев – Киев: Изд-во Государственной гидрографической службы Украины, 1998. – 221 с.
4. Шундель, О.І., Федосєєнков С.Г. Створення системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря шляхом його математичного моделювання. *Екологічна безпека та природокористування*. 2022. Т. 41, №1. С. 111–120. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.111-120>.
5. Тучковенко Ю.С., Кушнір Д.В., Гончаренко Р.В., Титюк Т.Г., Шипцов О.А. Автоматизований модельний комплекс для забезпечення діяльності Військово-Морських Сил України оперативними прогнозами океанографічних умов. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*. 2020. № 3(70). С. 75–83. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/75-83>.
6. Шундель О.І., Федосєєнков С.Г., Неверова С.І. Принципи створення структурних геологічних моделей неоднорідного шаруватого дна. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2021. Т. 17, № 4. С. 39–51. <https://doi.org/10.15407/grimo2021.04.039>.
7. Шундель О.І. Розробка математичної моделі шаруватого неоднорідного середовища як складової частини Банку океанографічних даних Національної академії наук України. *Океанографічний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*. 2021. №3 (14). С. 29–49. [https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20\(14\).36](https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20(14).36).
8. Голодов М.Ф., Гордєєв А.Ю., Нестеренко Л.В., Тимченко Ю.А., Федосєєнков С.Г., Шундель О.І., Шипцов О.А., Шипцов О.О. Гідрофізичні дослідження морського та річкового середовища. *Геофізичний журнал*. 2019. Т. 41, № 6. С. 111–127. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190070>.
9. Голодов М.Ф., Гордєєв А.Ю., Попов Ю.І., Федосєєнков С.Г., Шипцов О.А., Шипцов О.О. Комплексні морські (річкові) експедиційні дослідження – важливий напрям розвитку науково-технічного потенціалу морегосподарського комплексу країни. *Геофізичний журнал*. 2019. Т. 41, № 5. С. 206–221. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183631>.
10. Шипцов О.А. Цифровий вектор розвитку України: формування національної індустрії океанографічних геопросторових даних. *Геофізичний журнал*. 2021. Т. 43, № 1. С. 266–275. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225553>.
11. Шипцов О.А., Крета Д.Л., Лебідь О.Г., Шевякіна Н.А. Використання результатів дистанційного зондування Землі в задачах моніторингу навігаційно-гідрографічної обстановки. *Екологічна безпека та природокористування*. 2020. Т. 36, № 4. С. 66–76. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.66-76>.

Стаття надійшла до редакції 10.01.2023 і прийнята до друку після рецензування 13.03.2023

REFERENCES

1. Shchyptsov, A. A., Shnjukov, E. F., Kobolev, V. P., & Lebed', A. G. (1996). Comprehensive expeditionary research of the 4th cruise of the R/V "Kyiv". *Geofiz. zhurn.*, 18(4), 83–84.
2. Shnjukov, E. F., Kobolev, V. P., Stazhilov, A. G. et al. (1997). *Geology of the Black Sea*. (According to the results of geological and geophysical studies of the 5th cruise of the R/V Kyiv). Kyiv: OMGOR NNPM Ukrainy [in Russian].

3. Shnjukov, E. F., Ivannikov, A. V., & Kobolev, V. P. (1998). Geology, geophysics and hydrography of the north-western part of the Black Sea. Kiev: Izd-vo Gosudarstvennoy gidrograficheskoy sluzhby Ukrainy [in Russian].
4. Shundel, A. I., & Fedoseenkov, S. G. (2022). Creation of a system of comprehensive monitoring of the aquatic environment state of the Black Sea by its mathematical modeling. *Environmental Safety and Natural Resources*, 41(1), 111–120 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.111-120>.
5. Tuchkovenko, Yu. S., Kushnir, D. V., Honcharenko, R. V., Tytiuk, T. H., & Shchypstov, O. A. (2020). An automatized modeling complex to support the activity of the Naval Forces of Ukraine by providing the operational forecasts of oceanographic conditions. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy im. I. Cherniakhovskoho*, 3(70), 75–83 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/75-83>.
6. Shundel, O. I., Fedoseienkov, S. H., & Nevierova, S. I. (2021). Principles of formation of structural geological models of heterogeneous layered bottom. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, 17(4), 39–51 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/gpimo2021.04.039>.
7. Shundel, O. I. (2021). Development of a mathematical model of a layered heterogeneous environment as a component of the Oceanographic Data Bank of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Okeanohrafichnyi zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen Svitovoho okeanu)*, 3(14), 29–49 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20\(14\).36](https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20(14).36).
8. Golodov, M. F., Gordieiev, A. Y., Nesterenko, L. V., Tymchenko, Y. A., Fedoseenkov, S. G., Shundel, O. I., Shchypstov, O. A., & Shchypstov, O. O. (2019). Hydrophysical Research of marine and Riverine Environments. *Geofizicheskii Zhurnal*, 41(6), 111–127 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190070>.
9. Golodov, N. F., Gordeyev, A. Y., Popov, Y. I., Fedoseenkov, S. G., Shchypstov, O. A., & Shchiptsov, O. O. (2019). Complex marine (river) expeditionary studies – an important direction of development of scientific and technical potential of the sea-economy complex of the country. *Geofizicheskii Zhurnal*, 41(5), 206–221 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183631>.
10. Shchypstov, O. A. (2021). Digital Vector of Ukraine development: Formation of national industry of Oceanographic Geospatial Data. *Geofizicheskii Zhurnal*, 43(1), 266–275 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225553>.
11. Shchypstov, O. A., Kreta, D. L., Lebid, O. G., & Sheviakina, N. A. (2020). Use of remote sensing results in the tasks of navigational and hydrographic situation monitoring. *Environmental Safety and Natural Resources*, 36(4), 66–76 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.66-76>.

The article was received 10.01.2023 and was accepted after revision 13.03.2023

Щипцов Олександр Анатолійович

доктор географічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В
ORCID ID: 0000-0002-6285-0663 **e-mail:** shiptsov53@gmail.com

Гордєєв Антон Юрійович

доктор географічних наук, старший дослідник, заступник директора з наукової роботи Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В
ORCID ID: 0000-0002-7263-0525 **e-mail:** drangoru@gmail.com

Лебідь Олексій Григорович

доктор технічних наук, старший дослідник, заступник директора з наукової роботи Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: 0000-0002-4003-8068 *e-mail:* o.g.lebid@gmail.com

Охарєв Вячеслав Олександрович

кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: 0000-0001-6270-6293 *e-mail:* okhariev.vo@gmail.com

Теличко Роман Ігорович

провідний інженер Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: 0000-0002-3574-7919 *e-mail:* roman.telychko@gmail.com

Федосєнков Сергій Генадійович

кандидат геологічних наук, завідувач відділу панорамних акустичних систем Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В

ORCID ID: 0000-0002-9576-2977 *e-mail:* 22lex22s@ukr.net

Шундель Олексій Іванович

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу панорамних акустичних систем Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

