



**Х Міжнародна конференція**

**ПРОБЛЕМИ ЗНЯТТЯ**

**З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЯДЕРНОЇ**

**ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВІДНОВЛЕННЯ**

**НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**INUDECO 2025**

**(25-26, 29-30 квітня 2025 року, м. Славутич)**

**Tenth International Conference**

**on Nuclear Decommissioning**

**and Environment Recovery**

**25-26, 29-30 April 2025**

**INUDECO'25**

ISBN 978-617-7932-88-7



9 786177 932887



СЛАВУТИЦЬКА МІСЬКА РАДА  
ВИШГОРОДСЬКОГО РАЙОНУ КИЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

**X Міжнародна конференція**

**ПРОБЛЕМИ ЗНЯТТЯ  
З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЯДЕРНОЇ  
ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВІДНОВЛЕННЯ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**Tenth International Conference  
on Nuclear Decommissioning  
and Environment Recovery  
INUDECO 25**

(25-26, 29-30 квітня 2025 року, м. Славутич)

Збірник матеріалів

Чернігів  
НУ «Чернігівська політехніка»  
2025

**Проблеми** зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECO 25) : збірник матеріалів X Міжнародної конференції (25-26, 29-30 квітня 2025, м. Славутич). – Чернівці : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – 136 с.

ISBN 978-617-7932-88-7

Збірник матеріалів X Міжнародної конференції «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища», яка пройшла 25-26, 29-30 квітня 2024 року в місті Славутичі (Україна), з метою розгляду проблем і перспектив, підвищення рівня ефективності науково-практичних досліджень, налагодження співпраці та обміну досвідом у сфері зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики й поводження з радіоактивними відходами та відпрацьованим ядерним паливом.

Збірник призначений для вчених і фахівців з атомної енергетики та промисловості. У збірнику представлені тези доповідей засідання конференції.

Конференція організована за підтримки: виконавчого комітету Славутиської міської ради Київської області; Державного агентства з управління зоною відчуження, Державного спеціалізованого підприємства «Чорнобильська атомна електростанція»; Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України; Інституту проблем математичних машин і систем НАН України.

Це видання надруковано за сприяння КП "Агентство регіонального розвитку" Славутиської міської ради Вишгородського району Київської області.

### **Програмний науковий комітет (Оргкомітет)**

#### **Співголова оргкомітету**

Фомічев Юрій – міський голова м. Славутича

#### **Співголова оргкомітету**

Носовський Анатолій – директор Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України

#### **Заступники голови оргкомітету:**

Старовойтова Арина – директор КП «Агентство регіонального розвитку» Славутиської міської ради Вишгородського району Київської області;

Савельєв Максим – науковий співробітник Інституту проблем математичних машин і систем НАН України.

#### **Члени оргкомітету:**

Згуровський Михайло – ректор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»;

Мартинов Сергій – т.в.о. генерального директора ДСП «Чорнобильська АЕС»;

Шевчук Максим – заступник Голови агентства України з управління зоною відчуження;

Морозов Анатолій – Президент Академії технологічних наук України, директор Інституту проблем математичних машин та систем НАН України;

Лавренов Данило – виконавчий секретар ГО «Українське ядерне товариство»;

Супрун Григорій – директор ВП «Атомремонтсервіс».

**УДК 621.039**

ISBN 978-617-7932-88-7

© Славутиська міська рада, 2025

© ГО "Європейський Інститут Чорнобіля",  
фото на обкладинці, 2025

## ЗМІСТ

<i>Aartvork F., Trunova O.</i> Operational environmental monitoring based on the internet of things: opportunities and challenges in wartime conditions.....	5
<i>Balan O.V., Brylka S.G., Derenhovskiy V.V., Pavlovskiy L.I., Rudko V.M., Menshenin Y. A.</i> Assessment of the technical condition of the constructions of the localizing structure of the "Shelter" object, not subject to "early" dismantling.....	8
<i>Бегун В.В., Гашимов А. М.</i> Впровадження технології ММР в Україні. Адаптація існуючої системи поводження з ВЯП .....	9
<i>Борисенко В., Горанчук В., Ладан С.</i> Визначення радіаційних характеристик відпрацьованого ядерного палива відповідно до вимог міжнародних стандартів .....	11
<i>Grechaninov V. F.</i> On the feasibility of using UAVs for information collection to support scenario modeling in the event of a nuclear incident.....	16
<i>Жученко О., Бур'ян С., Яблонський П., Пухтар М.</i> Міжнародна та національна практики функціонування освітніх програм сектору ядерної безпеки .....	18
<i>Kazymyrov O.S., Iievliev S.M., Chorny E.V., Vykovsky V.YU.</i> Post-accident radiation monitoring.....	22
<i>Kalynovsky O., Krasnov V., Khan V., Filippov O.</i> Assessment of radiation situation in ground level air in site near complex NSC-SO .....	24
<i>Калиновський О., Краснов В., Хан В., Філіппов О.</i> Оцінка радіаційної ситуації в приземному шарі повітря поблизу комплексу НБК-ОУ .....	26
<i>Kovalenko I., Panasiuk M., Sosonna N., Levin G., Roenko G., Buzynnyi M.</i> Study of 90sr increased migration conditions with groundwater in the zone of Chernobyl NPP industrial site influence .....	28
<i>Круковський П., Скляренко Д., Кондратенко С., Кузьменко В.</i> Порушення проектного режиму вентиляції кільцевого простору і простору під аркою в результаті прямого влучання дрона в арку нового безпечного конфайнменту .....	31
<i>Кряжич О., Іванов І., Коваленко О.</i> Підхід до подолання інформаційного хаосу на порталах обробки інформації для екологічного моніторингу .....	34
<i>Лев Т., Яценко Ю.В., Шедеменко І.П.</i> Оцінка природно-кліматичних умов, що сприяють лісовідновленню після пожеж, за використанням даних проекту «Copernicus» Landdata_ERA5 .....	38
<i>Мусич О.Г., Верховцев В.Г., Деміхов Ю.М.</i> Технології розумного міста для міст-супутників АЕС.....	50
<i>Novikov A., Talerko M.</i> Model-based assessment of the radiometric network in Ukraine for nuclear emergency response .....	56
<i>Odintsov O., Khan V., Palamar L., Sabenin P., Chikur L.</i> Radioactively contaminated water in the rooms of the Shelter object within conditions of operation of the new safe confinement t.....	60
<i>Павловський К. І., Городецький Д. В., Деренговський В. В., Меньшенін Є. А., Брилка С. Г., Одінцов О.О., Паламар Л.А.</i> Прогноз радіаційного стану окремих зон виконання робіт по демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» на період подовження терміну його експлуатації .....	67

<b>Павлюченко М.</b> Динаміка температури і відносної вологості в приміщеннях НБК - ОУ в період весна 2024 – зима 2024-25. ....	75
<b>Рак П.В., Балакін В. Ф., Машиністов В.Є.</b> Дослідження фізико-механічних властивостей радіоактивно забрудненого металу, дезактивованого методом металургійної плавки.....	85
<b>Rozko A., Fedorenko Yu., Zlobenko B.</b> Application of innovative binders for conditioning of boron-containing LRW.....	90
<b>Середа С.В., Голюк М.І., Дідук І.І., Чувашов Ю.М., Носовський А.В., Гулік В.І.</b> Новий вітчизняний матеріал для радіаційного захисту – фібробетон з модифікованим базальтовим волокном .....	91
<b>Сидоренко М.А.</b> Створення науково-індустріального парку в Чорнобильській зоні відчуження: перспективи та виклики інноваційного відродження.....	94
<b>Сімейко К.В., Лобач К.В., Скоблик О.М., Бондарьков М.Д., Дорошенко А.О., Сабенін П.В.</b> Аналіз хімічного та ізотопного складу скидного газу під час термічної обробки опроміненого графіту.....	98
<b>Сімейко К.В., Мегжаєв Є.Т., Дорман О.Ю., Хвалін Д.І., Ховавко О.І., Колодій І.В., Малий Є.В., Хоменко Д.О., Лобач К.В.</b> Сучасні виклики щодо поводження з реакторним графітом при виведенні АЕС з експлуатації.....	100
<b>Склярченко Д., Круковський Г., Дядюшко Є., Старовіт І.</b> Динаміка змін повітрообміну НБК з оточуючим середовищем під впливом кліматичних умов і часу експлуатації.....	102
<b>Старовіт І., Савко В., Круковський П., Гаврилко Є.</b> Розроблення системи супровіду гідравлічного стану НБК ЧАЕС на засаді технології імітатор – цифровий двійник .....	105
<b>Трунов О., Dorosh M.</b> Ensuring information security in the transportation of nuclear.....	109
<b>Фаренюк Г., Немчинов Ю., Бамбура А., Сазонова І., Дорогова О., Лазаренко С., Багіров В., Резніков Б., Бійчук А., Рудько В., Брилка С., Балан О., Кондратенко С., Ліщина В., Дерюга С.</b> Передпроектні дослідження щодо «раннього демонтажу» нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» ДСП ЧАЕС.....	112
<b>Shevtsova N., Belyaev V., Prysliak S., Gudkov D.</b> Long-term ionizing radiation effect on the sexual reproductive capacity of the common reed <i>Phragmites australis</i> (cav.) Trin. Ex. Steud. ....	125
<b>Шинкаренко В. К., Талерко М. М., Новіков А. М., Краснов В. О., Кашиур В. О., Свирид О. А., Августов В. В.</b> Радіоаерозольна ситуація під укриттям «Арка» після атаки БПЛА 14.02.2025.....	128
<b>Штефан В.М., Савельєв М.В., Гречанінов В.Ф.</b> Радіаційна розвідка та моделювання в Чорнобильському саркофазі.....	134

# OPERATIONAL ENVIRONMENTAL MONITORING BASED ON THE INTERNET OF THINGS: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES IN WARTIME CONDITIONS

*Aartvork Feniks<sup>1</sup>, Trunova Olena<sup>2</sup>*

Chernihiv Polytechnic National University, Ukraine  
*<sup>1</sup>nicksnickslaw@gmail.com, <sup>2</sup>e.trunova@gmail.com*

**Abstract.** Operational environmental monitoring (OEM) is a key tool for the rapid detection of threats, and its effectiveness is enhanced through integration with the Internet of Things (IoT). OEM-IoT is a comprehensive system for continuous assessment of environmental status, predictive modeling, and real-time decision-making.

The full-scale military aggression against Ukraine has fundamentally changed the environmental situation, causing massive destruction and pollution. In this context, OEM-IoT becomes critically important for minimizing damage, ensuring rapid detection of threats (toxic substance leaks, air/water pollution), assessing the impact of hostilities on ecosystems, protecting the population, documenting environmental crimes, and preparing for recovery.

The example of explosions in a border area demonstrates how mobile IoT sensors record air quality indicators (PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>, VOCs, CO). Based on these data, OEM-IoT performs predictive modeling of pollutant dispersion using software tools in Python. Although the modeling formulas are well known, their application requires a specialized analytical system for processing streaming data and integration with GIS. Comparison with WHO maximum allowable concentrations (MACs) shows significant exceedances.

The integration of IoT measurements and dispersion models is critically important for rapid and informed response during wartime, especially for border regions, which are particularly vulnerable.

**Keywords:** Operational Environmental Monitoring, IoT, Predictive Modeling, Environmental Safety, Military Conflict, Air Pollution.

OEM is a key tool for the rapid detection of environmental threats, thanks to its responsiveness, adaptability, and integration of modern technologies. The implementation of the IoT paradigm revolutionizes OEM by providing continuous assessment of environmental status, trend identification, predictive modeling, and automated alerts. OEM-IoT is a comprehensive system for collecting, processing, and analyzing environmental data in real-time, enabling the timely tracking of changes and decision-making.

The full-scale military aggression against Ukraine has fundamentally changed the environmental situation, causing massive destruction and pollution [1]. In this context, OEM-IoT becomes critically important for situation assessment and damage minimization. It enables rapid detection and localization of threats (toxic substance leaks, air/water pollution); assessment of the impact of hostilities on ecosystems

(extent of destruction, affected areas); protection of public health (basis for evacuation and sanitary-protective measures); documentation of environmental crimes (evidence base for legal actions); preparation for recovery (basis for environmental rehabilitation).

In wartime conditions, traditional environmental monitoring approaches are insufficient. Unlike them, OEM based on the application of modern digital technologies and IoT systems can ensure effective environmental control and rapid response in crisis situations.

To illustrate the capabilities of OEM-IoT in such situations, let us consider a scenario of explosions in a border area (combat zone). As input data for modeling, mobile IoT sensors promptly recorded the following air quality indicators immediately after the event: PM2.5 (average  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , maximum  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); NOx (converted to NO<sub>2</sub>, average  $0.15 \text{ mg}/\text{m}^3$ , maximum  $0.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ ); VOCs (elevated levels CO average  $5 \text{ ppm}$ , maximum  $15 \text{ ppm}$ ). Additional data included: temperature  $18^\circ\text{C}$ ; humidity  $75\%$ , smoke.

Based on these real-time measured data and considering meteorological conditions, the integrated OEM-IoT system performs predictive modeling of pollutant dispersion. The calculated parameters of this modeling, presented in Table 1, were obtained using software tools, in particular, the Python programming language.

Table 1 – Parameters of emissions and pollutant dispersion modeling

Parameter	PM2.5 Value	NO <sub>2</sub> Value	VOCs Value	CO Value
Emission rate ( $M$ ), $\text{g}/\text{s}$	0.001616	0.002155	0.007543	$6.174 \times 10^{-5}$
Maximum ground-level concentration ( $C$ ), $\text{mg}/\text{m}^3$	0.0001225	0.0001634	0.0005717	$4.679 \times 10^{-6}$
Distance ( $X$ ), $m$ (to maximum concentration)	194.17	194.17	194.17	194.17
Total concentration ( $CS$ ), $\text{mg}/\text{m}^3$ (relative to MAC)	0.5146			
Maximum hazardous wind value ( $U$ ), $\text{m}/\text{s}$	8.64			
Dimensionless parameter $r$	0.0587			
Dimensionless coefficient $d$	32.36			
Dimensionless parameter $P$	3			

It is worth noting that although the formulas for modeling pollutant dispersion (for example, Gaussian or Lagrangian models) are known and tested in environmental engineering, their application requires significant computational resources [2]. Modern IoT sensors usually do not directly provide these calculated parameters. Therefore, the creation of a specialized analytical system is essential to process streaming data from sensors and perform these complex calculations in real time. In the future, such a system could be integrated with geographic information systems to visualize maps of pollutant distribution in the area.

A comparison with the maximum allowable concentrations (MACs) for civilian conditions recommended by the WHO (maximum daily average PM2.5 –  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; annual average NO<sub>2</sub> –  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; daily average CO –  $7 \text{ ppm}$ ) revealed that the initial measured and modeled values significantly exceed these standards [3].

Figure 1 clearly illustrates the dependence of pollutant concentrations (PM2.5, NO<sub>2</sub>, VOCs, CO) and their total concentration (CS) on the distance  $X$ ,  $m$  from the emission source.

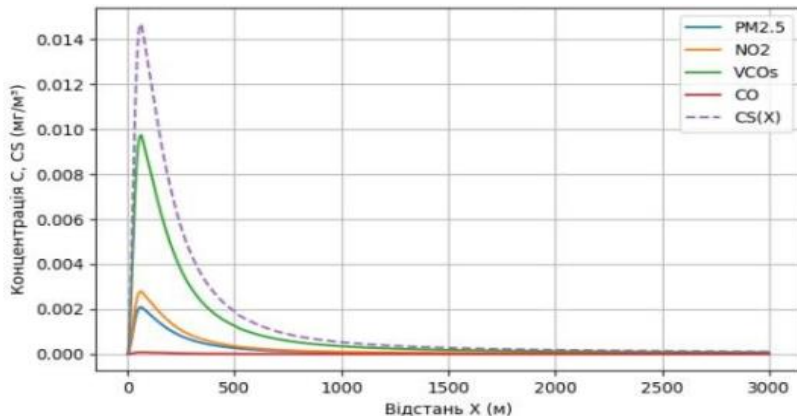


Fig. 1. Distribution of pollutant concentrations (PM2.5, NO<sub>2</sub>, VOCs, CO) of unidirectional action and their total concentration (CS) depending on the distance  $X$  (modeling results).

The presented figure is the result of predictive modeling, confirming the capability of OEM-IoT to predict pollutant dispersion based on initial and supplementary data. This forms the basis for rapid and informed decision-making in crisis situations.

The graphical interpretation of the model allows determining the highest concentrations of all pollutants. They are observed at a certain relatively short distance – about 194.17 meters from the source. This identifies the most dangerous zones, which is critically important for prompt response. As the distance from the source increases, pollutant concentrations decrease sharply, indicating an effective dispersion process in the atmosphere. This allows predicting the boundaries of safe zones and the impact reduction in remote areas.

Thus, OEM based on the integration of IoT measurements and dispersion models is critically important for a comprehensive assessment of environmental threats in crisis conditions. This approach provides rapid risk assessment, identification of sources, and prediction of pollutant dispersion, forming the basis for urgent decision-making and building an evidence base for environmental crimes. Especially for vulnerable border regions, where traditional monitoring is insufficient, OEM-IoT ensures continuous environmental control, contributing to public safety and environmental preservation during wartime.

## References

1. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024, June 13). On some issues of the functioning of the state environmental monitoring system and its subsystems (Resolution No. 684). Legislation of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-%D0%BF#Text>
2. Gulyaev, V. M., & Dranishnikov, L. V. (2005). Monitoring okruzhayushchey sredy [Environmental monitoring]. Textbook for students of specialty 7.070801 – «Ecology and environmental protection».
3. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

## ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE CONSTRUCTIONS OF THE LOCALIZING STRUCTURE OF THE "SHELTER" OBJECT, NOT SUBJECT TO "EARLY" DISMANTLING

*Balan O.V., Brylka S.G., Derenhovskiy V.V., Pavlovskiy L.I., Rudko V.M., Menshenin Y. A.*

Institute for safety problems of nuclear power plants of  
National Academy of Sciences of Ukraine  
brylkasergij@gmail.com,  
v.rudko@ispnpp.kiev.ua, l.pavlovsky@ispnpp.kiev.ua,  
o.balan@ispnpp.kiev.ua, v.derengovskiy@ispnpp.kiev.ua,  
y.menshenin@ispnpp.kiev.ua

The main objective of the work was to obtain additional information to assess the technical condition of the constructs of the localizing structure of the "Shelter" object that are not subject to "early" dismantling, but belong to structures of I and II categories of responsibility for nuclear and radiation safety. A comparison was also made of the state of each construct and the localizing structure of the "Shelter" object as a whole with the state after the completion of emergency stabilization, with a forecast of the possibility of extending its operation until 10/31/2029 at a safety level of the localizing structure of the "Shelter" object no lower than that achieved after the completion of emergency stabilization. A special feature of this work is the fact that most of the constructs that are not subject to "early" dismantling have not been previously studied due to the lack of safe access to them. To solve this problem, a number of decisions were made, including the organization of special openings on the roof of the "Shelter" object for photo and video recording of the condition of the constructs being studied and their supporting parts.