Адреса робоча: Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В

ORCID ID: 0000-0002-3076-9553 *e-mail:* lixyta666@gmail.com

УДК 550.34:504.05

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

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

EXPLORATION AND EXTRACTION OF DEEP MINERALS WITHOUT MINES AND QUARRIES WITH THE HELP OF NUCLEAR AUTONOMOUS THERMAL DRILLS-GEOPRODES

Abstract. *The Earth's interior at 10–15 km depth horizons is a geostrophysical space within which direct contact access of research instruments and other devices is not yet possible. At the same time, the list of fundamental and applied tasks that can be solved with the help of direct contact deep research of deep matter with the delivery of its samples to the surface of the Earth is a rather voluminous process and has an extraordinary scientific and technical significance, physical significance. Extraction of deep minerals without mines and quarries with the help of nuclear geosondes, for this it is necessary to consider the hydrodynamic problem of the vertical melt flow from the front part of the geosonde in the opposite direction to the movement of the geosonde vector. The need for a comprehensive consideration of thermophysical and hydrodynamic problems is justified by the presence of a common parameter – the speed of the geosonde as a heat source. The paper examines aspects of the theory and construction of autonomous nuclear deep thermal drills-geoprobess, which are used to solve fundamental scientific and applied industrial tasks, as well as significantly reduce the ecological burden on the environment with the help of geotechnical methods and means of exploration and extraction of deep minerals. The purpose of this work is a detailed theoretical study of the most fundamental possibility of creating ultra-deep nuclear autonomous geoprobess-thermodrills and an assessment of the main engineering parameters of the heat and mass transfer process in real conditions of contact melting of deep rocks. The results of theoretical studies show that the possibility of deep thermal penetration is theoretically substantiated quite correctly. Moreover, even today the problem of creating an ultra-deep geosonde is a fundamentally solvable scientific-technical and engineering-physical task. New deep industrial geotechnologies are a fundamentally new concept of greening the mining process and are suitable for the development of poor and deep ore horizons for which the construction of mines or quarries is impractical or impossible.*

Keywords: *thermal drilling; nuclear reactor; autonomous thermodrill-geoprobe; geotechnologies.*

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

РОЗВІДКА ТА ВИДОБУТОК ГЛИБИННИХ КОРИСНИХ КОПАЛИН БЕЗ ШАХТ І КАР'ЄРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЯДЕРНИХ АВТОНОМНИХ ТЕРМОБУРІВ-ГЕОЗОНДІВ

Анотація. Надра Землі на горизонтах глибин 10–15 км є геоастрофізичним простором, у межах якого поки неможливий безпосередній контактний доступ дослідницьких приладів та інших пристроїв. Водночас перелік фундаментальних і прикладних завдань, які можна вирішити за допомогою прямоконтактних глибинних досліджень глибинної речовини з доставкою її зразків на поверхню Землі, досить об'ємний і має надзвичайну науково-технічну значимість та інженерно-фізичну цінність. Видобуток глибинних корисних копалин без шахт і кар'єрів за допомогою ядерних геозондів потребує розгляду гідродинамічної задачі вертикального потоку розплаву від лобової частини геозонда в протилежному напрямку до руху вектора геозонду. Необхідність комплексного розгляду теплофізичних і гідродинамічних задач обґрунтовується наявністю загального параметра – швидкості руху геозонда як джерела тепла. У роботі розглянуто аспекти теорії та побудови автономних ядерних глибоких термічних бурів-геозондів, використання яких має велике значення для істотного зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище. Метою даної роботи є детальне теоретичне дослідження найбільш принципової можливості створення надглибинних ядерних автономних геозондів-термобурів та оцінка основних інженерних параметрів процесу тепломасообміну в реальних умовах контактного плавлення глибинних порід. Результати теоретичних досліджень показують, що можливість глибинного термічного проникнення теоретично обґрунтовується достатньо коректно. На сьогодні проблема створення надглибинного геозонду є принципово вирішуваним науково-технічним та інженерно-фізичним завданням. Нові глибинні промислові геотехнології – це нова концепція екологізації процесу видобутку корисних копалин, і вони придатні для розробки бідних та глибоких рудних горизонтів, для яких недоцільне або неможливе спорудження шахт чи кар'єрів.

Ключові слова: термобуріння; ядерний реактор; автономний термобур-геозонд; геотехнології.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.104-110>

Вступ

Земні надра на глибинних горизонтах 10–15 км є геоастрофізичним простором, у межі якого безпосередній контактний доступ для дослідницьких приладів та інших пристроїв поки що неможливий. При цьому перелік фундаментальних та прикладних задач, що можуть бути вирішені за допомогою прямих контактних глибинних досліджень глибинної речовини з доставкою її проб на поверхню Землі, досить об'ємний і має надзвичайну наукову та інженерно-фізичну цінність [1].

Однак, не дивлячись на сучасний прогрес у технологіях глибокого буріння, досі не вдається підняти на поверхню Землі зразки речовини земної мантії. На

глибинах близько 10 км температура земних надр досягає приблизно 300–350°C, а на глибинах близько 12 км її значення може сягати понад 530°C.

При таких температурах будь-які бурові розчини стають непридатними для використання. Додатковим обмеженням глибинного буріння є високий тиск в глибинних надрах Землі, який призводить до блокування та руйнування бурових механізмів. Крім того, у тріщинуватих породах на стінках свердловини внаслідок динамічних навантажень утворюються каверни, які також заважають бурінню.

Досвід Кольської надглибокої свердловини показав, що навіть з використанням найсучаснішого бурового обладнання проходження свердловини глибиною до 15 км займе понад 20 років і вимагатиме сотень мільйонів доларів.

Вигідною альтернативою традиційному глибокому бурінню в умовах високих температур і тисків може стати метод термічного проплавлення порід за допомогою автономних термобурів-геозондів з потужними автономними теплогенераторами. Для таких пристроїв висока температура стає робочим параметром і втрачає свої обмежувальні властивості. Спростується також і проблема захисту від високих тисків.

Серед відомих на сьогодні генераторів теплової енергії з досить тривалим терміном її генерації найпотужнішими є ядерні реактори. Розігрітий ядерним теплом геозонд-термобур з тугоплавким корпусом буде розплавляти породу, що контактує з ним, і під власною вагою опускатиметься углиб земних надр. При цьому в земних породах до певних глибин можна забезпечити такий заданий тепловий режим термобуріння, при якому стінки свердловини над геозондом будуть зміцнюватися склоподібним шаром охолодженого розплаву.

Головною метою даної роботи є детальне теоретичне дослідження самої принципової можливості створення надглибинних ядерних автономних геозондів-термобурів та оцінка основних інженерних параметрів процесу тепломасоперенесення в реальних умовах контактного плавлення глибинних земних порід.

Основний зміст

До початку нинішнього століття не проводилися детальні теоретичні, фізико-математичні та інженерно-фізичні аналізи проблеми глибинного проникнення в земні надра, за допомогою автономного ядерного термобура при тих теплових параметрах, які йому може забезпечити реальний ядерний реактор з реально прийнятними габаритно-масовими характеристиками [2].

Задача про вертикальний рух геозонду в гірських породах або крижаних товщах внаслідок їх проплавлення зводиться до розгляду самоузгодженого процесу поширення тепла від поверхні корпусу геозонду через шар розплаву навколо нього до твердої породи для її прогрівання та плавлення. При цьому також необхідно розглянути гідродинамічну задачу про вертикальне перетікання розплаву від лобової частини геозонду в протилежному до вектора його руху напрямку.

Необхідність комплексного розгляду теплофізичної та гідродинамічної задач обґрунтовується наявністю загального параметра – швидкості руху геозонду як теплоджерела. Для створення математичної моделі, адекватної по відношенню до процесів тепломасоперенесення при контактному плавленні, використовувану систему рівнянь необхідно замкнути рівнянням поширення тепла в оточуючій породі. Цю систему рівнянь можна вирішити шляхом

введення малого безрозмірного параметра, який визначається відношенням найменшої товщини шару розплаву до величини характерного розміру самого геозонду. Значення цього параметра можуть змінюватися в діапазоні величин від 10^{-3} до 10^{-4} .

Далі методом чисельного комп'ютерного інтегрування можна отримати із заздалегідь заданою точністю наступні головні вихідні інженерно-фізичні параметри: швидкість руху геозонду, товщину шару розплаву навколо геозонду, поля швидкостей та температур розплаву та температуру нагріваючої поверхні геозонду.

Для оптимального за масо-габаритними параметрами геозонду, з реально можливою щільністю теплового потоку в 1 МВт/м^2 через його поверхню в напрямку руху в реальних гірських породах результати оцінки дають значення швидкості опускання геозонду до 10 м/годину , що в десятки разів перевищує швидкість проходження традиційними буровими методами. За такої швидкості для неперервного проходження всієї земної кори з товщиною приблизно в $30\text{--}40 \text{ км}$ потрібно від 125 до 167 діб. А в активну зону ядерного реактора потрібно завантажити близько 100 кг ядерного палива з U235 , що добре узгоджується з характеристиками сучасних малогабаритних ядерних реакторів.

Слід також відмітити, що для оптимізації процесу термобуріння значну роль відіграє форма теплоактивної робочої поверхні. При цьому основними оцінюючими критеріями є швидкість опускання геозонду та коефіцієнт корисної дії (ККД), що визначається як відношення мінімальної потужності, що витрачається на забезпечення вертикального руху геозонду із заданою швидкістю, до всієї потужності, що знімається з робочої поверхні геозонду.

Розрахунки конструкцій геозондів з ізотермічною поверхнею однакової потужності дали найкращі показники для параболічної поверхні нагрівання. Результати теоретичних досліджень показують, що можливість глибинного термічного проникнення теоретично обґрунтовується достатньо коректно. Більше того, вже сьогодні проблема створення надглибинного геозонду є принципово вирішуваним науково-технічним та інженерно-фізичним завданням.

Створення геозонда, здатного працювати при тиску 7000 бар та при температурах 1600°C , дозволить здійснити транскорове кероване проникнення в надра Землі. Звичайно, що для керування геозондом потрібні спеціальні термостійкі пристрої та керувально-вимірювальні прилади, здатні працювати в екстремальних термобаричних умовах. Тому термічний метод буріння, що розглядається, не має альтернативи серед інших відомих методів буріння за швидкістю та глибиною проникнення в земні надра. А обмеження ядерного термобуріння визначаються, в основному, кількістю ядерного пального, термостійкістю конструкційних матеріалів та характеристиками міцності самої конструкції геозонду. Важливим для створення ядерного геозонду-термобуру також є наявність та можливість вибору ядерного теплогенератора та конструкційних матеріалів і комплектуючих для основних систем геозонду – корпусної оболонки та його лобової теплової “коронки”. Необхідні матеріали повинні поєднувати високу міцність, хімічну стійкість, теплопровідність, термостійкість, задану електропровідність та інші властивості.

Сучасні конструкційні матеріали здатні забезпечити роботу геозонду при температурах до 1600°C і вище, тоді як температура плавлення більшості реальних гірських порід, що входять до складу земної кори, становить 1100°C .

Крім цього, в таких температурних умовах конструкція геозонду повинна витримувати високі тиски і мати високу хімічну та радіаційну стійкість. Для цього прийнятні матеріали з карбідної та нітридної кераміки. Нітридо-кремнієві матеріали відносяться до діелектриків, а карбідо-кремнієві – до напівпровідників. Крім керамічних матеріалів, для створення лабораторних моделей геозондів та проведення з ними дослідницьких випробувань можуть використовуватися графітові матеріали. Будучи доступними та недорогими, вони поступаються кераміці лише за хімічною стійкістю та механічною міцністю.

В даний час в Антарктиді здійснюється багаторічний Європейський буровий проєкт ЕРІСА з вибурування глибинних крижаних кернів. Виконується цей проєкт спільно Бельгією, Францією, Голландією, Німеччиною, Італією, Норвегією, Швецією, Швейцарією та Великою Британією.

Проходження льодової свердловини глибиною до 4 кілометрів в умовах Антарктиди вимагає значних ресурсів. У майбутньому нові автономні термокригобури повинні виключати застосування екологічно небезпечних незамерзаючих рідин, що використовуються в сучасних засобах льодового термобуріння.

Взагалі прикладне промислове застосування термозондів може бути найрізноманітнішим і несподіваним. Автономні промислові термобури роблять можливим створення нових геотехнологій, застосування яких не вимагатиме присутності гірників під землею та не завдаватиме екологічної шкоди навколишньому середовищу тому, що супроводжуються гігантськими териконами та відвалами породи.

Сучасне підземне підприємство лише за добу поглинає під землю до 200 кубометрів кріпильного добірного лісоматеріалу, до 250 тисяч кубометрів повітря, 200 тисяч кіловат годин електроенергії, 2 500 тонн вибухівки. Під землю подаються труби, рейки, металоконструкції, побутове обладнання та матеріали. Крім того, у вугільних басейнах з кожної тонни вугілля на поверхню відкачуються десятки тонн води. А збільшення глибин видобутку копалин помітно знижує якісні показники видобутку.

Легкодоступні для розробки пласти вже вироблені або рухаються до цієї межі, тому розвиток гірничодобувної підземної промисловості потребує нових вкладень. Підземні розробки копалин на сьогодні поглибилися до 600 метрів і більше. Однак на таких глибинах в умовах підвищення тиску гірських порід людина з традиційною технікою вже не здатна керувати підземними ситуаціями та процесами і бути їх господарем.