Based on a visual inspection of the constructs and their supports, the following conclusions can be drawn: no damage was found on the supporting reinforced concrete constructs that could indicate a tendency to lose load-bearing

capacity; no metal deformation, curvature of elements relative to their axes, defects and breaks in welded seams, reduction of element cross-sections due to corrosion damage, or displacement of elements in nodes were detected in metal constructs; it can also be taken into account that since the New Safe Confinement was moved into its design position and put into operation, the conditions (snow and wind loads, natural wetting from precipitation, freezing/thawing, etc.), which in general can affect the condition of the constructs of the “Shelter” object and specifically the constructs under study, have significantly improved.

## **ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ММР В УКРАЇНІ. АДАПТАЦІЯ ІСНУЮЧОЇ СИСТЕМИ ПОВОДЖЕННЯ З ВЯП**

*Безун В.В. (д.т.н., доцент), Гашимов А. М. (PhD)*

Інститут проблем математичних машин та систем НАН України,  
03187, м.Київ, проспект Академіка Глушкова, 42.

**Abstract:** This report examines the possibility of using Ukraine's existing RW and SNF management infrastructure when implementing SMR technology. The use of the existing infrastructure for the management of RW and SNF, including technologies for collection, processing, transportation and storage, will significantly increase the economic efficiency of the implementation of SMR technology. To perform an appropriate analysis, it is necessary to consider the features of SMR that potentially affect the operational limits of RW and SNF management systems. Such features include the type of fuel, initial enrichment, maximal and average burnout

**Ключові слова:** АЕС, ММР, ВЯП, ЦСВЯП

В теперішній час стрімкого розвитку набуває атомна енергетика як джерело «чистої» енергії і найбільш перспективний засіб досягнення цілей кліматичної нейтральності. В умовах стрімкого розвитку атомної енергетики, створення нових типів реакторних установок, зокрема ММР [1], та перспектив їх широкого розповсюдження важливим є питання інтеграції нових технологій в ядерну енергетику України. Одним з найважливіших питань, що безпосередньо впливає на безпеку та економічну ефективність впровадження технології ММР є інтеграція технології поводження з ВЯП з максимальним використанням існуючих технологій.

Поводження з ВЯП є однією з найгостріших проблем атомної енергетики та потребує значних інвестицій протягом тривалого часу. При впровадженні нових типів реакторів, вирішення проблеми ВЯП є важливим чинником успішної та економічної інтеграції нових типів реакторних установок.

Наразі, в рамках Енергетичної стратегії України на період до 2050 року [2], передбачається створення закритого паливного циклу із забезпеченням довготривалого зберігання ВЯП в пристанційному сховищі ЗАЕС та

Централізованому Сховищі Відпрацьованого ядерного палива. Схема поводження з ВЯП в Україні складається з наступних етапів:

- Попередня витримка в пристанційному басейні витримки після остаточного вивантаження з активної зони.
- Завантаження в багатоцільовий контейнер (БЦК) на АЕС
- Перевезення на Централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП).
- Перевантаження БЦК з транспортного контейнера в контейнер зберігання.
- Зберігання.

Для можливості використання існуючої технології необхідно виконати обґрунтування безпеки включаючи аналіз наступних ключових факторів:

- Тепловий аналіз.
- Аналіз критичності.
- Біологічний захист та радіаційна безпека.
- Фактори що впливають на обґрунтування безпеки:
- Геометрія палива.
- Рівень залишкових енерговиділень та максимальний тепловий потік твел.

- Радіонуклідна композиція ВЯП ММР.

Паливо для ММР, в залежності від проекту [3] може мати особливості, такі як збагачення більше 5%, Більший рівень вигорання (за рахунок більшого збагачення при меншому геометричному параметрі активної зони).

Слід зазначити, що обмежуючим фактором є існуюча конструкція і параметри БЦК, зокрема тиск гелію, що є критичним параметром для забезпечення теплового режиму зберігання.

Таким чином, для використання існуючої інфраструктури поводження з ВЯП необхідно виконати наступні кроки:

- Перепроєктування внутрішнього кошика БЦК.
- Виконати аналіз безпеки.
- Отримання дозволу на випробування та дослідницької експлуатації.
- Проведення випробувань та дослідницька експлуатація.

### **Перелік посилань:**

1. VIII INTERNATIONAL CONFERENCE on Nuclear Decommissioning and Environment Recovery INUDECO 23. Будівництво малих модульних реакторів в Україні – перспективи та виклики. Бегун В. В. (begunw@ukr.net), Гашимов А. М. (arturgm@ukr.net).
2. Енергетична стратегія України на період до 2030 року.
3. IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments.

# ВИЗНАЧЕННЯ РАДІАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ

*Борисенко Володимир, Горанчук Вадим, Ладан Сергій*

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна  
vborysenko@isppnpp.kiev.ua

**Abstract:** Nowadays, the situation with accumulation of spent nuclear fuel in the world is quite complicated - the dynamics of accumulation significantly exceeds the dynamics of spent fuel reprocessing. The key parameters of spent fuel are radiation characteristics and decay heat. The article represents comparison of results of calculation of decay heat of irradiated nuclear fuel based on: SCALE codes, ISO 10645/ANS 5.1 models and SOU NAEK:099. Based on the calculation authors concludes that fuel power histogram has significant influence to the decay heat of SNF and the assumption of the SOU NAEK:099 may lead to incomplete/inaccurate information on the SNF characteristics. The results of calculation of the decay heat of SNF based on the ANS 5.1/ISO 10645 models precisely correlated with SCALE code result can be used in control systems for evaluation of the decay heat during operation of nuclear power plants

На сьогоднішній день ситуація з накопичення відпрацьованого ядерного палива в світі є досить складною - динаміка накопичення значно перевищує динаміку переробки ВЯП [1]. Саме тому актуальною є робота по організації заходів та засобів по зберіганню ВЯП, а отже і належним чином визначення його характеристик.

В Україні експлуатується 3 сухих сховища для зберігання ВЯП: Сухе сховище ВЯП на майданчику ЗАЕС, Централізоване сховище ВЯП (ЦСВЯП) та Проміжне сховище відпрацьованого ядерного палива «сухого» типу (СВЯП-2). Кожне зі сховищ має свою проектну місткість та вже частково заповнене.

Ключовими параметрами ВЯП є його радіаційні характеристики та залишкове енерговиділення (ЗЕ). Відповідно до ядерних процесів, які відбуваються в ядерному паливі і конструкційних елементах ТВЗ після опромінення, джерела генерації тепла будуть наступні:

Продукти поділу;

Важкі елементи – актиноїди;

Поділи викликані нейтронами, що запізнюються;

Спонтанний поділ;

Конструктивні матеріали та елементи корпусу реактора.

На дату написання роботи, радіаційні характеристики та залишкове енерговиділення ВЯП в Україні регламентуються СОУ НАЕК 099:2023. В припущенні даного стандарту прийнято, що розрахунки проводяться для питомої потужності ТВЗ в 40 МВт/т U [2]. Також даний нормативний документ не враховує в розрахунках зупинки реактора на планово-попереджувальні

ремонти, що, як буде показано далі, також має значний вплив на результати розрахунків ЗЕ.

Для порівняння та аналізу було взято міжнародні стандарти з розрахунку ЗЕ в реакторах типу PWR: ANS 5.1 та ISO 10645 [3, 4]. Дані стандарти було вибрано, як найбільш актуальні та релевантні для можливого застосування в Україні.

Загальний принцип розрахунку ЗЕ в час  $t$  після зупинки реактора від нукліда  $j$  ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) визначається формулою (1) суми 23 експонент з відповідними коефіцієнтами [3, 4]:

$$m_j(t) = \sum_{i=1}^{23} \alpha_{ji} e^{-\lambda_{ji}t} \quad (1)$$

де  $\alpha_{ji}, \lambda_{ji}$ : частка та стала розпаду  $i$ -ої групи ядер ЗЕ, утворених при поділі ізотопу  $j$ , відповідно.

Виходячи з форми даного наближення, інтеграл енерговиділення  $M_j(t)$  може бути визначений відповідно до формули (2), а враховуючи графік навантаження ректора – умовне розбиття графіка роботи на періоди з відносно постійними рівнями потужності  $Q_k$  (включно з періодами зупинки), формула набуває вигляду суми, як представлено в формулі (3) [4]:

$$M_j(t) = \sum_{i=1}^{23} \frac{\alpha_{ji}}{\lambda_{ji}} (1 - e^{-\lambda_{ji}T}) e^{-\lambda_{ji}t} \quad (2)$$

$$M_j(t, T) = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^4 S_{jk} \cdot Q_k \sum_{i=1}^{23} \frac{\alpha_{ji}}{\lambda_{ji}} (1 - e^{-\lambda_{ji}T_k}) e^{-\lambda_{ji}t_k} \quad (3)$$

де  $T, T_k$  – повний час опромінення та час опромінення на інтервалі  $k$ , відповідно;

$t_k$  – час від моменту закінчення часу опромінення на потужності  $T_k$ ;

$S_{jk}$  – частка потужності ЗЕ від продуктів поділу ізотопу  $j$ , на часовому проміжку  $T_k$

Основними ізотопами, які вносять вклад в ЗЕ в даній інтерпретації є  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  та накопичені з часом роботи  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ .

На Рис. 1 представлено результати розрахованої в SCALE [5] моделі порівняння потужності ЗЕ ТВЗ (початкове збагачення 4,4 %), отриманих в припущенні стандарту СОУ НАЕК 099:2023 (постійна питома потужність ТВЗ у 40 МВт/т U) до вигорання 6 МВт·д/кг U, а також для двох аналогічних ТВЗ, які досягли вигорання 6 МВт·д/кг U, але при питомій потужності у 20 МВт/т U і 80 МВт/т U.

На Рис. 2 представлено аналогічні результати розрахованої в SCALE [5] моделі порівняння потужності ЗЕ ТВЗ але до вигорання 60 МВт·д/кг U, а також для двох аналогічних ТВЗ, які досягли вигорання 60 МВт·д/кг U, але при питомій потужності у 20 МВт/т U і 80 МВт/т U.

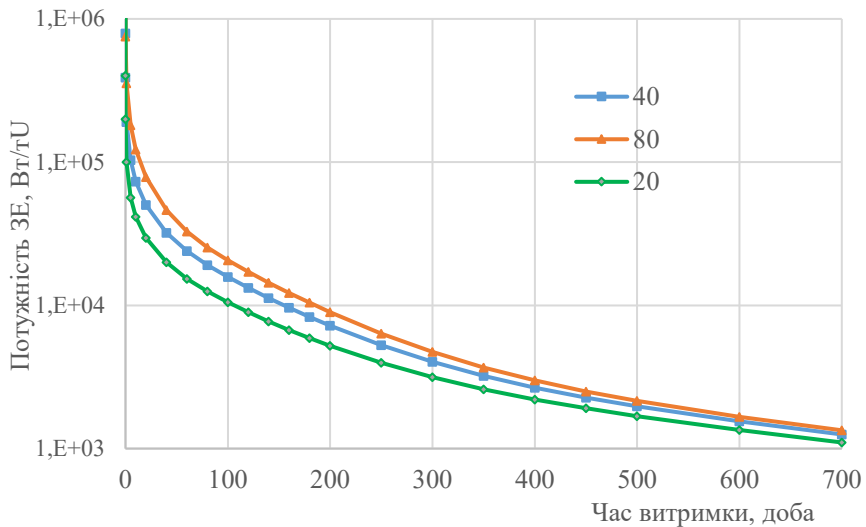


Рис. 1. Потужність ЗЕ в SCALE моделі для ТВЗ з вигоранням 6 МВт·д/кг U для питомої потужності 20, 40 та 80 МВт/т U.

Як можна бачити з графіків, різниця ЗЕ суттєво залежить від питомої потужності, і спрощення СОУ НАЕК 099:2023 щодо еквівалентності ЗЕ після 1 року витримки в басейні незалежно від графіку навантаження [1] не є точними та коректними.

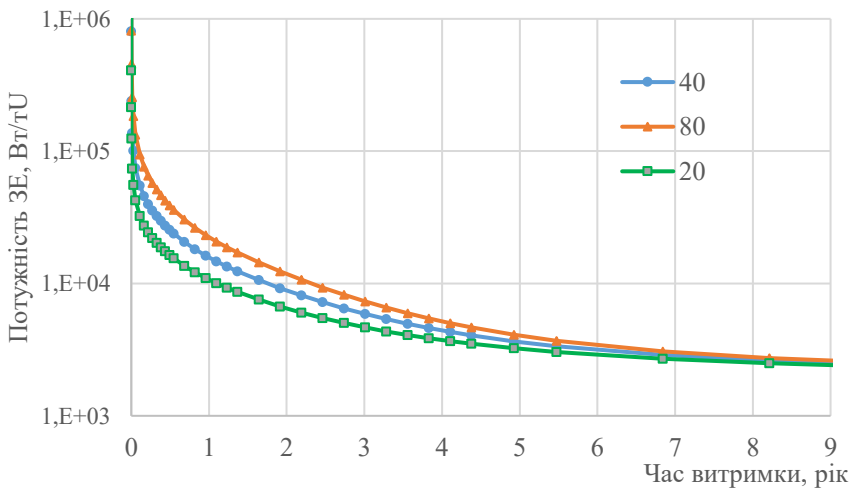


Рис. 2. Потужність ЗЕ в SCALE моделі для ТВЗ з вигоранням 60 МВт·д/кг U для питомої потужності 20, 40 та 80 МВт/т U.

На Рис. 3 представлені графіки ЗЕ - порівняння методів розрахунків на основі коду SCALE та раніше описаного методу у відповідності до ISO 10645. Питома потужність ТВЗ у 40 МВт/т U до вигорання 6 МВт·д/кг U (червоний графік (40) – розрахунок SCALE , блакитний (m40) – ISO).

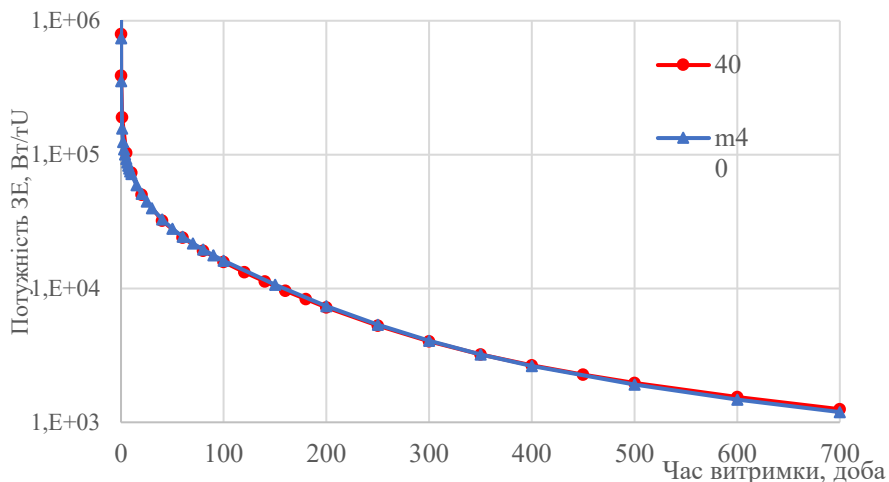


Рис. 3. Потужність ЗЕ в SCALE моделі та розраховане відповідно до ISO 10645 для ТВЗ з питомою потужністю 40 МВт/т U до вигорання 6 МВт·д/кг U.

Як бачимо з графіку дані розрахунку по ISO та SCALE мають високий рівень узгодженості, а абсолютні значення різниці двох методів розрахунків відображено в Таблиці 1, і як можна бачити, максимальна їх відмінність складає менше 3%.

Таблиця 1. Відхилення потужності залишкового енерговиділення на основі моделей ANS 5.1\ISO 10645 та отриманих у кодї SCALE.

Параметр	Час витримки палива, доба								
	10	20	40	60	80	100	200	300	400
Відхилення, %	-2,3	1,3	1,9	2,2	2,4	2,5	2,4	0,9	-1,2

Таким чином, результати визначення потужності ЗЕ отриманих на основі моделей ANS 5.1/ISO 10645 з високою точністю відповідають результатам, отриманих у кодї SCALE і можуть бути застосовані у системах оперативного визначення потужності ЗЕ ТВЗ у відповідності до фактичного графіку навантаження ТВЗ під час її експлуатації.

На Рис. 4 представлено розрахунок ЗЕ (модель в SCALE) для реальної ТВЗ (ТВЗ-9) для чотирьох паливних завантажень та розрахунок відповідно до припущення COY НАЕК:099 щодо ЗЕ в еквіваленті до питомої потужності в 40 МВт/т U.

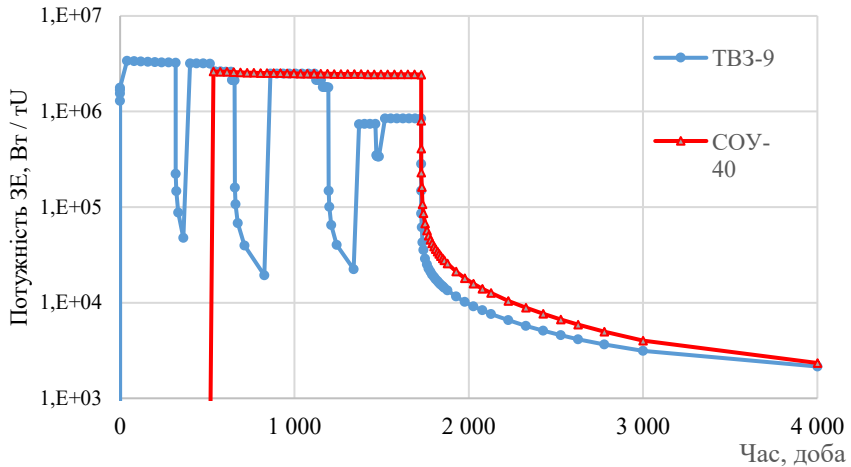


Рис. 4. Порівняння результатів розрахунку ЗЕ в SCALE моделі для реальної ТВЗ-9 та розрахунку в припущенні COU НАЕК:099.

Як бачимо з графіку, історія навантаження ТВЗ має значний вплив на ЗЕ, зокрема, в даному випадку: різниця між модельними результатами ЗЕ ТВЗ після зупинки реактора через 1 тиждень ~150%, через 1 рік ~70%, через 6 років ~10%.

Таким чином, підводячи підсумки:

графік завантаження палива суттєво впливає на залишкове енерговиділення ВЯП, і неврахування його, відповідно до COU НАЕК, може призвести до неповної/неточної інформації про радіаційні характеристики ВЯП;

результати визначення потужності залишкового енерговиділення, отримані на основі моделей ANS 5.1-ISO 10645, з високою точністю відповідають результатам, отриманим у коді SCALE;

і можуть бути використані в системах оперативного визначення потужності залишкового енерговиділення ТВЗ відповідно до фактичного графіка навантаження ТВЗ під час її експлуатації.