Сучасні геотехнології є продуктом геології, фізики, хімії та інших наук. Такий прогресуючий конгломерат наук у майбутньому обов'язково запропонує нові, важливі для практики, методи видобутку копалин, які залучать до сфери геотехнологій традиційні та нові корисні копалини. Нові глибинні промислові геотехнології – це принципово нова концепція екологізації процесу видобутку корисних копалин, і вони придатні для розробки бідних та глибоких рудних горизонтів, для яких недоцільне або неможливе спорудження шахт чи кар'єрів. У надра Землі можна перенести навіть частину ливарного процесу. А перелік корисних копалин, які можна добувати геотехнічними методами, великий.

Іншим перспективним застосуванням є можливість розвитку нових методів доступу до невичерпних джерел геотермальної енергії, використовуючи різні види агрегатного стану енергоносіїв, а також комбінованих циклів геоенергетичних технологій.

Таким чином, автономні зонди-геонавти, що можуть запускатися в напрямку, діаметрально протилежному космічним вертикалям, а саме – у геокосмічні надра нашої Землі, є по своїй суті геокосмічною технікою. І чим швидше буде створено таку принципово нову техніку, тим швидше гірничодобувна промисловість набуде нових максимально екологічних методів одержання корисних копалин без шахт та кар'єрів. Використовуючи ядерний реактор під Землею як теплогенератор, можна забезпечити необхідний діапазон робочих температур і закачувати під Землю холодні реагенти для їх нагрівання "на місці" до ефективних робочих температур.

Висновки

На сьогодні існує можливість створення безпечних ядерних реакторів, що працюють на найпоширенішому у природі та дешевому ізотопі ^{238}U . В основу створення таких реакторів покладено концептуальну ідею надповільного нейтронно-ядерного фронтального горіння Феоктистова-Теллера, суть якої полягає в тому, що головним гальмом і абсолютним захистом проти вибухового розвитку ядерної реакції в ядерних енергетичних конструкціях має бути фізичний закон – не автоматика, не багатоступінчасті бар'єри безпеки, і навіть не оператор-людина, яка в системі управління ядерним об'єктом є найбільш слабкою ланкою, а непереможні закони фізики. Реактори з внутрішньою безпекою відповідно до точного висловлювання відомого фізика-ядерника Л. П. Феоктистова – це ядерні установки, які ніколи не вибухають. Такі ядерні реактори, на відміну від традиційних реакторів, не вимагають надкритичного завантаження ядерного палива, а отже, принципово не здатні вибухнути. В них також виключається участь оператора [3–6], а також вилучаються з ядерного паливного циклу технологічні процеси збагачення ядерного палива – в їхніх активних зонах спалюється природний і навіть технічний U^{238} при відсутності системи регулювання реактивності реактора, а ступінь вигорання палива може досягати 5–70% і вище.

Такі безпечні реактори можна використовувати в будь-яких важкодоступних місцях планети. Їх створення може позитивно вплинути на розвиток багатьох матеріальних та духовних цінностей у суспільстві, кардинально змінити технологічний стан та економіку майбутньої ядерної енергетики світу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Феоктистов Л.П. Нейтронно-подільна хвиля, ДАН СРСР, 1989, Т. 309, С. 864.
2. Андриевский Р.Л., Спивак И.И. Нитрид кремния и материалы на его основе. М.: Металлургия, 1984. – 137 с.
3. Ващенко В.Н. Очаги глубокофокусных землетрясений. – Киев, 1995 г. – 96 с.
4. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Оптимальное управление нагревом металла. – М.: Металлургия, 1972, 440 с.
5. В.И. Белый, Л.Л. Васильева, В.А. Грищенко и др. Нитрид кремния в электронике – М.: Наука, 1982. – 197 с.
6. Ващенко В.М., Писаренко Т.В. Про можливості контактного понадглибинного проникнення // Вісник Київського університету. Сер. ф.-м.наук. – 1995. – №1. – С. 326–336.
7. Ващенко В.М., Писаренко Т.В. Проблеми вибору конструкційних матеріалів для понадглибинних термозондів // Вісник Київського університету. – Серія ф.-м. наук, 1998, №1, С. 318–330.

8. Ващенко В.Н., Писаренко Т.В. Проблемы и техника контактного проникновения в глубинные недра космических объектов // Сучасні технології в аерокосмічному комплексі. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 9–11 вересня 1997 року, Житомирський інженерно-технологічний інститут. 1997. С. 21–22.
9. Ващенко В.Н., Писаренко Т.В. Экологические проблемы, связанные с глубоинной добычей энергоресурсов // Тезисы докл. VI конф. стран СНГ «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». – 1996. – С. 76–77.
10. Ващенко В.Н., Писаренко Т.В., Ярмоленко В.К. Проблемы разведки нетрадиционных источников углеводородов в серпентинизированном слое континентальной коры // Тезисы докл. VIII конф. стран СНГ «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». – Севастополь, 1998. – С. 68–70.

Стаття надійшла до редакції 09.11.2022 і прийнята до друку після рецензування 16.02.2023

REFERENCES

1. Feoktistov, L. P. (1989). Neutron splitting wave. *DAN USSR*, 309, 864.
2. Andrievsky, R. L., & Spivak, I. I. (1984). Silicon nitride and ero-based materials. Moscow: Metallurgy [in Russian].
3. Vashchenko, V. N. (1995). Sources of deep-focus earthquakes. Kyiv [in Russian].
4. Butkovsky, A. G., Maly, S. A., & Andreev, Y. N. (1972). Optimal control of metal heating. Moscow: Metallurgy [in Russian].
5. Bely, V. I., Vasilyeva, L. L., Hryshchenko V. A. et al. (1982). Silicon nitride in electronics. Moscow: Nauka [in Russian].
6. Vashchenko, V. M., & Pisarenko, T. V. (1995). On the possibilities of contact over-depth penetration. *Bulletin of the Kyiv University, Ser. Ph.-M.Sc.*, 1, 326–336 [in Ukrainian].
7. Vashchenko, V. M., & Pisarenko, T. V. (1998). Problems of choosing structural materials for deep-sea thermoprobes. *Bulletin of Kyiv University, Ser. Ph.-M.Sc.*, 1, 318-330 [in Ukrainian].
8. Vashchenko, V. N., & Pisarenko, T. V. (1997). Problems and techniques of contact penetration into the deep bowels of space objects. In *Modern technologies in the aerospace complex. Materials of the III International Scientific and Practical Conference* (pp. 21-22). Zhytomyr Institute of Engineering and Technology [in Russian].
9. Vashchenko, V. N., & Pisarenko, T. V. (1996). Environmental problems associated with deep mining of energy resources. In *Theses dokl. VI Conf. of CIS countries "Problems of ecology and operation of energy facilities"* (pp. 76-77) [in Russian].
10. Vashchenko, V. N., Pisarenko, T. V., & Yarmolenko, V. K. (1998). Problems of exploration of non-traditional sources of hydrocarbons in the serpentinized layer of the continental crust. In *Theses dokl. VIII Conf. CIS countries "Problems of ecology and operation of energy facilities"* (pp. 68–70). Sevastopol [in Russian].

The article was received 09.11.2022 and was accepted after revision 16.02.2023

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

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

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

УДК 504.063

Artem Goncharenko, graduate student

ORCID ID: 0000-0001-5647-1360 *e-mail*: hosting.pat@gmail.com

Rostyslav Sipakov, PhD

ORCID ID: 0000-0002-0862-5043 *e-mail*: sipakov.rv@knuba.edu.ua

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

THE FORMATION OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION EMISSIONS FROM SEPARATE EXPLOSIONS AS A RESULT OF MILITARY OPERATIONS

***Abstract.** As is well known, military operations in urbanized areas lead to deterioration of atmospheric air quality. The article examines the model of the formation of atmospheric polluted air from individual explosions as a result of military operations. A technique based on the theory of the convective jet is proposed for estimating the concentrations of hazardous substances formed above the burning area as a result of the explosion. The proposed approach makes it possible to obtain the concentration of pollutants in the conditions of emission into the atmosphere open to solar radiation at a height of three or more diameters of the explosion funnel (or the conventional diameter of the warm surface), the temperature and speed of hot air jets over the warm surface, the consumption of the desired substance. The obtained data make it possible to calculate the emission of hazardous substances into the atmosphere according to the formulas for a high unshaded source of pollution depending on the meteorological conditions of the area, to determine the concentration of the main acid-forming substances when assessing the probability of acid precipitation, and to serve as a basis for modern innovative atmospheric air monitoring systems.*

An assessment of the existing approach to determining atmospheric air pollution due to the impact of X-101 missile fragments in Kyiv on December 16, 2022 was made, which is a confirmation of the validity of this approach when calculating the impact of a separate explosion on atmospheric air quality. Calculated emissions of pollutants and their concentrations in the air in the upper part of the convective polluted jet in the case of separate explosions of the Kalibr cruise missile, the Kh-101 missile and the BUK-M1 projectile. The error from the comparison of these calculation results with the atmospheric air monitoring system depends on the nearest active observation points. This approach to assessing and forecasting concentrations of pollutants in atmospheric air can be used under neutral atmospheric conditions that determine the emission of pollutants and transformations of chemical substances in the air.

***Key words:** military operations; separate explosion; atmospheric air quality; convective jet.*

© А.В. Гончаренко, Р.В. Сіпаков, 2023

А.В. Гончаренко, Р.В. Сіпаков

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

ФОРМУВАННЯ ЕМІСІЇ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД ОКРЕМИХ ВИБУХІВ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

***Анотація.** Як відомо, воєнні дії на урбанізованих територіях призводять до погіршення якості атмосферного повітря. В статті розглянуто модель формування атмосферного забрудненого повітря від окремих вибухів внаслідок воєнних дій. Запропоновано методика, що заснована на теорії конвективного струменя при оцінці концентрацій небезпечних речовин, що утворюється над площею горіння внаслідок вибуху. Пропонований підхід дозволяє отримувати концентрації забруднюючих речовин в умовах емісії у відкриту сонячному випромінюванню атмосферу на висоту до трьох і більше діаметрів воронки вибуху (або умовного діаметра теплої поверхні), температуру та швидкість гарячого струменя повітря над теплою поверхнею, витрату шукваної речовини. Отримані дані дозволять в подальшому розраховувати емісію в атмосферу небезпечних речовин за формулами для високого незатіненого джерела забруднення в залежності від метеорологічних умов місцевості, визначати концентрацію основних кислотоутворюючих речовин при оцінці імовірності випадіння кислотних опадів та слугувати підосною для сучасних інноваційних систем моніторингу атмосферного повітря.*

Зроблено оцінку існуючого підходу до визначення забруднення атмосферного повітря внаслідок попадання уламків ракет типу X-101 в м. Києві 16 грудня 2022 року, що є підтвердженням правомірності даного підходу при розрахунках впливу окремого вибуху на якість атмосферного повітря. Розраховані викиди забруднюючих речовин та їх концентрації в повітрі у верхній частині конвективного забрудненого струменя у випадку окремих вибухів крилатої ракети «Калібр», ракети «X-101» та снаряду «БУК-М1». Похибка від співставлення даних результатів розрахунку з моніторинговою системою атмосферного повітря залежить від відстані до найближчих діючих пунктів спостережень. Даний підхід до оцінки та прогнозування концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі можна використовувати при нейтральних умовах атмосфери, що визначають емісію забруднень та перетворень хімічних речовин в повітрі.

***Ключові слова:** воєнні дії; окремі вибухи; якість атмосферного повітря; конвективний струмінь.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.111-120>

Вступ

Внаслідок російської воєнної агресії в Україні, останнім часом ворог завдає окремих ракетних ударів по цивільній інфраструктурі у великих містах, що призводить, крім людських втрат та руйнування матеріальних об'єктів, також до значного забруднення атмосферного повітря міського середовища. Низкою авторів доведено вплив військової діяльності та воєнних дій внаслідок агресії на глобальні екологічні проблеми [1, 2, 3 та ін.]. Для визначення кількості небезпечних речовин, що вивільняються в атмосферу під час вибуху, в тому числі і таких, що впливають на зміну клімату в глобальному масштабі або проходять повне окислення та спричиняють кислотні дощі, необхідно мати

зручний математичний апарат, який засновано на застосуванні методів математичного моделювання, методів статистичного аналізу та врахуванні законів хімічної кінетики. Крім цього, слід зазначити, що невід'ємною частиною концепції створення сучасної інноваційної моделі моніторингових спостережень є той факт, що вона повинна базуватися на взаємопов'язаних наявних математичних моделях, статистичних залежностях і даних існуючих систем спостережень [4]. Даний математичний апарат може слугувати окремим блоком в системі моніторингових спостережень за станом атмосферного повітря, враховуючи при цьому забруднення повітря внаслідок воєнних дій на міській території.

Постановка проблеми

Дослідження закономірностей розповсюдження небезпечних речовин, що пов'язані з вибухами боєприпасів, є актуальним питанням екологічної безпеки. В існуючих дослідженнях важливе значення приділялося визначенню загального складу та кількості забруднюючих речовин, які утворились внаслідок вибухів, з подальшим їх впливом на довкілля і населення. Ці питання частково розглянуті в роботах [5, 6] на прикладі аварії на складі боєприпасів. Проблема формування вторинних забруднювачів в атмосфері при різних метеорологічних умовах навколишнього середовища, висоті стовпа вибуху та емісії антропогенних домішок в атмосферу Землі розглядалася, в основному, стосовно високих незатінених джерел забруднення [7]. В даній роботі розглядалася математична модель процесів формування кислотних опадів та їх випадання на територіях, що прилягають до зони ТЕС, яка враховує двовимірне тепло- та масоперенесення, кінетику процесу конденсації, дифузію та конвекцію пари оксидів сірки, вирішується чисельним способом методом кінцевих різниць.