### Література:

1. Борисенко В. І., Горанчук В. В., Юров М. С. Активність і залишкове енерговиділення ядерного палива під час експлуатації і зберігання // Ядерна енергетика та довкілля № 2 (26) 2023. С. 3-9. doi.org/10.31717/2311-8253.23.2.1
2. COU НАЕК 099:2023. Поводження з ядерним паливом. Радіаційні характеристики і залишкове енерговиділення відпрацьованих тепловидільних збірок ВВЕР-1000
3. ANSI/ANS-5.1, 2014. Decay Heat Power in Light Water Reactors. Стандарт.
4. ISO 10645:2022. Nuclear energy - Light water reactors - Decay heat power in non-recycled nuclear fuels. Стандарт
5. SCALE Code System. Oak Ridge National Laboratory: official website. Available at: <https://www.ornl.gov/onramp/scale-code-system>.

# ON THE FEASIBILITY OF USING UAVS FOR INFORMATION COLLECTION TO SUPPORT SCENARIO MODELING IN THE EVENT OF A NUCLEAR INCIDENT

*Viktor Fedorovych Grechaninov*

Institute of Mathematical Machines and Systems Problems,  
National Academy of Sciences of Ukraine  
PhD Student at the Institute of Mathematical Machines and Systems Problems,  
NAS of Ukraine  
+38 (066) 176 99 39, E-mail: vitya.grechaninov@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8400-6401>

This text explores the potential application of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote monitoring and analysis of the radiation environment—such as detection of ionizing radiation sources, measurement and mapping of radioactivity in the environment and atmosphere. This data is intended to support the development of scenarios for actions in contaminated areas and the mitigation of nuclear incident consequences.

The current state of situational management (SM) increasingly demands in-depth analysis of accumulated data through scenario construction and modeling. Scenario-based modeling has gained significant popularity in SM operations as it enables the description of the most probable developments and potential consequences of decisions made. It serves as a scientifically grounded approach for the study of forecasting the development of various processes.

An analytical scenario is a specific sequence of actions aimed at solving designated tasks by describing the anticipated or possible course of events concerning the activity of a particular object.

Scenario analysis provides a set of detailed descriptions of event sequences that, with a certain probability, may lead to desired outcomes. In this context, the primary objective of a scenario is to provide a key to understanding the problem.

Mobile platforms can be classified as ground-based or aerial, and each type can be either piloted or unmanned. Investigating the actual situation being modeled may require a significant amount of time. Therefore, the use of UAVs is considered appropriate for scenario development.

Aerial radiation reconnaissance using UAVs allows for rapid identification of the scale and consequences of a nuclear incident, including in areas that are difficult to access by ground-based radiation survey teams or where radiation levels are particularly high. Urban areas pose particularly challenging environments for UAVs, with complications arising from navigation issues (e.g., GPS interference), communication difficulties (e.g., signal loss or delays), and potential collisions with infrastructure.

Unmanned systems offer several advantages, such as the ability to operate in high-risk environments (e.g., high radiation levels, contaminated zones, or explosive hazards), cost-effectiveness, and the capability for prolonged inspection and monitoring operations.

Depending on the degree of human intervention in the robot's decision-making process (a property known as autonomy), such systems can be fully teleoperated (remotely controlled), semi-autonomous (under dispatcher supervision), or autonomous.

It has become evident that the demand for portable systems capable of real-time detection of radioactive and nuclear materials poses both radiological and technological challenges. Radiation sensors integrated into mobile platforms must be lightweight and low-power to avoid adversely affecting data processing, payload capacity, or battery life.

A new era began with the first use of small UAVs following the nuclear disaster at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. The incident in March 2011 significantly accelerated UAV technological advancement [1]. Since then, UAVs have been actively employed for radiation monitoring and mapping purposes [2].

Connor et al. [1] provided an overview of airborne platforms used for radiation mapping and their prospects, while Schneider et al. [3] presented unmanned systems potentially applicable for radiation measurements and sample collection.

Despite only two UAVs (versus seven ground-based unmanned vehicles) being utilized during the Fukushima incident [2], the event marked the debut deployment of the Honeywell T-Hawk UAV [4,5]—an 8 kg ducted-fan aerial vehicle. It was used for radiological reconnaissance, structural damage assessment, and planning debris removal. The T-Hawk was equipped with a camera, infrared sensor, directional gamma dosimeter, and a GPS-enabled time-stamped gamma dosimeter. This setup enabled the acquisition of objective information upon which operational scenarios were developed.

UAV-based airborne gamma spectrometry systems make it possible to produce high-resolution radiation contamination maps without exposing human health to risk.

## References

1. Connor, D.; Martin, P.G.; Scott, T.B.; Martin, P.G.; Airborne, T.B.S. Airborne radiation mapping: overview and application of current and future aerial systems. *Int. J. Remote Sens.* 2016, 37, 5953–5987, doi:10.1080/01431161.2016.1252474.
2. Murphy, R.R. *Disaster Robotics*; MIT Press: Cambridge, MA, USA, 2014; ISBN 978-0-262-02735-9.
3. Schneider, F.E.; Gaspers, B.; Peräjärvi, K.; Gårdestig, M. Current State of the Art of Unmanned Systems with Potential to be Used for Radiation Measurements and Sampling; ERNCIP Thematic Group Radiological and Nuclear Threats to Critical Infrastructure Task 3 Deliverable 1; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2015; ISBN 978-92-79-48072-0, doi:10.2788/106167.
4. Duncan, B.A.; Murphy, R.R. Autonomous Capabilities for Small Unmanned Aerial Systems Conducting Radiological Response: Findings from a High-fidelity Discovery Experiment. *J. Field Robot.* 2014, 31, 522–536, doi:10.1002/rob.21503.
5. Army Technology: Honeywell T-Hawk Micro Air Vehicle (MAV). Available online: <https://www.army-technology.com/projects/honeywell-thawk-mav-us-army/>

# МІЖНАРОДНА ТА НАЦІОНАЛЬНА ПРАКТИКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОСВІТНІХ ПРОГРАМ СЕКТОРУ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ

*Олексій Жученко<sup>1</sup>, Сергій Бур'ян<sup>1</sup>, Петро Яблонський<sup>1</sup>, Микола Пихтар<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, <sup>2</sup> Славутицька філія КПІ ім. Ігоря Сікорського

**Abstract:** The work shows the developed "System of internal post-accreditation monitoring of educational programs of energy specialties", which, based on certain measures and practices, forms a holistic system of internal quality assurance of higher education in the relevant educational institutions. Each of its components must be provided with high quality and function closely with other components of the entire system. Taking into account the autonomy of educational institutions, approaches to the formation of each of its components may be different, but as a result, all of them must be provided and fully function. Only with such an approach will the quality of the educational process be ensured with maximum efficiency, which in turn will ensure the successful accreditation of the educational program and its subsequent post-accreditation monitoring.

**Keywords:** educational institution, educational programs, monitoring, accreditation, post-accreditation monitoring, certificate, academic integrity, educational and methodological support.

**Ключові слова:** заклад освіти, освітні програми, моніторинг, акредитація, постакредитаційний моніторинг, сертифікат, академічна доброчесність, навчально-методичне забезпечення.

Міжнародна та національна практики функціонування освітніх програм сектору ядерної безпеки спрямовані на підготовку фахівців для вирішення питань безпеки використання ядерної енергії, які відповідають міжнародним стандартам освіти й виробництва та відповідають нормам технічної, економічної, екологічної оцінки впливу, а також комплексної оцінки ризиків. Для створення чітких та ефективних процедур аналізу, врахування та моніторингу результатів акредитаційних експертиз освітніх програм необхідна «Система внутрішнього постакредитаційного моніторингу освітніх програм енергетичних спеціальностей».

У роботі показана розроблена «Система внутрішнього постакредитаційного моніторингу освітніх програм енергетичних спеціальностей», яка на основі певних заходів та практик формує цілісну систему внутрішнього забезпечення якості вищої освіти у відповідних закладах освіти. Кожна її складова має якісно забезпечуватися та тісно функціонувати з іншими складовими всієї системи. Враховуючи автономність закладів освіти, підходи до формування кожної її складової можуть бути різні, але в результаті всі вони мають бути забезпечені та повноцінно функціонувати. Тільки при

такому підході якість освітнього процесу буде забезпечуватися з максимальною ефективністю, що у свою чергу забезпечить успішне проходження акредитації освітньої програми та її подальший постакредитаційний моніторинг.

**Вступ.** Акредитації освітніх програм – це багатоступінний процес, під час якого визначаються можливості закладів освіти якісно здійснювати освітніх процес за різними освітніми програмами. В результаті успішної акредитації агентством, що її здійснювало, видається відповідний сертифікат, зазвичай терміном на 5 років, завдяки якому за акредитованою освітньою програмою можна здійснювати набір та видавати дипломи державного зразка випускникам. Під час проходження акредитаційної експертизи гаранту освітньої програми надаються певні рекомендації щодо покращення освітнього процесу, які необхідно врахувати до наступної акредитації через 5 років. Для контролю врахування таких рекомендацій у більшості закордонних закладів освіти впроваджено процедуру так званого постакредитаційного моніторингу (або спостереження). Такий моніторинг здійснюється під час постакредитаційного періоду у терміни, затверджені агентством, яке проводило акредитацію, наприклад Romanian Agency for Quality Assurance in Higher Education (ARACIS) проводить моніторинг по завершенню 2-го року постакредитаційного періоду [1], German Accreditation Body (DAkKS) проводить спостереження під час всього циклу постакредитаційного періоду [2], а National Evaluation and Accreditation Agency (Богларія) проводить моніторинг після 12 місяців з дати рішення про акредитацію [3]. За його результатами приймається рішення щодо допуску до наступної акредитації даної освітньої програми, подальшої роботи з врахування рекомендацій або у гіршому випадку навіть рішення про анулювання сертифіката про акредитацію.

Не зважаючи на те, що в багатьох закордонних закладах освіти вже впроваджений постакредитаційний моніторинг, в Україні він також передбачений статтею 24 Закону України про вищу освіту [4], але ще на етапі практичної реалізації Національним агентством із забезпечення якості вищої освіти (НАЗЯВО) [5]. Проте успішне проходження постакредитаційного моніторингу, як і самої процедури акредитації освітніх програм (особливо сектору ядерної безпеки), не можливе без дієвої системи внутрішнього забезпечення якості освіти, яка має базуватися як на національних так і міжнародних найкращих практиках.

**Загальна структура системи внутрішнього забезпечення якості вищої освіти (СВЗЯВО).** Загалом, СВЗЯВО повинна ґрунтуватися на місії та візії університету, мати власну політику та мету. Політика забезпечення якості вищої освіти в закладі освіти – це система цінностей і норм, цілей і завдань, принципів діяльності у сфері якості освіти та сукупність засобів, методів та шляхів її реалізації, що сформульовані в офіційних (нормативних) документах закладу освіти і визначають його стратегію розвитку.

**Формування якісного кадрового складу** є однією з найважливіших складових СВЗЯВО у будь-якому закладі освіти. Освітній процес має забезпечуватися висококваліфікованими професіоналами-практиками, які мають відповідні досягнення у професійній діяльності та відповідати освітнім компонентам які вони викладають згідно п.37-38 Ліцензійних умов провадження освітньої діяльності [6]. Також необхідно звернути увагу, що до освітнього процесу мають залучатися представники зовнішніх стейкхолдерів: роботодавці, випускники та інші науковці, в тому числі із-за кордону. Також необхідно звернути увагу на збалансованість кадрового складу: заклади освіти повинні мати кадровий потенціал у вигляді молодого покоління, в тому числі на адміністративні посади. Молоді науковці мають широко залучатися до аспірантури з метою подальшого оновлення кадрового складу, а видатні вчені та дослідники мають забезпечити їх інтеграцію в сучасне освітньо-наукове середовище.

**Система звітності та рейтингувань** має на меті тримати високий науковий та освітній рівень викладачів, а також, бути стимулом для постійного вдосконалення їх викладацької майстерності. Зрозуміло, що звітування викладачів передбачено законодавством України, проте воно не має бути перетворено на формальність. Ця процедура має бути спрямована на визначення можливих проблемних питаннях у роботі викладачів та швидкому їх усуненні.

**Система опитувань** є ключовою процедурою для отримання зворотного зв'язку від усіх стейкхолдерів (здобувачів, викладачів, роботодавців, випускників та інших осіб) стосовно якості освітніх програм та врахування їх побажань з метою покращення якості освітнього процесу. Результати опитувань, а також їх аналіз та подальше врахування, завжди є об'єктом уваги експертів під час проведення акредитацій освітніх програм та процедур постакредитаційного моніторингу. Врахування результатів опитувань дозволяють експертам оцінити наскільки ефективно освітня програма взаємодіє зі стейкхолдерами та враховує їх думку стосовно організації та реалізації освітнього процесу.

**Система запровадження, моніторингу та оновлення освітніх програм** – це комплекс заходів, метою якого є постійне забезпечення якісного освітнього процесу за затребуваними економікою освітніми програмами. В цих заходах свою роль мають відігравати абсолютно всі стейкхолдери: викладачі, здобувачі, роботодавці, випускники та інші зацікавлені особи. Запровадження нової освітньої програми починається із створення проектної групи, яка має оцінити затребуваність нової освітньої програми новою моделлю економіки, визначити зарубіжні та вітчизняні аналоги, проаналізувати майбутні компетентності та програмні результати навчання, якими оволодіють майбутні випускники, а також, визначити перелік необхідних освітніх компонент. Моніторинг існуючих освітніх програм має відбуватися не рідше ніж один раз на рік. До цього процесу залучаються всі стейкхолдери, проводяться обговорення та опитування, аналіз освітньої діяльності та наукової складової тощо.

**Щорічне оновлення змісту освітніх компонентів** є невід’ємною частиною моніторингу освітньої програми і направлене на постійне відслідковування викладачами сучасних теорій, практик, інновацій у напрямку освітніх компонентів, які вони викладають. Оновлення може бути різного рівня, починаючи від використання найсучасніших літературних джерел, закінчуючи повним переформатуванням освітнього компонента. Зрозуміло, що під час оновлення змісту освітнього компонента необхідно враховувати також результати опитування здобувачів, відгуки роботодавців та випускників.

**Академічна доброчесність** – базовий складник системи забезпечення якості вищої освіти та важливий фактор успішності університетів, їхніх науковців, викладачів та випускників. Доброчесність та якість нерозривно пов’язані і досягти одного без іншого неможливо.

**Інформаційно-комунікаційне середовище** – це комплексна система прозорого доступу усіх учасників освітнього процесу до необхідних освітніх та наукових матеріалів, документів, програмного забезпечення інших інформаційних ресурсів.

**Навчально-методичне забезпечення та Платформа дистанційного навчання** – особливі складові, без яких неможлива організація та реалізація сучасного освітнього процесу. Створення на оновлення навчально-методичного забезпечення має здійснюватися на постійній основі, в залежності від змін у наукових напрямках, які дотичні до певних освітніх компонент.

**Висновок.** Описані вище заходи та практики формують цілісну систему внутрішнього забезпечення якості вищої освіти у відповідних закладах освіти. Кожна її складова має якісно забезпечуватися та тісно функціонувати з іншими складовими всієї системи. Враховуючи автономність закладів освіти, підходи до формування кожної її складової можуть бути різні, але в результаті всі вони мають бути забезпечені та повноцінно функціонувати. Тільки при такому підході якість освітнього процесу буде забезпечуватися із максимальною ефективністю, що в свою чергу забезпечить успішне проходження акредитації освітньої програми та її подальший постакредитаційний моніторинг.

#### **Список використаних джерел:**

- [1] <https://www.aracis.ro/en/about-aracis/>
- [2] <https://www.dakks.de/en/step-5-monitoring.html#tab>
- [3] <https://www.neaa.government.bg/en/legislation>
- [4] <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text>
- [5] <https://en.naq.gov.ua/?p=2510>
- [6] <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/365-2021-%D0%BF#Text>

## POST-ACCIDENT RADIATION MONITORING

*Kazymyrov O.S., Ievliev S.M., Chorny E.V. Bykovsky V.Yu.*

Research and Production Enterprise "AtomComplexPrylad",  
Yakova Hnizdovskoho Street 1, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: akp@akp.kiev.ua

Uncontrolled emissions of radionuclides to the atmosphere, water or ground environment may occur due to normal operation and the accident.

Permanent monitoring is an important and necessary component of the gaseous and liquid effluents' control. Both the source and the environment monitoring for ensuring the protection of the population and the environment effect it.

Military actions on the territory of Ukraine, especially in the areas adjacent to the nuclear facilities, may cause the gaseous and liquid effluents', which may lead to the regional nuclear accident. Sources of releases may include:

- NPPs, including the reactor facility and elements necessary for its operation, as well as
- Spent nuclear fuel or radioactive waste storage facilities.

The possible military actions' consequences expand the list of radionuclides present in the releases. In the event of a severe accident, monitoring should also be conducted outside the sanitary protection zone and observation area.

(a) the presence of short-lived radionuclides in the environment, including radioactive noble gases, which cause high intensities and gradients of gamma fields; (b) significant releases of iodine radioisotopes in the early phase of the accident result in the so-called iodine period, during which there is a serious threat of inhalation and ingestion of these radionuclides into the human body and, as a result, thyroid exposure of the population, especially children; (c) surface contamination of pastures, hayfields, and agricultural products."

The monitoring program includes the types of measurements, their frequency, locations of stationary monitoring posts, recommendations on locations and frequency of sampling of air, water, soil, agricultural products, etc. This may include:

- Continuous measurement and recording of gamma radiation dose rate, concentration of radionuclides in the air, and aerosol activity at 4 locations in the immediate vicinity of the nuclear facility;
- Sampling of precipitation in the facility environment;
- Radiation monitoring of the terrestrial environment should include sampling of topsoil, agricultural products, sampling of pasture grass and milk;
- Continuous automatic measurement of gamma radiation dose rate at the locations specified in the license;
- Continuous measurement of meteorological parameters;
- Regular sampling of water and sediment samples, flora and fauna in the discharge water bodies, continuous measurement of river water flow;
- Monitoring of groundwater and, if necessary, other water bodies when used as a source of drinking water;

- Radiation monitoring of the critical population (in case of a severe accident).

The monitoring support needs technical and methodological means. The authors propose a draft of a radiation measurements system, based on proven technical and methodological developments, which may cover part of the monitoring needs, namely the laboratory measurements:

- Operational means of detecting radiation anomalies and characterizing radiation contamination of objects by gamma emitters:

- At acute stage of the accident all measurement need to be effected using mobile laboratory I order to fix the plume.

- Once the radiation situation becomes better it feasible to use Portable spectrum recorder PRS-01. This device can be used as an operational dosimeter.

- Gamma radiation scintillation spectrometer SEG-001m "AKP-S" "Lesovik" is designated for express control of not exceeding the permissible levels of contamination of agricultural and forest products, etc. packed in primary containers (boxes).

- SICH-ACP whole –body counters are designated for gamma-emitting radionuclides’ content determination in the human body. The measurement procedure is approved in accordance with the established procedure.