Відомі методики оцінки відстаней, на які можуть поширюватися антропогенні компоненти викидів, теж стосуються, в основному, високих виробничих труб. Методики передбачають визначення концентрацій на шляху розвитку забрудненого струменя на трьох ділянках: викиду факелу забруднення, зоні максимального забруднення і поступового зниження концентрації. Вони основані на реалізації математичної моделі атмосферної дифузії та статистичних моделей [8–10 та ін.]. Задача характеру формування теплового куполу над теплою поверхнею міського середовища за допомогою рівняння кількості руху забрудненого повітря, його параметри та кількість теплоти джерела досить детально описані в роботі [11]. Для визначення параметрів конвективного струменя авторами використовувався інтегральний метод Л. Ейлера, який полягає в рівності змін кількості вхідних та вихідних рухів потоку в окреслений об'єм та суми імпульсів об'ємних активних і реактивних сил. Аналогічний підхід правомірно застосувати при розгляді теплового забрудненого струменя при одиночному вибуху (рис. 1).

Метою даного дослідження є оцінка викидів шкідливих речовин на підставі створення моделі конвективного струменя, що дозволяє визначити формування купола забруднення над місцем вибуху в залежності від метеоумов місцевості.

Основна частина

Циліндричний об'єм, що розглядається, окреслений перерізом I – I зі сторони теплої поверхні і перерізом II – II на межі ділянки формування конвективного струменя. Всі вектори підтікання атмосферного повітря є перпендикулярними вертикальній осі системи.

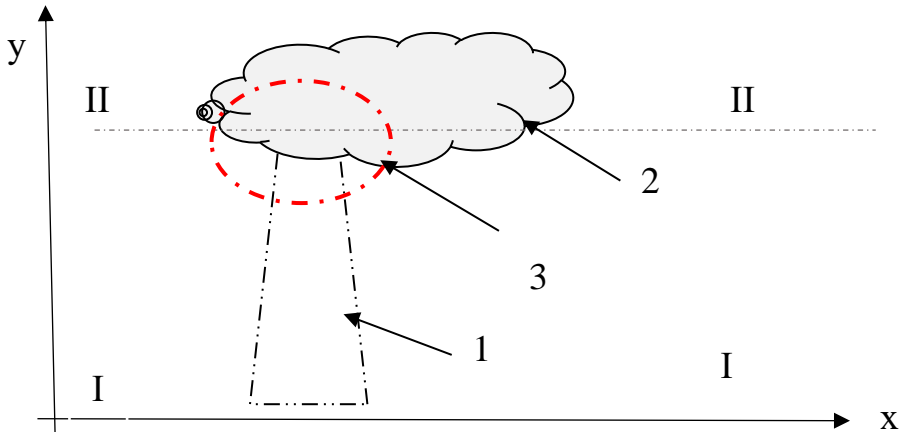


Рис. 1. Схема постановки задачі: 1 – стовп вибуху; 2 – напрямок руху вибухових газів; 3 – умовне локальне джерело викидів при розповсюдженні в атмосфері

Від певних метеоумов місцевості та їх комбінацій залежать умови формування основних шляхів розповсюдження забруднень в повітрі. Провідними метеорологічними факторами можна назвати швидкість вітру, турбулентність атмосфери в межах планетарного прилежого шару і вертикальне розподілення температури (адіабатичне, інверсійне і шарувате різноманітне).

З використанням критерія Річардсона Ri розрізняють стабільні $Ri > 1$, нестабільні $Ri < 1$ і нейтральні при $Ri \approx 1$ умови атмосфери.

Згідно з визначенням (1) нейтральність настає при врівноваженості факторів, які обумовлюють процеси дестабілізації і стабілізації атмосфери. Вектори підтікання атмосферного повітря є перпендикулярними вертикальній осі системи.

$$Ri = \frac{g^* \left(\frac{dt}{dH} - A \right)}{T^* \left(\frac{du}{dH} \right)^2} . \quad (1)$$

Питома енергія вибухових речовин приймається 4184 Дж/г. Для крилатої ракети типу «Калібр» з бойовою частиною 450 кг теплота по площі горіння складає $1,88 \cdot 10^9$ Дж, або 449330,78 ккал; ракети X-101 з бойовою частиною 400 кг складає $1,67 \cdot 10^9$ Дж, або 339139,57 ккал; зенітної ракети середньої дальності «БУК-М1» з бойовою частиною вагою 50-70 кг теплота по площі горіння складає $2,5 \cdot 10^8$ Дж, або 59751,43 ккал [12, 13]. Розрахунок викидів деяких кислотоутворюючих речовин та парникових газів наведено в таблиці 1. Коефіцієнт питомих викидів речовин з деякими припущеннями було взято

нами з Методики розрахунку неорганізованих викидів забруднюючих речовин або суміші таких речовин внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій та/або під час дії воєнного стану та визначення розмірів завданої шкоди. Затверджено Наказом Міністерства довкілля та природних ресурсів України 13 квітня 2022 року, № 175 [14].

Таблиця 1. Розрахунок маси викиду окремих речовин при вибуху крилатої ракети типу «Калібр», ракети типу Х-101 та снаряду «БУК-М1»

№	Забруднююча речовина	Середній коефіцієнт питомих викидів, т/т	Маса згорілої речовини, М, т; Крилата ракета «Калібр»/ракета Х-101/снаряд «БУК-М1»	Викид, Мв, т; Крилата ракета «Калібр»/ракета Х-101/снаряд «БУК-М1»
1	Діоксид азоту, NO _x	0,0014	0,540/0,400/0,070	0,000756/0,00056/0,000098
2	Сірчистий ангідрид, SO _x	0,000013	0,540/0,400/0,070	0,000007/0,0000052/0,0000009
3	Вуглецю діоксид, CO ₂	3,449	0,540/0,400/0,070	1,86246/1,3796/0,24143
4	Вуглецю оксид, CO	0,0063	0,540/0,400/0,070	0,0034/0,00252/0,000441
5	Тверді речовини, ОКВЧ+PM10+PM2,5 (сажа)	0,0026	0,540/0,400/0,070	0,001404/0,00104/0,000182

Різницю між середньою температурою повітря на поверхні горіння та найвужчому перерізі теплого конвективного струменя, що підіймається вгору, а також середню швидкість піднімання теплого забрудненого повітря знаходимо з формулами конвективної теплопередачі.

Середня температура в перехідному перерізі конвективного струменя знаходиться за формулою:

$$\Delta t_{\text{уср}} = \frac{41 \cdot Q_s^{\frac{2}{5}}}{(y-y_0)^{\frac{3}{5}}} \text{ град.} \quad (2)$$

Середню по площі швидкість теплого повітря, яке підіймається вгору, знаходимо за формулою:

$$V_y = 0.56 \left(\frac{Q_s}{y-y_0} \right)^{0.33}, \quad (3)$$

де: $y - y_0$ – відстань від поверхні землі до шуканого перерізу конвективного вертикального струменя, м.