- The gamma radiation spectrometer SEG-001m "AKP-S"-TRO is designed to determine the isotopic composition and activity of gamma-emitting radionuclides in solid radioactive waste of the first and second groups without sampling directly in packages of various shapes. It is implemented at all Ukrainian NPPs and can be used for similar work during the liquidation of the accident consequences.

- Systems for monitoring the activity of the first circuit coolant and controlling the specific activity of liquid radioactive waste are installed at almost all operating reactors. These systems are used for operational needs of the NPP. An important area of monitoring in emergency conditions is the measurement in the laboratory of a significant flow of heterogeneous environmental samples.

- Achieving sufficient reliability and efficiency of measurements requires the introduction of a measurement quality system. For this purpose, we have developed and implemented the AKLAB system in a number of laboratories in Ukraine.

- It maintains a database containing information about the sample:

- number and name of sample, measuring instrument, performer and date, place of selection, time of measurements, measurement results, compliance of results with established safety criteria.

In addition, it is possible to enter data on the state of the environment: temperature, humidity in the laboratory, date and time of measurement of the radiation background in the laboratory, relevant information, minimum detectable activity (MDA) for certain nuclides. Such information is necessary to carry out the following data analysis.

# ASSESSMENT OF RADIATION SITUATION IN GROUND LEVEL AIR IN SITE NEAR COMPLEX NSC-SO

*Kalynovsky Olexander, Krasnov Victor, Khan Valery, Filippov Olexey*

Institute for Safety Problems of NPP of NAS of Ukraine, Chornobyl, Ukraine  
o.kalynovsky@ispnpp.kiev.ua

**Abstract:** For assessment of radiation situation, the results of long-term monitoring of radioactive aerosols (RA) in the ground level air near the Shelter Object (SO) in stages of creation, commissioning and operation the the New Safe Confinement (NSC) were used. The composition of long-lived nuclides (LLN) in RA are included nuclides:  $\Sigma\alpha$ - LLN ( $^{238}, ^{239}, ^{240}\text{Pu}, ^{241}\text{Am}$ ) and  $\Sigma\beta$ - LLN ( $^{137}\text{Cs}, ^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}, ^{241}\text{Pu}$ ).

The mains worse of aerosol situation in air were: in 2010, at earthworks at build foundation strips of the NSC, the average annual volumetric activity (AAVA) of  $\Sigma$ -LLN rose to 80 mBq/m<sup>3</sup>, and weekly maximum activity reached to 6 mBq/m<sup>3</sup> for  $\Sigma\alpha$ -LLN and for  $\Sigma\beta$ -LLN to 520 mBq/m<sup>3</sup>; in 2016, at dismantling concrete and metal structures of SO, the AAVA of  $\Sigma$ -LLN was 62 mBq/m<sup>3</sup>, and weekly maximum activities were for  $\Sigma\alpha$ -LLN – 18 mBq/m<sup>3</sup> and  $\Sigma\beta$ -LLN – 1400 mBq/m<sup>3</sup>. After the commissioning of NSC complex the VA of  $\Sigma$ -LLN significantly decreased to 0.6 mBq/m<sup>3</sup>. This indicates the effectiveness of environmental protection by the NSC from radioactive releases of SO.

During aerosol sampling from 12.02.2025 to 18.02.2025, occurred the direct strike of combat drone into the NSC arch structure. The maximum VA of  $\Sigma$ -LLN – 1.7 mBq/m<sup>3</sup> were recorded at sampling point “Northwest”. It was a significant increasing in compare with VA in January 2025, but close to the AAVA of  $\Sigma$ -LLN was 0.44 mBq/m<sup>3</sup>, at a maximum of 1.3 mBq/m<sup>3</sup>. Conservative estimates of values activity of  $\Sigma$ -LLN at the accident don’t exceed the established reference levels.

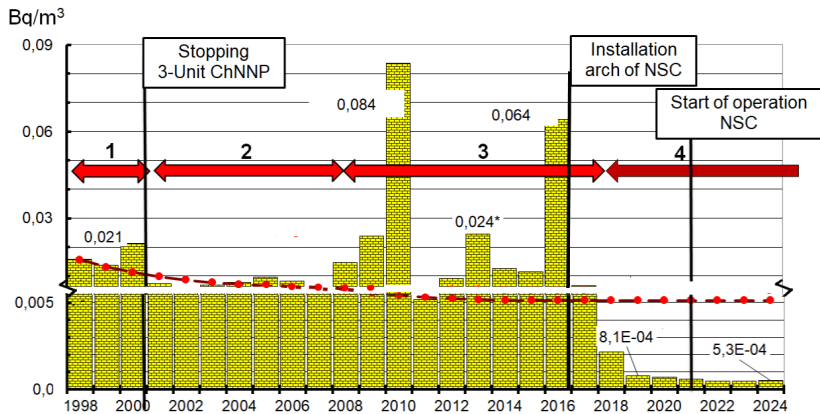


Figure. Dynamics of average annual volumetric activity of  $\Sigma$ LLN in ground level air near SO

For assessment of radiation situation, the results of long-term monitoring of radioactive aerosols (RA) in the ground level air near the Shelter Object (SO) during works by implementing projects to creation the New Safe Confinement (NSC), and also commissioning and operation the NSC were used. The composition of long-lived nuclides (LLN) in RA are included following nuclides:  $\Sigma\alpha$ - LLN ( $^{238}, ^{239}, ^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) and  $\Sigma\beta$ - LLN ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ). RA near the Shelter Object layer sampled by three aspiration units [1, 2 ].

The dynamics of annual average volumetric activity (AAVA) of  $\Sigma$ -LLN in air near SO from 1998 to 2024 period is presented in Figure. Time analysis of dynamics allows to select four periods at a conversion of SO into an ecologically safe system.

First period from 1998 to 2000 years, when ChNPP's last power Unit 3 had been operated yet. At that time, the average volumetric activity (VA) of  $\Sigma$ -LLN was about 17 mBq/m<sup>3</sup>. Second period from 2001 to 2007, stage of realization of stabilization measures to provide stability of unstable building structures of ruined building of power Unit 4. The main worse of aerosol situation near SO was in third period from 2008 to 2017, when activity of RA increased ten-fold as compare to preliminary stage. The growing of RA activity was connected with radioactive dust resuspension during technological works. At earthworks at build foundation strips of the NSC in 2010 [2], the average annual VA of  $\square$ -LLN rose to 80 mBq/m<sup>3</sup>, and weekly maximum activity reached to 6 mBq/m<sup>3</sup> for  $\Sigma\alpha$ -LLN and for  $\Sigma\beta$ -LLN to 520 mBq/m<sup>3</sup>. At dismantling concrete and metal structures of SO in 2016, average annual activity of  $\Sigma$ -LLN was 62 mBq/m<sup>3</sup>, and weekly maximum activity increased to  $\Sigma\alpha$ -LLN – 18 mBq/m<sup>3</sup> and  $\Sigma\beta$ -LLN – 1400 mBq/m<sup>3</sup>. The fourth period from 2019 to 2024 came after the commissioning of the NSC complex when the average annual VA of  $\Sigma$ -LLN air significantly decreased to 0.6 mBq/m<sup>3</sup>. This indicates the effectiveness of environmental protection by the NSC complex from radioactive releases of SO.

During the aerosol sampling from 12.02.2025 to 18.02.2025, occurred the accident related to the direct strike of combat drone on 14.02.2025 into the NSC arch structure. The average value of the VA of  $\square$ -LLN in ground level air at of the site of NSC-SO complex was 0.94 mBq/m<sup>3</sup>. The maximum values VA of  $\Sigma\alpha$ -LLN – 0.034 mBq/m<sup>3</sup> and  $\Sigma\beta$ -LLN – 1.7 mBq/m<sup>3</sup> were recorded at sampling point No. 2 (“Northwest”) it was a significant increasing in compare with an aerosol activity in January 2025 when values VA were for  $\Sigma\alpha$ -LLN – 0.034 mBq/m<sup>3</sup> and  $\Sigma\beta$ -LLN – 0.054 mBq/m<sup>3</sup>. At the same time the average annual value of the VA of  $\square$ -LLN at sampling point No. 2 for 2024 was 0.44 mBq/m<sup>3</sup>, at a maximum value of 1.3 mBq/m<sup>3</sup>. Conservative estimates of the possible values activity of  $\square$ -LLN at the accident do not exceed the established reference levels. A minor radioactive release during the drone strike confirms the reliability of the arch design for environmental protection from radioactive contamination.

**Keywords:** monitoring of radioactive aerosols, long-lived nuclides, volumetric activity, New Safe Confinement.

## References

1. O. K. Kalynovskyi, V. O. Krasnov, O. V. Filippov Radioactive Aerosols Monitoring of the Surface Air near the Shelter Object within 1998–2019 // Nuclear Power and Environment - 2021. - № 3 (22). - P 78 – 83.

2. Kalynovsky A.K., Krasnov V. A., Ogorodnikov B. I. Radioactive aerosols in the local area of "Ukryttya" object during 2009 – 2010 // Problems of Nuclear Power Plants and of Chernobyl, - 2011. - v. 17, - P. 106 – 112.

## ОЦІНКА РАДІАЦІЙНОЇ СИТУАЦІЇ В ПРИЗЕМНОМУ ШАРІ ПОВІТРЯ ПОБЛИЗУ КОМПЛЕКСУ НБК-ОУ

*Калиновський Олександр, Краснов Віктор, Хан Валерій, Філіннов Олексій*

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль, Україна  
o.kalynovsky@isnpp.kiev.ua

Для оцінки радіаційної обстановки було використано результати довготривалого моніторингу радіоактивних аерозолів (РА) у приземному шарі повітря поблизу об'єкта «Укриття» (ОУ) під час робіт з реалізації проєктів зі створення Нового безпечного конфайнменту (НБК), а також введення в експлуатацію та експлуатації НБК. Склад довгоживучих нуклідів (ДЖН) у РА включає такі нукліди:  $\Sigma\alpha$ -ДЖН (238, 239, 240Pu, 241Am) та  $\Sigma\beta$ -ДЖН (137Cs, 90Sr+90Y, 241Pu). Проби шару РА поблизу об'єкта «Укриття» відбиралися трьома аспіраційними установками [1, 2].

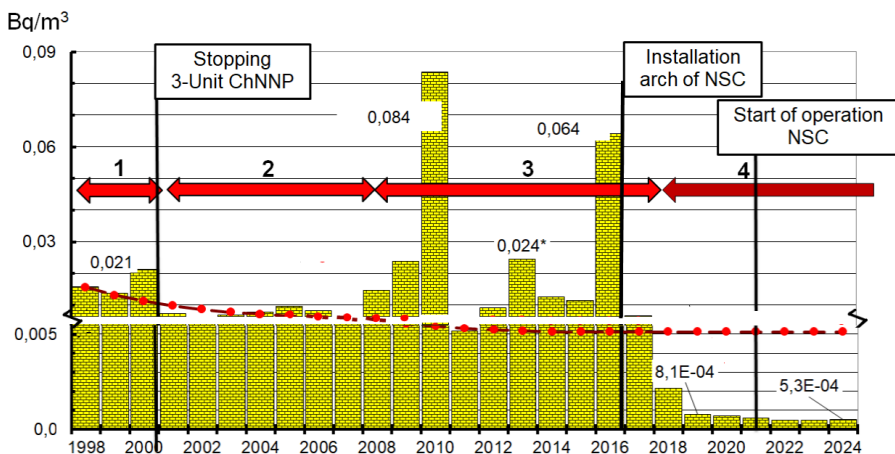


Рисунок. Динаміка середньорічної об'ємної активності  $\Sigma LLN$  у приземному повітрі поблизу ОУ

Динаміка середньорічної об'ємної активності (ОА)  $\Sigma$ -LLN у повітрі поблизу LLN з 1998 по 2024 рік представлена на рисунку. Часовий аналіз динаміки дозволяє виділити чотири періоди перетворення ОУ на екологічно безпечну систему..

Перший період з 1998 по 2000 роки, коли ще працював останній енергоблок №3 ЧАЕС. На той час середня ОА  $\Sigma$ -ДЖН становила близько 17 мБк/м<sup>3</sup>. Другий період з 2001 по 2007 рік, це етап реалізації стабілізаційних заходів для забезпечення стійкості нестабільних будівельних конструкцій зруйнованої будівлі енергоблоку №4. Основне погіршення аерозольної ситуації поблизу ОУ спостерігалось протягом третього періода з 2008 по 2017 рік, коли активність РА зросла в десять разів порівняно з попереднім етапом. Зростання активності РА було пов'язане з ресуспензією радіоактивного пилу під час технологічних робіт. Під час земляних робіт при будівництві фундаментних смуг НБК у 2010 році [2] середньорічна ОА  $\Sigma$ -ДЖН зросла до 80 мБк/м<sup>3</sup>, а тижнева максимальна активність досягла 6 мБк/м<sup>3</sup> для  $\Sigma\alpha$ -ДЖН та 520 мБк/м<sup>3</sup> для  $\Sigma\beta$ -ДЖН.

Під час демонтажу бетонних та металевих конструкцій ОУ у 2016 році середньорічна активність  $\Sigma$ -ДЖН становила 62 мБк/м<sup>3</sup>, а тижнева максимальна активність зросла до  $\Sigma\alpha$ -ДЖН – 18 мБк/м<sup>3</sup> та  $\Sigma\beta$ -ДЖН – 1400 мБк/м<sup>3</sup>. Четвертий період з 2019 по 2024 рік настав після введення в експлуатацію комплексу НБК, коли середньорічна активність повітря  $\Sigma$ -ДЖН значно знизилася до 0,6 мБк/м<sup>3</sup>, що свідчить про ефективність захисту навколишнього середовища комплексом НБК від радіоактивних викидів ОУ.

Під час відбору проб аерозолі з 12.02.2025 по 18.02.2025 сталася аварія, пов'язана з прямим ударом бойового безпілотної 14.02.2025 в арочну конструкцію НБК. Середнє значення активності аерозолі  $\Sigma$ -ДЖН у приземному повітрі на майданчику комплексу НБК-ОУ становило 0,94 мБк/м<sup>3</sup>. Максимальні значення активності аерозолі  $\Sigma\alpha$ -ДЖН – 0,034 мБк/м<sup>3</sup> та  $\Sigma\beta$ -ДЖН – 1,7 мБк/м<sup>3</sup> були зафіксовані на пункті відбору проб № 2 («Північно-західна»), що є значним збільшенням порівняно з активністю РА у січні 2025 року, коли значення ОА становили для  $\Sigma\alpha$ -ДЖН – 0,034 мБк/м<sup>3</sup> та  $\Sigma\beta$ -ДЖН – 0,054 мБк/м<sup>3</sup>. Водночас середньорічне значення активності  $\Sigma$ -ДЖН на пункті № 2 за 2024 рік становило 0,44 мБк/м<sup>3</sup>, при максимальному значенні 1,3 мБк/м<sup>3</sup>. Консервативні оцінки можливих значень активності  $\Sigma$ -ДЖН на момент аварії не перевищують встановлені контрольні рівні. Незначний радіоактивний викид під час удару дрона підтверджує надійність конструкції арки для захисту навколишнього середовища від радіоактивного забруднення.

**Ключові слова:** моніторинг радіоактивних аерозолів, довгоживучі нукліди, об'ємна активність, новий безпечний конфайнмент.

# STUDY OF <sup>90</sup>Sr INCREASED MIGRATION CONDITIONS WITH GROUNDWATER IN THE ZONE OF CHORNOBYL NPP INDUSTRIAL SITE INFLUENCE

*Kovalenko I., Panasiuk M., Sosonna N. , Levin G., Roenko G., Buzynnyi M.*

**Kovalenko I.** (Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl, maddoc01001@gmail.com),

**Panasiuk M.** (Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl, [nipanasjuk53@gmail.com](mailto:nipanasjuk53@gmail.com)),

**Sosonna N.** (Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl, natalyasosonnaya@gmail.com ),

**Levin G.** (Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl, [georglevin1961@gmail.com](mailto:georglevin1961@gmail.com)),

**Roenko G.** (Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl, [roenkogrigorij7@gmail.com](mailto:roenkogrigorij7@gmail.com)),

**Buzynnyi M.** (O. M. Marzeyev Institute of Public Health, Ukraine, Kyiv, michael.buzinny@gmail.com)

**Abstract:** Study shows the conditions under which high <sup>90</sup>Sr concentrations are formed in the interval of neutral or close to neutral (pH = 6.5-7.5) groundwater at the ChNPP industrial site. The study is based on samples from well 21-1A .

It was found that high volumetric activity of <sup>90</sup>Sr in groundwater, in the range of 50-2550 Bq/l, are formed under the influence of ionic strength (IS). The data obtained during the monitoring observations at the ChNPP industrial site show that the dynamics of <sup>90</sup>Sr activity concentration increase in the observation wells is similar to the dynamic of groundwater IS increase from low values of 2-5 mmol/l to about 18.2 mmol/l. Increased volumetric activity of <sup>90</sup>Sr in groundwater fully or almost correlate with high values of ionic strength, concentration of chlorine, nitrate, sulfate, bicarbonate, potassium and sodium ions. Similarly, calcium ions fluctuate synchronously with the dynamic of <sup>90</sup>Sr distribution.

Such data shows that <sup>90</sup>Sr, cations and anions have the same rate of distribution with groundwater, in other words, practically without sorption, as is usually typical for chloride ions (Cl<sup>-</sup>), nitrate ions (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfate ions (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), bicarbonate ions (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)... If the ionic strength of groundwater exceeds 10-12 mmol/l, the sorption properties of soils decrease.

## **Introduction**

The monitoring observations were analyzed for well 21-1A, as an example (Fig. 1). Well located near the New Safe Confinement - Shelter Object (NSC-SO Complex). The high volumetric activity of <sup>90</sup>Sr was observed in groundwater samples from this well, the source of which is radioactively contaminated soil.



Figure 1. General scheme for the NSC-SO complex, and well 21-1A location.

containing low concentrations (up to 5 mmol/L = 200 mg/L) of Ca<sup>2+</sup> and/or Na<sup>+</sup>. At higher ionic strength, competing ions cause a decrease in <sup>90</sup>Sr sorption.

In a study (Powell et al., 2014) on the determination of sorption coefficients for radium and stable strontium in soils at the Savannah River Site (SRS), it was found that the sorption of radium and strontium by soils is strongly dependent on ionic strength due to competition for ion exchange sites.

The purpose of this work is to determine the factors that lead to the formation of an increased migration capacity of <sup>90</sup>Sr in a real aquifer based on long-term monitoring observations.

## Results

The calculation of <sup>90</sup>Sr migration forms in neutral groundwater was performed using the Geochemist's Workbench Community Edition software package. To confirm and understand the migration processes, the distribution of various <sup>90</sup>Sr complex compounds, such as SrCO<sub>3</sub><sup>0</sup>, SrHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>, SrSO<sub>4</sub><sup>0</sup>, SrOH<sup>+</sup> and SrNO<sub>3</sub><sup>+</sup>, with groundwater was modeled based on hydrochemical analyses of samples from well 21-1A. Materials and methods are described in detail in (Kovalenko et al., 2023).

Figure 2 shows the

The share of water contamination in the Pripyat and Uzh rivers due to radionuclides entering with groundwater reaches 34% (Kireev et al., 2011), and in low water periods it increases to 60-65%. (Bugai et al., 2010).

The analysis of the distribution coefficient of <sup>90</sup>Sr as a function of the ionic strength of the solution led to the conclusion that a higher ionic strength, caused by the presence of competing ions, primarily Na<sup>+</sup>, in the tank liquid, leads to a much lower observed sorption. Also, the article (Wallace et al., 2012) shows that the effects of cationic competition are not important in systems with low ionic strength (IS = 8 mmol/L) and in solutions

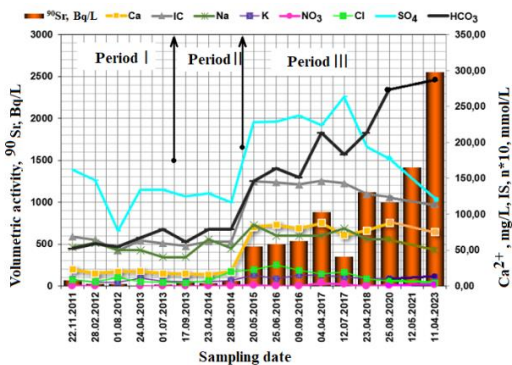


Figure 2. Dynamics of changes in pH, IS, volumetric activity of <sup>90</sup>Sr, and individual components of chemical composition in groundwater samples from well 21-1A.

dynamics of  $^{90}\text{Sr}$  volumetric activity, according to radiohydroecological monitoring data. High concentrations of  $^{90}\text{Sr}$  are always accompanied by relatively high values of IS, varying in the range of 13.8-18.2 mmol/L, with "background" values of 2-5 mmol/L.

A comparative analysis of the dynamics of changes in the components of chemical composition in the observation well (Fig. 2) shows that the concentrations of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  anions, which are transferred with groundwater without being sorbed, increase simultaneously with the concentrations of calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ) and potassium ( $\text{K}^+$ ) cations and of  $^{90}\text{Sr}$  in the II-III periods.

In the computational experiment for well 21-1A, in groundwater observed increase in the pH range of 6.2-7.1, in the concentration of strontium in the form of  $\text{SrSO}_4^0$  and a decrease in the form of the cation  $\text{Sr}^{2+}$ . Proportion of  $^{90}\text{Sr}$  in the form of a soluble neutral complex compound that is not sorbed reaches 12.0-15.5% (Table 1). This is also a significant factor in the increased migration of  $^{90}\text{Sr}$ .

*Table 1.* pH, chemical composition, volumetric activities and forms of  $^{90}\text{Sr}$  in groundwater from well 21-1A, depending on the monitoring period, mg/L.

Components of the chemical composition	Sampling date, period	
	Period I	Period III
	28.02.2012	12.07.2017
pH	6,20	6,65
Forms of $^{90}\text{Sr}+\text{Sr}^{2+}$ , mg/L		
Water type	Na-SO <sub>4</sub>	Na-SO <sub>4</sub>
SrCO <sub>3</sub> <sup>0</sup>	0,00002	0,00021
SrHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0,00659	0,02766
SrSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	0,2742	0,3304
% $^{90}\text{Sr}$ in form of SrSO <sub>4</sub> <sup>0</sup>	12,9	15,5
SrOH <sup>+</sup>	0,00000	0,00000
Sr <sup>2+</sup> + $^{90}\text{Sr}$	0,86490	0,8257
SrNO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0,00069	0,00035
Ionic strength, mmol/L	5,8	12,1

## Conclusions

Increase in ionic strength of groundwater above 7-9 mmol/L significantly reduces the sorption of  $^{90}\text{Sr}$  by soils and creates conditions for its migration with groundwater. This coincides with the results obtained (Wallace et al., 2012).

An important factor of increase of the  $^{90}\text{Sr}$  migration capacity with groundwater is the formation of  $^{90}\text{Sr}$  complexes with inorganic compounds anions. Increased  $^{90}\text{Sr}$  migration capacity in neutral waters associated with its significant content (12-15.5%) in the form of a soluble neutral complex compound  $\text{SrSO}_4^0$ , which is poorly or not sorbed by soils.

So, the factors influencing on increased migration capacity of  $^{90}\text{Sr}$  are - the ionic strength of groundwater, formation of strontium complex compounds.

## References:

Bugai, D., Tkachenko, E., Yan Meer, N., Kurilo, C., & Kubko, Y. (2010). Hydrochemical rehabilitation processes in groundwater PTLRV Rudiysk Lis. *CHERNOBYL SCIENTIFIC BULLETIN*, 2(36), 3–13.

Kireev, S. V., Godun, B. O., Vyshnevsky, D. O., Obrizan, S. M., & Gyrin, O. S. (2011). Radiation rate in the territory of the exclusion zone in 2010. *Chornobyl Science Newsletter. Bulletin.*, 1(37), 37–62.

Kovalenko, I. O., Panasiuk, M. I., Sosonna, N. V., Levin, G. V., Lushnia, P. A., Palamar, L. A., Buzynnyi, M. G., & Onyshchenko, I. P. (2023). Influence of Solution Ionic Strength on the Formation of Increased <sup>90</sup>Sr Migration in Groundwater of the Chernobyl NPP Industrial Site. *Nuclear Power and the Environment*, 1(26), 47–54. <https://doi.org/https://doi.org/doi.org/10.31717/2311-8253.23.1.5>

Powell, B. A., Miller, T., & Kaplan, D. I. (2014). On the Influence of Ionic Strength on Radium and Strontium Sorption to Sandy Loam Soils. *Journal of the South Carolina Academy of Science*, 13–18. <https://scholarcommons.sc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1106&context=jscas>

Wallace, S. H., Shaw, S., Morris, K., Small, J. S., Fuller, A. J., & Burke, I. T. (2012). Effect of groundwater pH and ionic strength on strontium sorption in aquifer sediments: Implications for <sup>90</sup>Sr mobility at contaminated nuclear sites. *Applied Geochemistry*, 27(8), 1482–1491. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.04.007>

## ПОРУШЕННЯ ПРОЕКТНОГО РЕЖИМУ ВЕНТИЛЯЦІЇ КІЛЬЦЕВОГО ПРОСТОРУ І ПРОСТОРУ ПІД АРКОЮ В РЕЗУЛЬТАТІ ПРЯМОГО ВЛУЧАННЯ ДРОНА В АРКУ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТУ

*Круковський Павло\**, *Склярєнко Дмитро\**, *Кондратенко Сергій\*\**,  
*Кузьменко Володимир\*\**

\*Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а,  
Ел. адреса: [kruk\\_2@ukr.net](mailto:kruk_2@ukr.net)

\*\*ДСП Чорнобильська АЕС м. Славутич Київської області, Україна 07101,  
Ел. адреса: [kondratenko@chnpp.gov.ua](mailto:kondratenko@chnpp.gov.ua)

**Annotation.** The paper presents the results of applying the NSC hydraulic state model to analyze the unorganized air exchange of the main volume and annular space with the surrounding environment using the sample of operational measurements provided by the ChNPP for the period from 10.03 to 16.04.2025. By agreement with the ChNPP, the use of the sample of operational parameters of the NSC after the drone attack was performed to analyze the air exchange of the NSC with the surrounding environment after the drone attack with estimated areas of air leaks from the RA.

The paper shows for the first time the continuous dynamics of changes in the flow of unorganized air (low emission) from the main volume of the NSC to the surrounding environment for the specified period at an arbitrary wind direction and

speed. Also measured and calculated dependences of pressure drops at the values of leak areas provided by the Chernobyl NPP, calculated flows through unorganized air leakage points from the RA, both after the drone attack and if the drone attack had not occurred with constant values of VU flows at the level of 2024, as well as the value of the fraction of air entering the MV and exiting under the walls and through the NSC shells.

Новий Безпечний Конфайнмент (НБК) ЧАЕС побудований з метою перетворення будівельних конструкцій Об'єкта «Укриття» (ОУ) в екологічно безпечну систему. Пряме влучання дрона в Арку НБК 14.02.2025 р. призвело до порушення проектної герметичності кільцевого простору (КП) та основного об'єму (ОО), що при аварійних ситуаціях може призвести до небезпеки персоналу, населення та навколишнього середовища НБК оскільки в кільцевому просторі (КП) НБК не підтримується надлишковий тиск (5-20 Па), а в основному об'ємі (ОО) не підтримується негативний тиск (мінус 5-10 Па) при всіх напрямках і швидкостях вітру.

Атака дрона призвела до руйнування циліндричної частини зовнішньої оболонки НБК, де виник отвір розміром  $15 \text{ м}^2$ , та додаткових отворів в південно-західній (розміром  $1 \text{ м}^2$ ), південно-східній (розміром  $55 \text{ м}^2$ ) та північно-східній (розміром  $2 \text{ м}^2$ ) частинах НБК.

Метою роботи є оцінка об'ємів повітрообміну НБК з оточуючим середовищем (ОС) після атаки дрона 14.02.2025 р. на зовнішню оболонку НБК. Оцінки повітрообміну виконувалась за допомогою моделі гідравлічного стану НБК Інституту технічної теплофізики НАН України (ІТТФ) і частини (37 діб) експлуатаційних даних ЧАЕС з 10.03 – по 16.04.2025 р. Зробити порівняння об'ємів повітрообміну НБК з ОС і в самому НБК при атаці дрона та відсутності атаки.

### **Результати роботи.**

Для оцінки порушення проектного режиму вентиляції кільцевого простору і простору під аркою в результаті прямого влучання дрона в Арку НБК для моделювання низького викиду за межі НБК були використані наступні експлуатаційні дані ЧАЕС за період з 10.03.2025 по 16.04.2025р.:

- зміни напрямку та швидкості вітру.
- значення витрат припливних та витяжних вентиляційних установок (ВУ) в кільцевому і основному об'ємах НБК були відсутні, оскільки система вентиляції НБК не працювала.
- значення датчиків перепадів тиску між об'ємами НБК і зовнішнім середовищем.
- оцінки площ додаткових отворів протічок після атаки дрона.

Необхідні для визначення низького викиду повітря (повітрообміну), умовні площі протічок і розподіл тиску на поверхні НБК розраховуються за розробленими ІТТФ моделями гідравлічного стану НБК [1] і моделі зовнішнього обтікання НБК [2].

Після атаки дрона в розрахунках використовувались значення площі протічки зовнішньої оболонки між КП і ОС ( $15,7 \text{ м}^2$ , збільшена на  $15 \text{ м}^2$ ) на циліндричному даху (ЦД), між об'ємів КП і ОО  $9,0 \text{ м}^2$  (змінювалась на  $1 \text{ м}^2$ ), площа протічки під західною стіною (ЗП)  $2,72 \text{ м}^2$  (змінювалась на  $1 \text{ м}^2$ ) і площа

протічки під східною стіною (62,6 м<sup>2</sup>, збільшена на 57 м<sup>2</sup>), включно площу протічки на ділянці вентиляції ДСРВ 2,4 м<sup>2</sup>.

На рис. 1 наведені розрахунки об'ємів повітрообміну НБК з оточуючим середовищем після атаки дрона на зовнішню оболонку НБК. На рис.1 червона лінія показує найбільші об'єми повітря із ОС в ОО НБК в більшості напрямків повітря через найбільшу площу протічки 62,6 м<sup>2</sup> в східній стіні. На рис.1 чорні точки також показують суттєві об'єми перетоку повітря вже із ОО в КП через протічки в 9,0 м<sup>2</sup> і далі із КП в ОС через площу протічки 15,7 м<sup>2</sup> в циліндричній частині зовнішньої оболонки НБК.

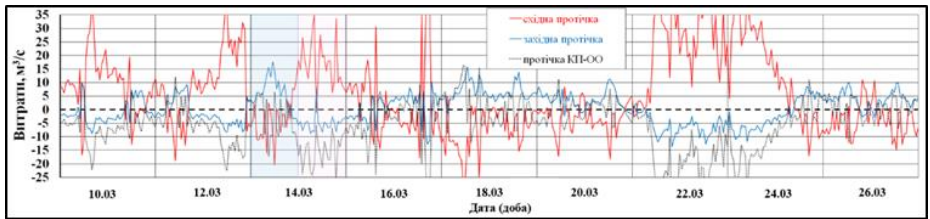


Рис. 1. Залежності витрат повітря з РА від часу для 37 діб з 10.03.2025 по 16.04.2025

Рис.1 показує широкий діапазон витрат (до 35 м<sup>3</sup>/с) через східну протічку площею 62,6 м<sup>2</sup> і менший (до 10 м<sup>3</sup>/с) через західну протічку площею 2,72 м<sup>2</sup>.

Для порівняння результатів на рис.1 витрати повітря до атаки дрона від часу для тих-же 37 діб з 10.03 по 16.04 мають позитивні значення, що свідчить про повну відсутність низького викиду за межі НБК без атаки дрона при нормальній роботі системи вентиляції.

### Висновки.

- 1) Атака дрона призвела до повної розгерметизації кільцевого і основного об'ємів НБК і відсутності підтримки проектних параметрів (перепадів тисків, вологості та інше) за допомогою існуючої системи вентиляції.
- 2) Різко підвищився повітрообмін об'ємів НБК з оточуючим середовищем, який має місце при всіх напрямках і швидкостях вітру.
- 3) Змінились основні напрямки потоків повітря в об'ємах НБК, які до атаки перетікали із кільцевого простору і оточуючого середовища через протічки в основний об'єм НБК і далі витяжкою через фільтри назовні, а після атаки повітря прямує тільки із оточуючого середовища через протічки в основний об'єм НБК і далі майже весь потік в кільцевий простір і назовні через зруйновану частину циліндричного даху НБК.
- 4) Порівняння результатів залежностей витрат повітря після атаки і без атаки дрона показали майже повну відсутність низького викиду із НБК в сценарії без атаки, що показує необхідну роботу системи вентиляції.
- 5) Переток великої кількості повітря із основного об'єму НБК в кільцевий простір і оточуюче середовище призводить до вільного виходу радіоактивного пилу, який може виходити із Об'єкту Укриття при різних

ситуаціях і при всіх напрямках і особливо швидкостях вітру, що вперше показано на рис.1 (див. негативні значення).

### **Перелік посилань.**

1. Круковський П.Г, Скляренко Д.І, Дядюшко Є.В., Кондратенко С.О. Аналіз неорганізованого повітрообміну Нового Безпечного Конфайнменту з оточуючим середовищем (попередні результати моделювання за експлуатаційними даними) // V міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища» INUDECО, 27–29 квітня, 2020 р., м. Славутич, Україна. – с.109-117.

2. Скляренко Д.І, Круковський П.Г, Дядюшко Є.В. Модель вітрового обтікання та розподілу тисків на поверхнях Нового безпечного конфайнмента ЧАЕС // VII міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища» INUDECО, 27–28 квітня, 2022 р., м. Славутич, Україна. – с.79-81.

## **ПІДХІД ДО ПОДОЛАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ХАОСУ НА ПОРТАЛАХ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ**

*Кряжич Ольга<sup>1</sup>, Іванов Іван<sup>1</sup>, Коваленко Олександр<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,  
м. Київ, Україна,

<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, м. Київ, Україна,  
economconsult@gmail.com

### **Resume**

An approach to cleaning user queries to online assistants created on the basis of artificial intelligence is proposed, which allows breaking down the information block of the query by constructing piecewise linear attractors. Paired semantic expressions are formed based on the query text. Based on the specified semantic expressions, a query is formed that is cleared of information noise, which ultimately leads to chaos and an incorrect answer. A new query is created from these expressions, which allows you to get the most accurate answer from the chatbot. The task is solved by presenting a methodology for controlling the selection of substitute words, based on the operations of generating the next substitution and calculating the number of a given substitution. An application has been created and initially tested that simulates the process of constructing a user query with transmission according to the rules of the user's natural language. The user chooses one of two modes: splitting or permutation. After that, the user can specify the paths to three files intended for recording the source information, the transcoded expression, and the converted information.

Based on the proposed work is underway to implement an online assistant on the new version of the site "Tritium on Planet Earth" with further testing, which involves restricting access to individual results and topics. The proposed work can be used in practical activities to improve chatbot technologies based on generative artificial intelligence, to form key data sets for artificial intelligence systems to solve problems with a logical component, as well as to increase the efficiency of the work of specialists involved in environmental restoration after disasters and military operations.

### **Анотація**

Запропоновано підхід до очищення запитів користувачів до онлайн-помічників, створених на основі штучного інтелекту, який дозволяє розбити інформаційний блок запиту шляхом побудови кусочно-лінійних атракторів. Формуються парні смислові вирази за текстом запиту. На основі зазначених смислових виразів формується запит, очищений від інформаційного шуму, що у підсумку призводить до хаосу та невірної відповіді. З цих виразів створюється новий запит, який дозволяє отримати найбільш точну відповідь від чат-боту. Завдання вирішено з представленням методики механізму управління вибором слів-замінників, заснованої на операціях генерації наступної підстановки і обчислення номера заданої підстановки. Створено та первинно апробовано додаток, який імітує процес побудови запиту користувача з передачею за правилами природної мови користувача. Користувач вибирає один із двох режимів: розбиття або перестановка. Після цього користувач має змогу задати шляхи до трьох файлів, призначених для запису вихідної інформації, перекодованого виразу та перетвореної інформації.

На основі запропонованого триває робота з реалізації онлайн-помічника на новій версії сайту «Тритій на планеті Земля» з подальшим тестуванням, яке передбачає обмеження доступу до окремих результатів і тем. Запропоноване може бути використане у практичній діяльності для вдосконалення технологій чат-ботів, що працюють на основі генеративного штучного інтелекту, формування ключових наборів даних систем штучного інтелекту для вирішення задач з логічною складовою, а також для підвищення оперативності роботи фахівців, які займаються проблемами відновлення довкілля після катастроф та військових дій.

Наслідки екоциду в Україні, пов'язані з повномасштабним вторгненням, мають значний вплив на довкілля. Це вже зараз відчувають не лише в Україні, а й у світі (проблеми з продовольством, забруднення прісних джерел води, небезпеки вилливу нафти та інших рідин з їх потраплянням до Світового океану). Війна спричинила забруднення водних ресурсів, руйнування екосистем, техногенні аварії та загрозу біорізноманіттю. Екологічний моніторинг потрібен для фіксації екологічних злочинів, оцінки рівня забруднення, розробки планів відновлення.

Тривалий час група дослідників з Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України та Інституту ядерних досліджень НАН України ініціативно працювала над завданням створення інтерактивного блокнота дослідника, який було реалізовано у пілотному варіанті як інструмент збору та первинної обробки інформації для моделювання міграції тритію у довкіллі.