Приймаючи діаметр воронки вибуху (або площі горіння) приблизно 20 м (D), висоту конвективного струменя приблизно 100 м, шуканий переріз вертикального конвективного струменя буде приблизно $3D = 60$ м для ракети типу «Калібр» і 30 м – для зенітної ракети середньої дальності «БУК-М1».

Відповідно для крилатої ракети типу «Калібр» дані швидкості складають $V_y = 18,99$ м/с; ракети типу Х – 101 $V_y = 17,03$ м/с; зенітної ракети середньої дальності «БУК-М1» $V_y = 6,86$ м/с.

Концентрація забруднюючих речовин від вибуху в найвужчому перерізі забрудненого струменя представлена в табл. 2.

Таблиця 2. Концентрація забруднюючих речовин в конвективному струмені вибуху від крилатої ракети «Калібр», ракети Х-101 і снаряду «БУК-М1» на відстані 60 м і 30 м від поверхні землі в залежності від типу снаряду

№	Забруднююча речовина	Викид, Мв, г Крилата ракета «Калібр»/Х-101/ снаряд «БУК-М1»	Витрата у верхньому струмені, м ³ /с Крилата ракета «Калібр»/снаряд «БУК-М1»	Концентрація викиду C_x , мг/м ³ ; Крилата ракета «Калібр»/снаряд «БУК-М1»	ГДК макс./раз./ ГДК _{серед.} доб., мг/м ³
1	Діоксид азоту, NO _x	756/560/98	5962,86/ 5347,42/ 251,985	126,78/ 104,72/38,8	0,2/0,04
2	Сірчистий ангідрид, SO _x	7/5,2/0,9	5962,86/ 5347,42/ 251,985	1,17/0,972/ 3,57	0,5/0,005
3	Вуглецю діоксид, CO ₂	1862460/ 1379600/ 241430	5962,86/ 5347,42/ 251,985	312430/ 257990/ 958110	-/-
4	Вуглецю оксид, CO	3400/2520/ 441	5962,86/ 5347,42/ 251,985	570,1/471,2/ 1750	5/3
5	Тверді речовини, ОКВЧ+PM10+ PM2,5 (сажа)	1404/1040/ 182	5962,86/ 5347,42/ 251,985	235,45/ 194,48/722,0	0,5/0,15 (-/- + 0,5/0,15 + +0,15/0,05)

На основі даного підходу до визначення концентрацій забруднюючих речовин у верхній частині конвективного забрудненого теплового струменя від вибуху, можна вирішувати також низку задач, в тому числі і тих, що пов'язані з впливом воєнних дій на розвиток глобальних екологічних процесів, а саме:

- визначити концентрацію кислотоутворюючих речовин у вертикальному конвективному струмені над поверхнею вибуху та частку перетворення його у кислоти при певних метеоумовах (при вирішенні задачі утворення кислотних опадів від конкретного вибуху ракети або снаряду);
- визначити концентрації парникових газів в забрудненому теплому струмені повітря та знаходити загальний викид парникових газів від серії одиночних вибухів в межах досліджуваної території;
- розраховувати емісію забруднень небезпечних речовин від конвективного струменя за аналогією з високим незатіненим джерелом за відомими методами;

- слугувати підсистемою при реалізації інтегрованої мережі екологічного моніторингу складових навколишнього середовища внаслідок бойових дій;
- здійснювати розрахунки еколого-економічних збитків від ведення бойових дій та інш.

Обговорення результатів досліджень

Для перевірки правомірності даного підходу щодо визначення забруднення атмосферного повітря від окремих вибухів внаслідок воєнних дій було зроблено розрахунок концентрацій основних забруднюючих речовин та моніторингових даних щодо якості атмосфери в м. Києві внаслідок обстрілу ракетами Х-101 території Голосіївського та Дніпровського районів м. Києва 16 грудня 2022 року (табл. 3). Концентрації забруднюючих речовин станом на зазначену дату брались з системи моніторингових спостережень по м. Києву [15], розрахунок індексу якості повітря AQI проводився за допомогою калькулятора [16].

Похибка від співставлення даних результатів розрахунку з моніторинговою системою атмосферного повітря залежить від відстані до найближчих діючих пунктів спостережень. В таблиці 3 наведено пункти спостережень в даних районах, на яких зафіксовано найбільші дані перевищення окремих речовин викиду, осереднені дані по м. Києву зазначених речовин, а також розрахункові дані на відстані 2 км від умовного місця вибуху за діючими Методичними вказівками щодо прогнозування метеорологічних умов формування рівнів забруднення повітря в містах України, КД 52.9.4.01–09 [8].

Таблиця 3. Концентрації забруднюючих речовин в атмосферному повітрі станом на 16 грудня 2022 року в м. Києві (розрахункові та осереднені по Дарницькому та Голосіївському районах)

№	Забруднююча речовина	Концентрація викиду C_x від окремої ракети Х-101, мг/м ³ (розрахунок)	Дані спостережень, Голосіївський район, мкг/м ³ (Пр-т Науки) (розрахунок)	Дані спостережень, Дніпровський район, мкг/м ³ (Дніпровське шосе) (розрахунок)	Середні значення всіх постів спостережень по м. Києву станом на 10.00 16.12.2022, мкг/м ³	Концентрація C_x на відстані 2 км від умовного падіння окремої ракети Х-101, мкг/м ³
1	Діоксид азоту, NO ₂	104,72	55,2	41,4	47,1	65,0
2	Сірчистий ангідрид, SO ₂	0,972	1,3	1,6	2,1	0,55
3	Вуглецю оксид, CO	471,2	581	466,6	710,7	292
4	PM _{2,5} + PM ₁₀	194,48	186,9	121,5	73,2	120,7
5	AQI PM _{2,5}	185	184	149	103	182

Слід зазначити, що даний підхід до оцінки та прогнозування концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі в період ведення воєнних дій можна використовувати при певних умовах атмосфери, що визначають емісію забруднень та перетворень хімічних речовин в повітрі.