З розширенням функцій програмного засобу та спробами реалізації на вебплатформі для віддаленої роботи спеціалістів різних напрямків, представників державних органів управління та громадських діячів виникло питання створення онлайн-помічника для забезпечення єдиного розуміння термінів, понять, визначень та ефективної взаємодії.

За результатами цього дослідження було виявлено, що використання чат-ботів зі штучним інтелектом для реалізації онлайн-помічника не є доцільним, оскільки при виникненні математичних питань із логічною складовою, у багатьох випадках отримується невірна відповідь. Було зроблено припущення, що користувач та чат-бот є окремими складними системами, моделі поведінки яких підпадають під дію теорії хаосу. Для цього були досліджені чат-боти Copilot та ChatGPT-4o mini. Інформаційним хаосом можна назвати стан системи за наявності надмірної кількості слабкоструктурованої, несистематизованої інформації, яка є суперечливою та неперевіреною.

Дослідження показало, що інформаційний шум, який виникав під час генерації запиту через введення логічної складової, призводив до створення інших правил вирішення задачі. Подібний процес був представлений системою диференціальних рівнянь, розв'язання яких дозволяє встановлювати чіткі правила для отримання точної відповіді на запит.

Для подання запиту від користувача було запропоновано підхід, який дозволяє розбити інформаційний блок запиту шляхом побудови кусочно-лінійних атракторів. Тобто, відбувається формування парних смислових виразів за текстом запиту. На основі зазначених смислових виразів формується запит, очищений від інформаційного шуму, який у підсумку призводить до хаосу та невірної відповіді. З цих виразів формується новий запит, що дозволяє отримати найбільш точну відповідь від чат-боту. Задача вирішена з представленням методики механізму управління вибором слів-замінників, заснованої на операціях генерації наступної підстановки і обчислення номера заданої підстановки.

Запропонована схема перетворення запиту користувача для очищення від інформаційного шуму на основі циклічних атракторів кусочно-лінійних представлень реалізована мовою C++. Тобто, це додаток, який імітує процес побудови запиту користувача з передачею за правилами природної мови користувача. Користувач вибирає один із двох режимів: розбиття або перестановка. Після цього користувач може задати шляхи до трьох файлів, призначених для запису вихідної інформації, для запису перекодованого виразу та для запису перетвореної інформації. Основними факторами, що впливають на

час виконання процесів перетворення запиту, є кількість символів у тексті, довжина блоку, рекурсивні алгоритми генерації перестановок та їх номерів. Детальні результати подібних експериментів щодо можливостей створення запиту, націленого на отримання максимально точної відповіді, частково наведені у роботі [1].

Подальше дослідження полягає у розробці незалежно скомпільованого програмного модуля, який може бути вбудований на сайт для реалізації функцій онлайн-помічника. Подібне заплановано до здійснення та тестування на новій версії порталу «Тритій на планеті Земля», що розроблявся раніше. Умовою застосування онлайн-помічника є розділення потоків інформації на порталі для внутрішнього користування та зовнішнього представлення. Відповідно, сфера відповідей онлайн-помічника буде обмежена рамками спеціальних дозволів. Це дозволить обмежити розкриття певної екологічної інформації для інформування громадян про наслідки та процеси, що відбуваються в довкіллі згідно з чинним законодавством та розмежування з робочою інформацією, необхідною для прийняття рішень та досліджень у сфері екологічної безпеки.

Висновок: розроблено методику практичної реалізації розбиття інформації на блоки для запобігання інформаційного хаосу при запиті користувача до чат-боту. Особливістю методики є механізм управління вибором слів-замінників, заснований на операціях генерації наступної підстановки та обчислення номера заданої підстановки. Це дозволяє побудувати запит у вигляді кодованого процесу природною мовою за чіткими правилами. Найкращий варіант запиту до чат-боту Copilot має 182 символи, що представлено 48 словами, цифрами та спеціальними знаками. Найкращий варіант запиту до чат-боту ChatGPT-4o mini має 219 символів.

Запропоноване може бути використане у практичній діяльності для вдосконалення технологій чат-ботів, що працюють на основі генеративного штучного інтелекту, формування ключових наборів даних систем штучного інтелекту для вирішення задач з логічною складовою, підвищення оперативності роботи фахівців, які працюють над проблемами відновлення довкілля після катастроф та військових дій.

### **Список використаної літератури**

1. Kryazhych, O., Ivanov, I., Iushchenko, K., Kuprin, O., Vasenko, O., Riznyk, V., Ryzhkov, O. (2025). Devising an approach to preventing information chaos in chat bots using generative artificial intelligence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (2 (134)), 84–95. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.324957>

# ОЦІНКА ПРИРОДНО-КЛІМАТИЧНИХ УМОВ, ЩО СПРИЯЮТЬ ЛІСОВІДНОВЛЕННЮ ПІСЛЯ ПОЖЕЖ, ЗА ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ПРОЄКТУ «COPERNICUS» LANDDATA\_ERA5

*Т.Д. Лев, Ю.В. Яценко, І.П. Шедеменко*

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна,  
[tatianalev46@gmail.com](mailto:tatianalev46@gmail.com)

**Abstract:** A technology for primary processing of meteorological information (monthly and daily) has been developed to assess the conditions of forest regeneration after fires. Information support has been created using open up-to-date databases from the "Copernicus" project and mathematical support for reading and organizing information source and calculation forecast databases based on MatLab software.

A number of factors have been identified that must be taken into account when zoning the study area based on the unity of climatic and soil conditions that determine the nature of forest regeneration processes. The formation of blocks of parameters according to natural and climatic characteristics and their combination into three groups: water-thermal block, soil block, landscape block.

The technology of analysis and assessment of forest-vegetation conditions in the study area is based on the calculation and geoinformation analysis of hydrothermal characteristics of weather conditions in the study area for the growing season: "April - October" with the construction of thematic maps with optimal hydrothermal conditions.

A comprehensive assessment (of forest vegetation productivity according to data on the leaf surface index with subsequent calculation of leaf mass) and the selection of the most optimal reforestation conditions were carried out, taking into account the natural (local) properties of the territory and the water-thermal regime of the soil, the impact of climate change on reforestation conditions using open data of the "Copernicus" Land Data ERA5 project.

Studies of the intensity of the processes of restoration of woody and herbaceous vegetation on burned areas will be used to develop recommendations for promoting the restoration of forests in Polissya (including the Exclusion Zone).

**Keywords:** forest fires, hydrothermal conditions, forest restoration, information databases.

**Анотація:** Розроблено технологію первинної обробки метеорологічної інформації (місячної та добової) для оцінки умов відновлення лісів після пожеж. Створено інформаційне забезпечення з використанням відкритих актуальних баз даних проекту "Copernicus" та математичного забезпечення читання та організації інформаційних вихідних та розрахункових прогностичних баз даних на основі програмного забезпечення MatLab.

Визначено низку факторів, які необхідно враховувати при районуванні території дослідження на основі єдності кліматичних та ґрунтових умов, які

визначають характер лісовідновлювальних процесів. Проведено формування блоків параметрів за природно-кліматичними характеристиками та об'єднання у три групи: водно-тепловий блок, ґрунтовий блок, ландшафтний блок.

Технологія аналізу та оцінки лісорослинних умов по території дослідження заснована на розрахунку та геоінформаційному аналізі гідротермічних характеристик погодних умов території дослідження для вегетаційного періоду: «квітень – жовтень» з побудовою тематичних карт з оптимальними гідротермічними умовами.

Виконано комплексну оцінку (продуктивності лісової рослинності за даними індексу листової поверхні з подальшим розрахунком листової маси) та вибір найбільш оптимальних умов лісовідновлення з урахуванням природних (локальних місцевих) властивостей території та водно-теплогового режиму ґрунту, впливу зміни клімату на умови лісовідновлення з використанням відкритих даних проекту “Copernicus” Land Data ERA5.

Дослідження інтенсивності процесів відновлення деревної та трав'янистої рослинності на згарищах будуть використані для розробки рекомендацій щодо сприяння відновленню лісів Полісся (у тому числі Зони відчуження).

**Ключові слова:** лісові пожежі, гідротермічні умови, лісовідновлення, інформаційні бази даних.

Лісові пожежі залишаються одним із найпотужніших природних катастрофічних явищ і водночас є природною особливістю у функціонуванні багатьох екосистем. Взаємодія між рослинністю та кліматичними умовами протягом тривалих періодів часу встановлює особливу схему повторення лісових пожеж у певній екосистемі, відому як її режим пожеж [1]. Відхилення від переважаючого режиму пожеж – часу, частоти, розміру та інтенсивності лісових пожеж – можуть призвести до значних екологічних змін у пожежозалежних екосистемах. З 2003 до 2016 р. в усьому світі сталося понад 13 млн. окремих пожеж, кожна тривалістю 4-5 діб. У середньому при кожному загоранні вигорала площа 440 га по всьому світу. В останнє десятиліття загострилася проблема лісовідновлення по території Українського Полісся внаслідок зміни кліматичних факторів – гідротермічного режиму атмосфери та діяльного шару ґрунту (0 – 300 см) [2]. На ситуацію, що склалася, вплинули такі фактори: підвищення температури, зменшення атмосферних опадів і пожежі, що почастішали в останні роки. Зміни метеорологічних умов за окремі сезони року протягом кількох років відбиваються на змінах приросту, плодоношенні, посиленні чи ослабленні пожежної небезпеки тощо.

З комплексу кліматичних факторів основне значення мають теплові умови та кількість опадів, що випадають [3 - 4]. Успішність розвитку рослин залежить від співвідношення між кількістю опадів і кількістю тепла в даному районі. Подальше посилення кліматичної кризи вже найближчими десятиліттями загрожує лісам України такими наслідками: зменшення продуктивності лісів, а відтак і поглинання ними вуглецю, через частіші та триваліші посухи.

Відновлення лісу означає процес відновлення основного компонента лісу – деревної рослинності, деревостою. Поява деревостою сприяє утворенню лісового середовища, інших компонентів лісу як рослинних, так і тварин, характерних для нього підліску, ґрунтового покриву.

Відновленням лісу називається утворення нового покоління деревних рослин. Розрізняють такі методи відновлення лісу: природне, штучне та комбіноване. Природне відновлення лісу – це відновлення лісу природним шляхом.

Вибір найбільш оптимальних умов лісовідновлення з урахуванням природних (локальних місцевих) властивостей території та водно-теплого режиму ґрунту і є завданням дослідження. Розглянемо низку факторів, які будемо враховувати при районуванні території дослідження на основі єдності кліматичних та ґрунтових умов, які визначають характер лісовідновлювальних процесів [5].

**Територія та методи дослідження.** Було розглянуто та проаналізовано дані характеристик лісових пожеж за період 2006-2020 років та блок метеорологічних факторів, що сприяють лісовідновленню після пожеж, який ґрунтується на природно-кліматичних умовах території радіоактивного забруднення Українського Полісся. На рис. 1 відображено територію дослідження, яка поєднана із регулярною сіткою, у вузлах комірки якої подається повторно проаналізована метеорологічна та агрометеорологічна інформація реаналізу проекту ERA5Land [6]. З аналізу підстильної поверхні випливає, що на 60 % території розташовані агроландшафти (середня висота місцевості 158 м) і на 39 % – лісова рослинність. По території, що закріплена за метеостанцією м. Коростень, агроландшафти займають 85 %, а лісові масиви – 14,5 %. Слід зазначити, що у Чорнобильському регіоні близько 28 % території має забруднення  $^{137}\text{Cs} > 185 \text{ кБк/м}^2 (> 5 \text{ Ки/км}^2)$ , у Коростенському – близько 7 %.

Досі  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  роблять істотний внесок у радіоактивне забруднення лісової деревини в деяких районах України, забруднених унаслідок аварії на ЧАЕС. Наприклад, у дослідженні М. М. Лазарева та співавторів показано [7], що забруднення деревини  $^{137}\text{Cs}$  все ще зберігається в Житомирській області, що була однією з областей України, яка найбільше постраждала від Чорнобильської аварії. Концентрація питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  у пробах попелу дров, отриманих від приватних домогосподарств цього району, суттєво варіювала – від 230 до 32 900 Бк/кг, що було зафіксовано у м. Народичі. Крім того, приблизно в 30 % проб попелу з цього міста концентрація питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  перевищувала 10 000 Бк/кг, що можна віднести до низькоактивних радіоактивних відходів, які підлягають регульованому контролю згідно з українськими нормами.

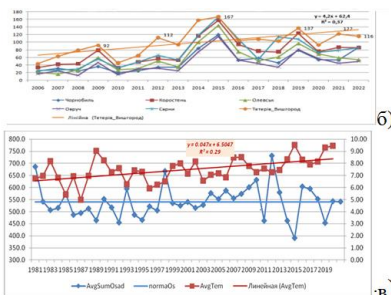


Рис. 1. Регіон Українського Полісся із закріпленими метеостанціями на сітці 9 км x 9 км з даними проекту Copernicus - ERA5 (Land monthly averaged data/ Land hourly data from 1950 to present) (а), динаміка тривалості пожеж за 2006 – 2022 (б), динаміка температури та опадів за 1981 – 2019 (в).

По території дослідження було проведено оцінку та аналіз поточних кліматичних умов та їх вплив на інтенсивність та частоту лісових пожеж з використанням бази даних METEO – CORDEX («COPERNICUS») [8].

*Динаміка пожеж за останні 20 років.* Тривалість загорання у днях по територіях, закріплених за метеостанціями, у період 2006 – 2022 рр. (рис. 1.б) показує, що за кількістю днів з пожежами виділяються регіони з метеостанціями міст Коростень, Тетерів та Червоноград з максимумами за 2009, 2012, 2015, 2019, 2021 та 2022 рр. Результати порівняльного аналізу розподілу числа випадків спалахів за п'ятирічні періоди з 2006 по 2020 рр. та площі займання показують, що за п'ятиріччями для регіонів м. Коростень та м. Сарни з максимальним числом точок загорань, на території яких максимальний відсоток пожеж (92 % та 60 % відповідно) припадає на агроландшафт – територію сільгоспвиробництва. Окремо були випадки локальних лісових пожеж у квітні 2020 р. по території Житомирської області (Лугинський та Овруцький райони). За період 2021 – 2023 рр. максимальна кількість пожеж припадала на регіони міст Червонограда та Тетерева, що пов'язано з військовими діями на цих територіях. Апроксимація кривої ходу річної кількості днів із пожежами лінійним трендом демонструє збільшення тривалості періодів із пожежами в регіонах метеостанцій кожні 10 років на 50 – 60 днів.

*Динаміка температури та опадів за 40 років* (рис. 1.в): 1) з 1981 р. по 2019 р. приземна температура повітря в середньому зростала на 0,5°C/10 років, збільшуючись в останні 15 років до 0.6 °C/10 років; 2) лінійні тренди для фактичної температури повітря показують середню температуру для 3-х станцій близько 8°C, а зміни температури за 15-річний період на 1.5°C, 3) порівняння модельних даних та фактичних за останні 15 років показує, що модель MPI-ESM-LR (Germany) у середньому дає заниження температури по всіх роках (зміщення) на 3,27° C, тоді як модель CNRM-CM5 (France) дає в середньому абсолютну помилку 0,69°C (в окремі роки досягаючи ±1.7-1.9°C). Динаміка річного ходу опадів показує, що до 2010 р. не було різких змін, значення

коливалися близько середнього за 40 років (550 мм/рік). Починаючи з 2011 р. спостерігалися максимальні річні опади до 800 мм/рік з мінімальними значеннями до 350 мм/рік (2011, 2015, 2020 рр.).

Існування, форма та продуктивність лісу визначаються складним комплексом зовнішніх факторів - кліматичних, едафічних та біотичних [9]. В останнє десятиліття загострилася проблема лісовідновлення по території Українського Полісся внаслідок зміни кліматичних факторів – гідротермічного режиму атмосфери та діяльного шару ґрунту (0 – 300 см). На ситуацію, що склалася, вплинули такі фактори: підвищення температури, зменшення атмосферних опадів і пожежі, що почастишали в останні роки. Зміни метеорологічних умов за окремі сезони року протягом кількох років відбиваються на змінах приросту, плодоношенні, посиленні чи ослабленні пожежної небезпеки тощо [8].

З комплексу кліматичних факторів основне значення мають теплові умови та кількість опадів, що випадають. Успішність розвитку рослин залежить від співвідношення між кількістю опадів і кількістю тепла в даному районі. Втім, чим більше тепла і вологи протягом вегетаційного періоду в цьому районі і чим довше вегетаційний період, тим вище кількісна продуктивність лісу. Річний приріст деревини частіше збільшується у роки підвищених температур вегетаційного періоду або посилюється наслідком коливань кількості опадів. На основі літературних джерел [10 - 11] зібрані положення щодо визначення оптимальних умов відновлення лісів після пожеж: помірний клімат (температура, опади), сонячне світло, ґрунтова вологість, вплив мікроклімату (рельєф, ландшафт), видові особливості, відсутність екстремальних явищ (посух, сильних вітрів, екстремальних температур). В цілому, найкращий варіант - клімат помірного або помірно-континентального типу з помірними опадами, стабільною вологістю ґрунту та відсутністю різких температурних коливань.

*Формування блоків параметрів за природно-кліматичними характеристиками.* Відповідно до описаних гідротермічних параметрів, що беруть участь у зростанні лісових рослин, зазначені параметри, що об'єднані у три групи, які пов'язані з об'єктами: повітря, ґрунт і ландшафт (рис. 2): *водно-тепловий блок, ґрунтовий блок, ландшафтний блок.*

*Водно-тепловий блок* включає параметри, що описують кліматичні умови території: гідротермічний коефіцієнт зволоження, індекс сухості та коефіцієнт зволоження, запаси продуктивної вологи у ґрунті.

*Ґрунтовий блок* представлений в основному типом ґрунту з відповідними параметрами: механічний склад ґрунту, об'ємна маса та вологість стійкого в'янення. Ґрунтовий блок заснований на картографічних даних (ґрунтових картах М 1 : 3 500 000 та М 1 : 200 000), які приведені до регулярної сітки з кроком 2 км.

На підставі даних про ґрунтові властивості, їх оптимальні та граничні значення, розраховують чисельні показники ґрунтової родючості [12]: зведений показник якості ґрунтів; загальний бал родючості ґрунтів (бонітет) та ступінь насиченості основами; сукупний ґрунтовий бал.

Ландшафтний блок заснований на топографічних даних – висотах місцевості, проінтерпольованих на регулярну сітку з кроком 2 км та даних карти річкової мережі масштабу 1 : 200 000 [14]. Формування зазначених блоків із складом тематичної інформації та баз даних представлено на рис. 2.

**Схема інформаційного забезпечення.** Інформаційні потоки, що визначають і заповнюють описані блоки, показані на рис. 2 спільно з обраними нами екологічними параметрами у вигляді картографічних покриттів, які надалі будуть спільно проаналізовані.

Інформаційне забезпечення включає просторові метеорологічні дані проекту «Copernicus» [6] - добові та місячні дані (ERA5-Land monthly/hourly averaged data from 1950 to present), а також картографічні дані [13] про ґрунт, ландшафт і висоту місцевості, зібраних у двох базах даних.

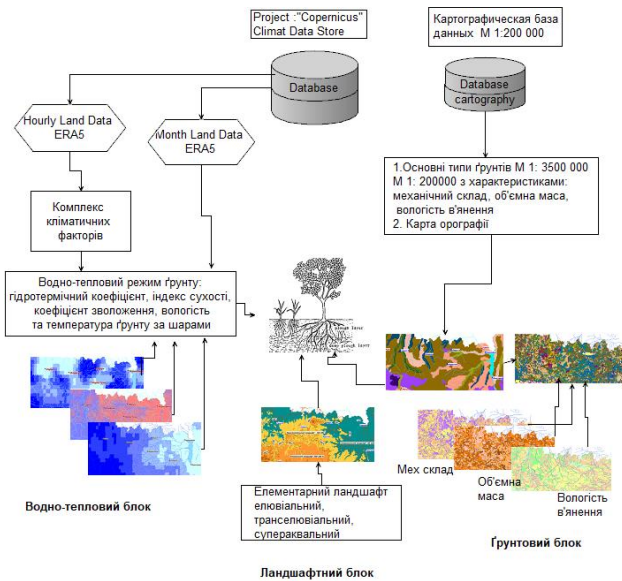


Рис. 2. Схема інформаційного забезпечення завдання оцінки умов відновлення лісу після згарищ.

Опишемо технологію обробки первинної метеорологічної інформації (місячної та добової) для оцінки умов відновлення лісів після пожеж [2]. Технологія аналізу та оцінки лісорослинних умов на території дослідження заснована на наступних положеннях [3 - 5]:

а) на стадії активного зростання (весна – літо) більше значення має верхній шар (0 – 28 см),

б) на стадії деревної продуктивності (літо – осінь) важливіші глибокі шари (0 – 100 см та 0 – 300 см),

в) гідротермічний режим природних умов впливає на зростання лісової рослинності через два основні фактори:

- *волога*: при посусі зростання рослин обмежене через нестачу води, при високому зволоженні (надлишкове зволоження) коріння може страждати від гіпоксії;

- *температура*: високі температури з низькою вологістю збільшують випаровування та стрес для рослин.

Обробка та аналіз підготовлених параметрів проводились за *наступним алгоритмом*:

1) поділ лісорослинних умов на три стадії росту залежно від видів дерев і чагарників, що ростуть, структури та віку насадження;

2) поділ за шарами ґрунту, що забезпечують зростання та розвиток лісової рослинності різного віку;

3) поділ вегетаційного зростання на два періоди: розвиток («весна – літо» – квітень – липень) та в'янення («літо – осінь» - серпень – жовтень);

4) розрахунок середніх за два періоди вегетаційного зростання показників температурно-водного режиму – температури та вологості ґрунту за шарами;

5) формування матриць за стадіями зростання, шарами ґрунту та періодами вегетації в масиви розміром: (51 x 17) пікселів з кроком 9 км для геоприв'язки просторової інформації до регулярної сітки 9 км x 9 км;

6) геоприв'язка даних до сітки з кроком 9 км засобами ГІС MapInfo 15.2 та просторове представлення даних;

7) встановлення зв'язку з ґрунтовими даними, представленими на карті М 1 : 200 000 та проінтерпольованими у вузли регулярної сітки з кроком 2 км x 2 км шляхом перетину карти 9 км x 9 км з метеорологічними даними з ґрунтовою картою 2 км x 2 км;

Для опису та оцінки *гідротермічних умов* на території дослідження використовувалися такі метеорологічні характеристики, що описують стан приземного шару атмосфери та впливають на лісорослинні умови [14 – 15]:

- гідротермічний коефіцієнт В. Г. Селянінова (ГТК, характеристика рівня вологозабезпеченості території),

- коефіцієнт зволоження ( $K_{uv}$ , показник співвідношення тепла і вологи),

- індекс сухості ( $Ind_{sux}$ , виражає ступінь посушливості клімату),

Аналіз гідротермічних даних показує, що на всій території Українського Полісся умови забезпеченості вологою досить високі для домінування на цих ландшафтах лісової рослинності. Це показують розраховані значення всіх характеристик (ГТК,  $K_{uv}$ ,  $Ind_{sux}$ ), що свідчить про сприятливі умови для лісового господарства. Однак у посушливі роки показники можуть знижуватися, що потребує додаткового аналізу у наступні роки. Динаміка річних значень (ГТК,  $K_{uv}$ ,  $Ind_{sux}$ ) по всій території дослідження (рис. 3.а) та розподіл класів гідротермічних характеристик (рис. 3.б), визначених за допомогою табл. 1, показує, найбільш оптимальними були 2012, 2015, 2018 та 2020 роки. Розрахунок кількості випадків з оптимальними гідротермічними умовами та відповідно до табл. 1 можна зазначити, що територія Українського Полісся є сприятливою для лісовідновлення. Але тенденція до зменшення гідротермічного

коефіцієнта відзначається за період, який розглядається (2006 – 2020 рр.), що зафіксовано на рис. 3.а.

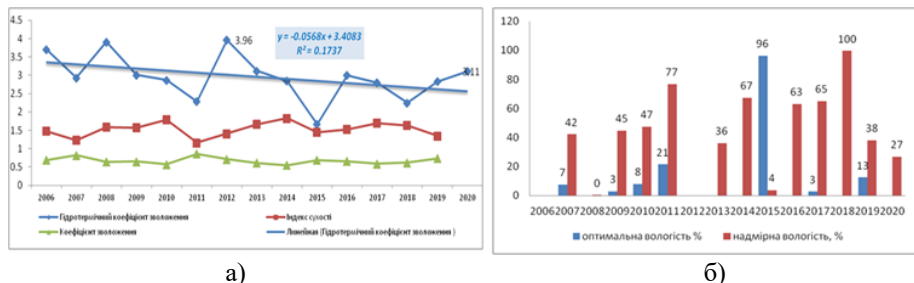


Рис. 3. Динаміка гідротермічних характеристик за роками (а) та розподіл оптимальних умов за гідротермічним коефіцієнтом (б).

Таблиця 1. Градації значень гідротермічних показників за класами з метою оцінки умов проростання лісової рослинності.

Клас	Гідротермічний коефіцієнт зволоження (ГТК)	Коефіцієнт зволоження ( $K_{uv}$ )	Індекс сухості ( $Ind_{sux}$ )
1	< 1 нестача вологи	$0,00 < K_{uv} \leq 0,45$ надмірно вологі	$Ind_{sux} < 0,05$ , опад практично відсутні
2	1 – 2 достатньо вологи	$0,45 < K_{uv} \leq 0,68$ достатнє зволоження	$0,05 \leq Ind_{sux} < 0,20$ , опад дуже мізерні
3	2 – 3 вологі умови	$0,68 < K_{uv} \leq 1,00$ вологі умови	$0,20 \leq Ind_{sux} < 0,50$ , опадів недостатньо
4	3 – 4 надмірна вологість	$K_{uv} > 1,00$ недостатнє зволоження	$0,50 \leq Ind_{sux} < 1,00$ , умови сприятливі
5	4 – 5		$Ind_{sux} \geq 1,00$ , опад перевищують потреби

**Визначення оптимальних умов лісовідновлення після пожеж.** Вологість ґрунту (ВГ) – основна характеристика забезпеченості рослин вологою. Виділяють продуктивну (доступну для рослин) вологу, яка дорівнює ВГ, зменшеної на величину вологості в'янення (вологість ґрунту, при якій рослини починають в'янути). ВГ залежить від гранулометричного складу, особливостей зволоження та сезону року. За інших рівних умов вологість вища у важких за гранулометричним складом і нижча у легких ґрунтах. Для оцінки запасів продуктивної вологи було розглянуто динаміку змін запасів вологи в різних шарах ґрунту для 9-ти основних ґрунтів території дослідження за період 2006 – 2020 рр. (рис. 4).

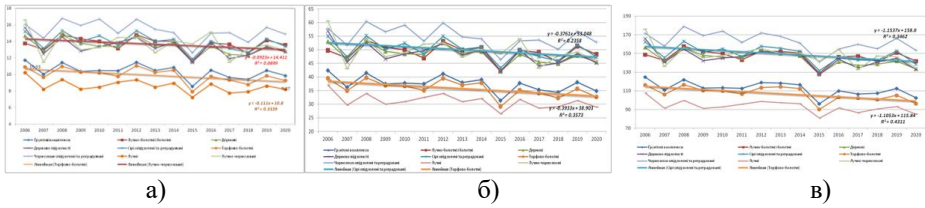


Рис. 4. Розподіл запасів продуктивної вологи по території основних типів ґрунтів у шарі 0 – 28 см (а), у шарі 0 – 100 см. (б), у шарі 0 – 289 см (в) за період «весна – літо» 2006 – 2020 рр.

Проаналізовано динаміку розрахованих запасів продуктивної вологи за шарами, які дуже важливі при розгляді різних періодів росту рослин протягом вегетаційного періоду (весна-літо та літо-осінь).

Для всіх шарів ґрунту та для всіх типів ґрунту відмічено стійке зниження запасів продуктивної вологи (ЗПВ), що відображає лінійне апроксимаційне рівняння з досить високим (>0,3) значенням достовірності. Особливі точки (з максимальними і мінімальними значеннями) - 2007 і 2015 рр.. Спостерігалися мінімальні значення ЗПВ і максимальні значення - 2008, 2010, 2012 і 2019 рр. Це найбільш характерно для лучних і торфово-болотних ґрунтів з найменшими запасами ЗПВ по всіх шарах ґрунту. Більш згладжена динаміка запасів продуктивної вологи в середньому по всій території також свідчить про зменшення запасів вологи з часом. Для суглинкових ґрунтів, які становлять основний склад ґрунтів Українського Полісся, була створена тематична карта запасів продуктивної вологи у шарі 0 – 289 см (рис. 5) з вологими районами (150 – 200 мм) за 2019 р. Попередньо, за період 2006 – 2010 років. було оцінено (рис. 6) розподіл суми опадів за вегетаційний період на території Українського Полісся. Для північної України потрібно 500 – 700 мм на рік, щоб підтримувати нормальну ґрунтову вологість для зростання лісів. Аналіз опрацьованих результатів показує, що найбільша кількість опадів спостерігається на західних територіях Українського Полісся, що забезпечує і більш високі запаси продуктивної вологи (див. рис. 5).

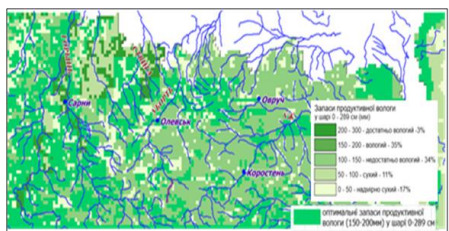


Рис. 5. Запаси продуктивної вологи у шарі 0–289 см (2019 р.).

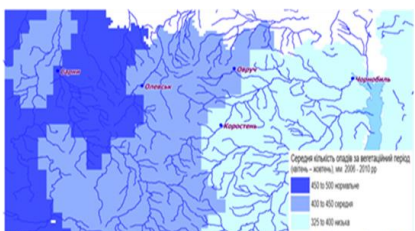


Рис. 6. Розподіл середньої кількості опадів на території Українського Полісся за період 2006-2010 років

Для визначення оптимальних умов лісовідновлення після пожеж використовувалися наступні дані: характеристики гідротермічних умов (SGTK та  $K_{uv}$ ) та запаси продуктивної вологи в ґрунті (шар 0 – 289 см). Зони, що виділяються за запасами продуктивної вологи в метровому шарі ґрунту класифікуються в такий спосіб: від 101 мм до 120 мм - *задовільні*, від 121 мм до 160 мм - *хороші*, більше 160 мм - *відмінні*. Виділено зони оптимальних умов (у 1-му шарі ґрунту запаси вологи -150-200 мм,  $GTK > 2$ ,  $K_{uv} > 0.68$  за 10 років) та у вигляді просторового розподілу представлено на рис. 7. Це – південно-західні, західні та території у заплавах великих річок Полісся з переважанням торфво-болотних та лугових ґрунтів. Треба враховувати, що чорноземи утримують більше вологи, ніж піщані або супіщані ґрунти, які швидше втрачають вологу та потребують більшої кількості опадів; на схилах (транслювіальний тип ландшафту) ґрунт втрачає воду швидше через стік, що збільшує потребу в опадах. При виділенні оптимальних умов лісовідновлення враховувався диференційований вплив вологозапасів ґрунту на стадії росту рослинності. На стадії активного зростання (весна-літо) більше значення має верхній шар (0-28 см), на стадії деревної продуктивності (літо-осінь) важливіші глибокі шари (0-100 см і 0-300 см).

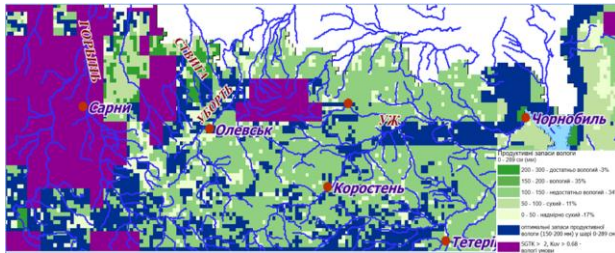


Рис. 7. Зони оптимальних умов гідротермічного режиму ґрунту.

Гідротермічні умови впливають на зростання лісової рослинності. Інтегральним показником стану рослинності використаний «Індекс листової поверхні» (Leaf Area Index – LAI). Індекс листової поверхні є одним із основних показників активності процесу фотосинтезу рослинності, широко використовується при оцінці продуктивності лісів, розрахунках фітомаси деревостанів протягом вегетаційного періоду, а також як міра зростання та продуктивності лісів у просторових масштабах.

Проведено розрахунки сумарного індексу листової поверхні для високої та низької рослинності з перерахунком у фітомасу за довідковими даними [16] та проаналізовано просторово-часовий розподіл індексу листової поверхні на території досліджуваного регіону Українського Полісся (рис. 8). Інтегральна площа індексу листової поверхні для двох типів рослинності оцінювалася за площею осередків у квадратних метрах. (Світло-зеленим кольором показано лісову рослинність (ліс) з індексом листової поверхні для високої рослинності  $> 3 \text{ м}^2/\text{м}^2$ ). Використовуючи довідкові дані, були розраховані листова маса для

всієї території, представлена на рис. 8.б за липень 2006 р. з наступним розподілом середніх значень листової маси ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) за типами рослинності: агроландшафт -  $3,74 \text{ кг}/\text{м}^2$ , ліс -  $1,80 \text{ кг}/\text{м}^2$ , лугова та болотяна рослинна –  $3,80 \text{ кг}/\text{м}^2$ . Для територій лісової рослинності (значення маси від  $0,44 \text{ кг}/\text{м}^2$  до  $2,72 \text{ кг}/\text{м}^2$ ) представлені середні значення індексу листової поверхні за липень 2006 р ( $4,37 \text{ м}^2/\text{м}^2$ ).

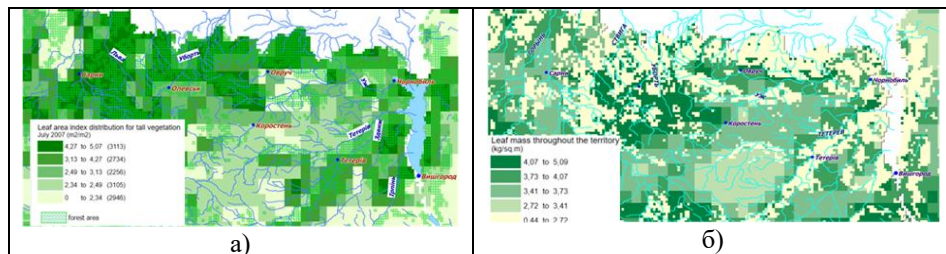


Рис. 8. Розподіл індексу площі листа високої рослинності ( $\text{м}^2/\text{м}^2$ ) за липень 2007 р. (а) та розподіл листової маси по території дослідження ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) за липень 2006 р. (б).

Слід звернути увагу, що для даного періоду (липень 2006 р.) листова маса для рослинності сільськогосподарських територій та трав'яної рослинності вища ніж для лісової деревини (мішані ліси).

Таким чином, отримано просторовий розподіл листової маси, що залежить від ґрунтово-кліматичних умов, типів лісової рослинності, типів ґрунтів та ландшафтів. Райони з максимальними значеннями індексу листової поверхні розташовані у заплавах рік з лісовою рослинністю (мішані ліси). Територія з листовим індексом меншим  $2 \text{ м}^2/\text{м}^2$  – це територія трав'яної рослинності (агроландшафту), що відповідає картам підстильної поверхні.

## Висновки

Визначено оптимальні умови лісовідновлення після пожеж з використанням даних проекту «Сорпнісус» про стан водно-теплого режиму ґрунту території досліджень з побудовою розрахованих запасів продуктивної вологи за трьома шарами ґрунту для двох періодів «весна-літо» та «літо-осінь», визначення оптимальних запасів продуктивної вологи із побудовою ситуаційних карт оптимальних запасів вологи. Побудовано та проаналізовано розподіл середньої суми кількості опадів по території Українського Полісся з урахуванням ґрунтових даних та визначення найбільш оптимальних територій із високими запасами опадів та запасів продуктивної вологи.

Проведено аналіз продуктивності лісової рослинності за даними про індекс листової поверхні з подальшим розрахунком листової маси для високої та низької лісової рослинності та побудовано розподіл листової маси по території досліджень. Побудовано тематичні карти щодо розподілу індексу листової поверхні за типами підстильної поверхні та видами лісової рослинності.

Визначено динаміку індексу листової поверхні за типами ґрунтів для різних періодів вегетаційного сезону.