Висновки

Оцінку та прогнозування викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря урбанізованих територій при окремих вибухах снарядів та ракет різного типу внаслідок російської воєнної агресії можна здійснити на підставі математичної моделі гарячого конвективного струменя від поверхні вибуху з подальшим застосуванням теорії розсіювання та кінетичних перетворень в повітрі. Даний підхід дозволяє визначити формування купола забруднення над місцем вибуху в залежності від метеоумов місцевості, а також оцінити вплив емісії забруднень на навколишнє середовище та організм людини.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Belcher O., Bigger P., Neimark B., Kennelly C. (2020) Hidden carbon costs of the “everywhere war”: Logistics, geopolitical ecology, and the carbon boot-print of the US military 2020. *Journal Citation Reports (Clarivate Analytics)*, 14/85 (Geography), 65–80.
2. Бондар О.І., Улицький О.А., Єрмаков В.М. (2018) Звіт про результати вивчення екологічної ситуації на території Донецької та Луганської області. Київ, 70 с. URL: <http://dea.edu.ua/img/source/Doc/LugDon%20Obl.pdf>.
3. Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. (2022) Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*, Vol. 837. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>.
4. Honcharenko A., Voloshkina O., Kupinskiy I., Zhukova O. (2021) Modern comprehensive information system for environmental quality monitoring. *Environmental Problems*, Vol. 6 (4), 251-258.
5. Сидоренко В.Л., Азаров С.І. (2010) Оцінка ризику впливу продуктів аварії на складі боєприпасів на населення. Екологічна безпека і природокористування, вип. 5, 67–74.
6. Оцінка наслідків від вибухів різних боєприпасів на військових складах. URL: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/3_nauka/vibuhi_boiepriipasiv_.pdf.
7. Gvozdyakov D., Gubin V., Gromov A., Tanishev A., Shvab S. (2022) Numerical Estimation of the Formation Process of Anthropogenic Precipitation in the Atmosphere. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179101005>.
8. Методичні вказівки щодо прогнозування метеорологічних умов формування рівнів забруднення повітря в містах України. URL: https://meteo.gov.ua/files/content/docs/meteo_kerdoc/%D0%9A%D0%9452.9.4.01-09.pdf
9. Selegay T., Filonenko N., Shlychkov V., Lezhenin A., Lenkovskaya T. (2013) Formaldehyde pollution of the urban atmosphere and its dependence on meteorological factors. *Optics of the Atmosphere and the Ocean*, № 25 (5), 422-426.
10. Aloyan A.E. (2000) Numerical modeling of the interaction of gas species and aerosol in the atmospheric dispersive system. *Russ. J Num. Analysis Math. Modelling*, Vol. 15 (3-4), 211-224.
11. Sipakov R., Voloshkina O. (2021) Improving management of environmental risk from urbanized areas highways' air pollution (on an example of Kyiv city). Zenodo May, 4, 2021, URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4735836>.
12. Характеристики снаряду БУК-М1. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D0%BA-%D0%9C1-2>.

13. Калібр (крилаті ракети). URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B1%D1%80_\(%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%96_%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B8\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B1%D1%80_(%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%96_%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B8)).
14. Методика розрахунку неорганізованих викидів забруднюючих речовин або суміші таких речовин внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій та/або під час дії воєнного стану та визначення розмірів завданої шкоди. Затверджено Наказом Міністерства довкілля та природних ресурсів України 13 квітня 2022 року, № 175. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-22#Text15/>.
15. Метеорологічний архів. URL: https://www.meteoblue.com/ru/%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/historyclimate/weatherarchive/%D0%9A%D0%B8%D0%B5%D0%B2_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%B8%D0%BD%D0%B0_703448?fcstlength=1m&year=2022&month=2.
16. Калькулятор індексу якості повітря. URL: https://web.archive.org/web/20120813235124/http://www.airnow.gov/index.cfm?action=resources.conc_aqi_calc.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2022 і прийнята до друку після рецензування 07.03.2023

REFERENCES

1. Belcher, O., Bigger, P., Neimark, B., & Kennelly, C. (2020). Hidden carbon costs of the “everywhere war”: Logistics, geopolitical ecology, and the carbon boot-print of the US military 2020. *Journal Citation Reports (Clarivate Analytics)*, 14/85 (Geography), 65–80.
2. Bondar, O. I., Ulytskyi, O. A., & Ermakov, V. M. (2018). Report on the results of studying the ecological situation in Donetsk and Luhansk regions. Kyiv. Retrieved from: <http://dea.edu.ua/img/source/Doc/LugDon%20Obl.pdf>.
3. Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., & Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*, 837. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>.
4. Honcharenko, A., Voloshkina, O., Kupinskyi, I., & Zhukova, O. (2021). Modern comprehensive information system for environmental quality monitoring. *Environmental Problems*, 6(4), 251-258.
5. Sydorenko, V. L., & Azarov, S. I. (2010). Assessing the risk of public exposure to the products of an ammunition depot accident. *Environmental safety and nature management*, 5, 67-74.
6. Assessment of the consequences of explosions of various ammunition at military warehouses. Retrieved from: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/3_nauka/vibuhi_boieprispasiv_.pdf.
7. Gvozdyakov, D., Gubin, V., Gromov, A., Tanishev, A., & Shvab, S. (2022). Numerical Estimation of the Formation Process of Anthropogenic Precipitation in the Atmosphere. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179101005>.
8. Methodological guidelines for forecasting meteorological conditions for the formation of air pollution levels in Ukrainian cities. Retrieved from: https://meteo.gov.ua/files/content/docs/meteo_kerdoc/%D0%9A%D0%9452.9.4.01-09.pdf.
9. Selegay, T., Filonenko, N., Shlychkov, V., Lezhenin, A., & Lenkovskaya, T. (2013). Formaldehyde pollution of the urban atmosphere and its dependence on meteorological factors. *Optics of the Atmosphere and the Ocean*, 25(5), 422-426.
10. Aloyan, A.E. (2000). Numerical modeling of the interaction of gas species and aerosol in the atmospheric dispersive system. *Russ. J Num. Analysis Math. Modelling*, 15(3-4), 211-224.
11. Sipakov, R., & Voloshkina, O. (2021). Improving management of environmental risk from urbanized areas highways' air pollution (on an example of Kyiv city). Zenodo May, 4, 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4735836>.

12. Characteristics of the BUK-M1 projectile. Retrieved from: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D0%BA-%D0%9C1-2>.
13. Caliber (cruise missiles). Retrieved from: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B1%D1%80_\(%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%96_%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B8\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B1%D1%80_(%D0%BA%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%82%D1%96_%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B8)).
14. Methodology for calculating unorganized emissions of polluting substances or a mixture of such substances as a result of emergency situations and/or during martial law and determining the amount of damage caused. Approved by Order of the Ministry of Environment and Natural Resources of Ukraine on April 13, 2022, No. 175. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-22#Text15/>.
15. Meteorological archive. Retrieved from: https://www.meteoblue.com/ru/%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/historyclimate/weatherarchive/%D0%9A%D0%B8%D0%B5%D0%B2_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%B8%D0%BD%D0%B0_703448?fcstlength=1m&year=2022&month=2.
16. Air quality index calculator. Retrieved from: https://web.archive.org/web/20120813235124/http://www.airnow.gov/index.cfm?action=resources.conc_aqi_calc.

The article was received 07.12.2022 and was accepted after revision 07.03.2023

Гончаренко Артем Вадимович

аспірант 3-го року навчання, спеціальності 101 «Екологія», Київський національний університет будівництва і архітектури

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

ORCID ID: 0000-0001-5647-1360 **e-mail:** hosting.pat@gmail.com

Сіпаков Ростислав Васильович

кандидат технічних наук, Київський національний університет будівництва і архітектури

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

ORCID ID: 0000-0002-0862-5043 **e-mail:** sipakov.rv@knuba.edu.ua

© 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 29.03.23 Формат 70x108/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 10.68
Обл.-вид. арк. 8.19 Тираж 300 примірників
Замовлення № _____

КИЇВ 2023