### **Перелік посилань**

1. Ходаков В.Є. Лісові пожежі: методи дослідження/В.Є. Ходаков, М.В. Жарікова. - Херсон : Гринь Д.С., 2011. - 470 с.
2. Гончаренко Л. Як зміна клімату відобразиться на українських лісах.– Режим доступу: <https://ecopolitic.com.ua/news/kak-izmenenie-klimata-otrazitsya-na-ukrainskih-lesah/> Ecopolitic.com.ua.
3. Остапенко Б.Ф., Воробйов Д.В. Основи лісової типології : Курс лекцій / Б.Ф. Остапенко, Д.В. Воробйов. – Харків : Харків. нац. аграр. ун-т. ім. В.В. Докучаєва, 2014. – 364 с.
4. Косарев В.П. Андрющенко Т.Т. Лісова метеорологія із основами кліматології: Навчальний посібник. 2-ге вид., Випр. та дод. / За ред. Б. В. Бабікова. - СПб.: Видавництво «Лань»,2007. — 288 с.
5. Губарева В.В. Зінов'єва І.С. Актуальні питання лісовідновлення на території ЦЧР // Міжнародний журнал експериментальної освіти. – 2015. – № 11 (частина 2) – Р. 300-301. – Режим доступу : <https://expeducation.ru/ua/article/view?id=8410> (дата звернення: 24.07.2024).
6. Доступний електронний ресурс : <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>.
7. Lazarev M. M. Justification of the possibility of the fuel wood usage from the northern areas of Polissya / М. М. Lazarev, L. М. Otreshko, О. V. Kosarchuk, S. V. Polishchuk, L. V. Yoshchenko // Problems Chornobyl Exclusion Zone. – 2018. – Vol. 19. – Р. 46–57.
8. CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4 // Report meteorology and climatology. – 2014. - No. 116.
9. Ткаченко, М. Е. Загальне лісівництво. - ГосЛесБумиздат, - М.1952597 стр.
10. Теоретичні основи районування та проектування лісових культур. – Режим доступу : <http://studfile.net/preview/3299457/>.
11. В.П.Ковриго, І.С.Кауричев, Л.М.Бурлакова. Ґрунтознавство з основами геології. - Колос,2000 – 416 с.
12. Ґрунти України та підвищення їх родючості. Том 2. / за ред. Д.С.М. н. проф. Б.С. Носко. – Київ: Урожай, 1988. - 178 с.
13. Доступний електронний ресурс: <https://geomap.com.ua/uk-g8/879.html/>.
14. Роде А.А. Основи вчення про ґрунтову вологу. Т. 1. Л.: Гідрометеоздат, 1965. 663 с.
15. Кельчевська, Л.С. Метод агрокліматичної оцінки водного режиму Нечорнозем'я / Л.С. Кельчевська, А.І.– №10(78). – С. 48-57.
16. Лісова енциклопедія: У 2-х т./Гл.ред. Воробйов Г.І.; Ред.кол.: Анучин Н.А., Атрохін В.Г., Виноградов В.М. та ін. - М: Рад. енциклопедія, 1985.-563 с.

# ТЕХНОЛОГІЇ РОЗУМНОГО МІСТА ДЛЯ МІСТ-СУПУТНИКІВ АЕС

*Мусич О.Г., Верховцев В.Г., Деміхов Ю.М.*

Мусич О.Г., кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник

e-mail: [nad79eva@ukr.net](mailto:nad79eva@ukr.net); ORCID: 0000-00033-3874-741X

Верховцев В.Г., доктор геологічних наук, заступник директора, завідувач відділу

[Verkhovtsev@ukr.net](mailto:Verkhovtsev@ukr.net); ORCID 0000-0002-1015-6725

Деміхов Ю.М., кандидат геолого-мінеральних наук, завідувач лабораторії

[y\\_demikhov@ukr.net](mailto:y_demikhov@ukr.net); ORCID 0000-0002-3576-6570

Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» (м. Київ, Україна)

Today in Ukraine, as in the entire civilized world, attention is focused on the development and implementation of smart infrastructure in satellite cities of nuclear power plants. Digital technologies help to develop and build such infrastructure. The work is based on an analytical and systems approach to the implementation of smart city technologies in the sustainable development of satellite cities through the spread of digital technologies.

Digital technologies in the city's infrastructure form multifunctional capabilities and are a significant factor in the evolution of satellite cities. They solve urbanization problems, affect industrial production, contribute to increasing the level of innovation in the economy, creating assets in the fields of healthcare, education, finance and services, gradually reducing the carbon intensity of the economy within Ukraine, expanding opportunities for re-profiling and increasing jobs, and become a tool for achieving the strategic goals of the country's socio-economic development.

Digital technologies are used to monitor and map the condition of infrastructure and determine its degree of aging and remaining design operational life, which is especially important for the safety of the population of satellite cities.

**Ключові слова:** місто-супутник, цифрові технології, Інтернет Речей, штучний інтелект, парникові гази, широкосмуговий доступ до мережі Інтернет.

**Вступ.** З кожним роком цифрові технології змінюють повсякденне життя, створюючи засади для сталого соціально-економічного розвитку. Активне використання цифрових технологій – це майбутнє технологічного, економічного та соціального розквіту міст-супутників АЕС; підвищення соціальної свідомості та обміну досвідом у сфері освіти та охорони здоров'я населення; поштовх для розширення співробітництва у діловій сфері. Перехід до цифрових послуг і надалі поширюватиметься.

Цифровізація впливає на розвиток міста-супутника АЕС та полягає в наступному:

1. зниження залежності від викидів парникових газів при вуглецевій інтенсивності промислового виробництва в межах території;

2. нормативно-правове регулювання та прозорість у реєстрації та веденні бізнесу;
3. підвищення інноваційного, технологічного, економічного, освітнього та професійного потенціалу виробництва;
4. благоустрій міста з перспективою створення нових робочих місць;
5. створення комплексу активів у сферах освіти, охорони здоров'я, фінансів та будівництва.

Найбільш поширені у світі такі цифрові технології, як Internet of Things/Інтернет Речей, дрони, 3D-друк, безпілотні системи захисту, інформаційні обчислення та інші.

Наразі увага прикута до питань удосконалення міського планування, в основі якого, реалізація технологій smart-інфраструктури. Міста-супутники атомних електростанцій (АЕС) не є виключенням.

Особливості будівництва міст-супутників АЕС полягають в їх розташуванні на певному віддаленні від великих населених пунктів (зазвичай 50—100 км). Поряд з іншими особливостями вибору майданчика під будівництво АЕС, враховується можливість розмістити наукомісткий центр енергетики там де, проживає здебільшого сільське населення з метою рівномірного розподілу трудових ресурсів. Міста-супутники отримують широкі простори вулиці, зручні транспортні розв'язки, вдале розташування троянд вітрів, розподіл житлових і паркових зон, тощо.

Сьогодні несприятлива політична і економічна ситуація в Україні виявила ряд економічних, соціальних та екологічних недоліків в галузі муніципального міського управління, освіти, охорони здоров'я та соціального забезпечення, довкілля.

Незважаючи на руйнівні наслідки агресії для України, міста-супутники АЕС повинні дотримуватися усвідомленої стратегії екологічної безпеки для збереження майбутніх поколінь за допомогою цифрових технологій.

**Мета роботи.** Проаналізувати сучасні тенденції реалізації сталого розвитку Smart City завдяки поширенню та розвитку цифрових технологій, та впровадженню їх у інфраструктуру міст-супутників АЕС.

**Можливості технологій розумного міста.** Цифрові технології в інфраструктурі міста формують багатофункціональні можливості розвитку наступних напрямків суспільства.

**Енергоспоживання.** Системи цифрового управління, застосування smart-лічильників, датчиків забезпечують автоматизацію, моніторинг та оптимізацію енергоспоживання. За допомогою енергетичної smart-інфраструктури усвідомлено розподіляється виробництво енергії, впроваджуються раціональні мережеві технології, автоматичне реагування на зміну попиту споживача. Удосконалена цифрова система раціональних енергетичних пристроїв дозволяє ретельно відстежувати та економити енергоспоживання, проводити моніторинг енергоспоживання на рівні громади.

Пропонується активно задіяти Інтернет Речей (IoT) в якості цифрового вуличного освітлення, тобто вуличні ліхтарі функціонують як точки Wi-Fi, оснащені камерою спостереження, заряджають розетки для електромобілів та телефонів і вимірюють якість повітря, що особливо актуально на теперішній час.

У громадському транспорті датчики, розташовані на корпусі машини, надсилають дані про трафік у програмне забезпечення управління міським транспортом. У режимі реального часу вираховується час, потрібний для очікування на транспорт; також можливим стає отримання інформації про затори або про затримки руху.

**Управління відходами.** Урбанізація сприяє збільшенню відходів. За допомогою цифрових технологій можна:

- провести збір відходів;
- відстежити походження сміття;
- класифікувати та сортувати його за різними джерелами походження;
- можливість переробки, повторного використання або утилізації;
- транспортування.

Зниження обсягів відходів досягається комплексом методів раціонального цифрового управління. Оптимізація кількості смітєвозів та графік вивозу відходів визначається обсягом останніх.

У будівлях доцільно впровадити цифрову станцію збору відходів, де мешканці утилізують роздільне збирання відходів на органічне та неорганічне. Станція збору відходів після заповнення автоматично спрямовує останні до центру переробки.

**Вплив на довкілля.** Урбанізація негативно впливає на загальний стан екології. Зокрема, серйозною та найбільш розповсюдженою є шкода для довкілля через неспроможність контролювати викиди та марнотратне споживання води. А нерегульована, погано спроектована або неналежно керована комунальна інфраструктура водопостачання та каналізації – часто є одним із найбільших джерел забруднення довкілля у містах-супутниках.

Екологічна стабільність міста залежить від досконалої smart-інфраструктури, системі IoT та штучного інтелекту (ШІ). Так, контроль якості повітря в режимі реального часу проводиться датчиками, розміщеними на ліхтарях, вуличних лавках, смітєвих баках, громадському транспорті, при цьому паралельно підвищується енергоефективність та скорочуються викиди парникових газів.

**Використання водних ресурсів.** Нестача води становить одну з найбільших проблем міст-супутників АЕС. Брудні стічні води приводять до проблем зі здоров'ям населення та істотного забруднення навколишнього середовища. Підвищення якості води досягається надійним та правильним водорозподілом водопровідної системи. Раціональна цифрова технологія надає та аналізує інформацію про витрати і тиск у міських водних мережах у режимі реального часу, що приводить до реальної економії води. Технології smart-інфраструктури в сфері водопостачання:

- виявлення витоків: оснащення розподільної мережі датчиками з метою забезпечення в режимі реального часу інформації про тиск, потоки/витоки та якість води;

- виявлення забруднення: виміри датчиками якості поверхневої води в режимі реального часу, що сприяє сталому розвитку міських ресурсів;

- планування технічного обслуговування водної інфраструктури – моніторинг використання води, її якості та контролю виявлення витоків [2].

**Медичне обслуговування.** Система цифрового управління медичним обслуговуванням (через застосування smart-технологій) дозволяє перетворити дані про здоров'я населення на клінічну інформацію, яка охоплює електронну реєстрацію пацієнта, медичне обслуговування на дому та механізми дистанційної діагностики, спостереження і лікування. Поширення цифрових технологій в галузі охорони здоров'я має потужний потенціал з урахуванням старіючого населення, сприяє соціальній інтеграції та інклюзії, дозволяючи пацієнтам, опікунам та медичним працівникам швидко отримувати доступ до даних інформації і покращувати якість медичної допомоги.

**Освіта.** Сучасна людина повинна бути всебічно освіченою і цьому сприяють сучасні цифрові технології:

- зміна форм та способів навчання;

- адаптивне/дистанційне навчання та консультування;

- персоналізація освіти;

- безперервна освіта (online-освіта).

**Безпека.** Сучасна людина повинна відчувати себе захищеною і допомогти в цьому можуть цифрові технології:

- для з'ясування обставин злочину проводиться сканування номерних знаків транспорту та обличчя людини в режимі реального часу;

- для підвищення рівня безпеки застосовується вуличне енергоощадливе освітлення в нічний час;

- з'ясування критичних місць (аварій, пожеж, злочинів) за допомогою дронів та безпілотних систем захисту;

- у випадках надзвичайних ситуацій на допомогу приходять «аварійні» додатки в смартфонах.

Завдяки впровадженню цифровим технологіям можна отримати інформацію про ефективність, використання та моніторингу роботи інфраструктури і подальшому складанню карти стану інфраструктури, що дозволяє визначити ступінь її старіння та залишковий проектний експлуатаційний термін.

Цифрові технології мають як позитивні, так і негативні наслідки. Зокрема до позитивних можна віднести: зменшення вартості надання послуг, більша прозорість і ефективність використання ресурсів, зростання продуктивності у промисловому секторі, зменшення вартості наданих послуг та ін. З-поміж негативних наслідків найбільш ймовірними є – втрата робочих місць низькокваліфікованими працівниками, порушення конфіденційності, втрата

певної частки контролю, зловмисне проникнення хакерів до систем та загроза безпеці.

В цьому аспекті АЕС розглядається як інтелектуальне виробництво [3] з передовими виробничими системами. Для підвищення рівня експлуатації та енергоефективності виробничого процесу АЕС, оздоровлення навколишнього середовища та забезпечення безпеки персоналу впроваджуються системи різних цифрових технологій.

Серед головних характеристик цифрових технологій:

- інтероперабельність: системні підрозділи мають змогу обмінюватись інформацією один з одним. Завдяки мережевій роботі системи здатні співпрацювати в різних аспектах, пов'язаних з виробничими процесами. Аналогічно, розподілені системи дозволяють отримувати доступ до інформації і даних однієї системи іншими в мережі;

- прозорий контроль та швидкість реагування на події за допомогою системи ШІ;

- енергозбереження/енергоефективність;

- візуальні технології (використання голограм/3D-зображень);

- аналітичний моніторинг інформації у виробничій системі;

- використання роботів у виробничому процесі для виконання автономних небезпечних завдань.

Для сучасного міста, та, зокрема, міст-супутників АЕС також характерні проблеми, пов'язані зі скупченням транспорту на дорогах, що сприяє значним викидам вуглецю в повітря; нераціональним споживанням електроенергії; неекономічним використанням води; збільшенням кількості відходів. Якісна прозора система надання адміністративних послуг стимулює конкурентоздатність місцевої економіки, підвищує продуктивність трудових ресурсів та вирішує муніципальні питання.

Сьогодні одним із головних викликів для міст-супутників АЕС стала російська військова агресія, наслідками якої є переосмислення розбудови міста, яке робить міську систему більш стійкою, мотивує шляхом модернізації технологій інфраструктури впливати на соціально- економічну та екологічну структуру міста.

Для комплексного збору та аналізу інформації через мережу широкопasmового Інтернету необхідний оперативний центр-штаб з потужною технологічною обчислювальною системою, що містить аналітичне програмування. Наслідком роботи штабу є вирішення суспільних проблем в різних галузях господарства.

Переваги цифрових технологій.

1. Спростують та вирішують питання ощадливого енергоспоживання та підвищують якість водопостачання, що приводить до істотного зниження кінцевої ціни на електроенергію та воду для споживача.

2. Впровадження єдиної концепції цифрового управління відходами, що включає в себе їх скорочення, повторне використання та утилізацію останніх із збереженням здорового довкілля.

3. Транспорт з електричним приводом зменшує шум та забруднення повітря вихлопними газами; підвищує ефективність дорожнього руху.

4. Електронне урядування спрощує управління міською інфраструктурою.

5. Системи захисту своєчасного попередження про стихійні лиха сприяють безпеці населення.

Разом із тим, існують перешкоди та ризики для розбудови smart-інфраструктури міста-супутника АЕС:

- нестача кваліфікованого персоналу для роботи з отриманою інформацією;

- неповний або несвоєчасний обмін інформацією між різними установами;

- недостатній простір для використання отриманої інформації;

- відсутність конфіденційності особистої інформації містян;

- робота над протидією хакерських атак на технології цифрових систем.

Навчання цифровій грамотності населення, постійне вдосконалення комп'ютерної освіти, підвищення кваліфікації є надважливою інвестицією для розбудови smart-інфраструктури міста-супутника АЕС для майбутніх поколінь.

### **Висновки.**

1. Цифрові технології стимулюють суттєве зростання інноваційного, технологічного, економічного, освітнього та професійного потенціалу з прозорим нормативно-правовим регулюванням для розквіту міст-супутників АЕС.

2. Інтенсивний розвиток цифрових технологій, як IoT, штучний інтелект, 3D-друк, дрони, безпілотні системи захисту та ін. – вагомий фактор еволюції міст-супутників АЕС та вирішення проблеми урбанізації.

3. Цифрові технології – критичний фактор ядерної безпеки цивілізованого світу.

### **Література:**

1. Henry K. Australia's future prosperity depends on our infrastructure systems. Technology and Infrastructure. Internet Business Solutions Group, Cisco Systems, January 2012.

2. Trends Transforming and Shaping Smart Cities in 2021. Lipchpin, 13 February 2021, <https://linchpinseo.com/trends-that-will-transform-smart-cities>.

3. Mittal S., Khan M.A., Romero D., Wuest T. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors. Institution of Mechanical Engineers Part B, Journal of Engineering Manufacture, January 2019. P. 1342-1361, <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0954405417736547>.

# MODEL-BASED ASSESSMENT OF THE RADIOMETRIC NETWORK IN UKRAINE FOR NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE

*Novikov Andrii, Talerko Mykola*

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences  
of Ukraine, 12 Lysogirska Street, Kyiv, 03028, Ukraine

## **Abstract**

The radiometric monitoring network is one of the key tools for detecting and tracking the transport of radioactive contamination resulting from both local releases and transboundary transport of radionuclides. This study presents an assessment of the capability of the existing network of radiation monitoring stations in Ukraine, based on measurements of gamma radiation exposure dose rate, to detect accidental releases from the Kursk and Belarusian NPPs, as well as a hypothetical emergency at the Zaporizhzhia NPP.

The results show that the efficiency of detecting radioactive releases using the current monitoring network strongly depends on the release magnitude, meteorological conditions, air mass transport direction, and the spatial density of monitoring stations. Moreover, for typical meteorological scenarios of radionuclide atmospheric transport, it was found that even an extensive nationwide network based solely on exposure dose rate measurements is insufficient to detect reliably the effects of transboundary radionuclide transport to Ukraine in the event of nuclear accidents in neighboring countries, especially when the total iodine-131 release does not exceed  $3 \times 10^{15} - 10^{16}$  Bq. Therefore, the existing gamma dose rate monitoring network must be complemented with as many aspiration-based sampling units as possible—both stationary and especially mobile—for measuring radionuclide activity concentrations in the near-ground atmospheric layer.

The aim of the study is to assess the effectiveness of Ukraine's radiation monitoring network in detecting transboundary transport of radioactive contamination by modeling the atmospheric dispersion of radioactive releases from potentially hazardous sources.

To conduct the study, the consequences of radioactive releases spreading over the territory of Ukraine were estimated for three potential radiation accident scenarios:

1. An accident at the Kursk NPP (Russian Federation);
2. An accident at the Belarusian NPP;
3. An accident at the Zaporizhzhia NPP (under military conflict conditions).

Each scenario was modeled assuming a short-term (10-hour) release of radionuclides: iodine-131 ( $^{131}\text{I}$ ) with an activity of  $2.5 \times 10^{16}$  Bq and cesium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) with an activity of  $2.5 \times 10^{15}$  Bq. The modeling was performed using the RODOS decision support system.

The selected source parameters correspond to emission estimates during large-scale nuclear accidents (Fukushima-1, Chernobyl), where the characteristic ratio of  $^{131}\text{I}$  to  $^{137}\text{Cs}$  activities is 10:1–20:1 [1,2]. This emission level allows for modeling scenarios

of potential transboundary radionuclide transfer, the detection of which is primarily possible with highly sensitive aspiration systems. Similar initial conditions were used in a number of scientific works [3-4].

Based on the simulation results, an assessment was carried out to determine the capability of the existing Ukrainian radiation monitoring network to detect an emergency release at one of the mentioned nuclear power plants using measurements of ambient gamma dose rate. It was assumed that the time series of measurements at each monitoring post fluctuates around a mean value with typical variations of  $10^{-2}$  –  $3 \times 10^{-2}$   $\mu\text{Sv/h}$ . Therefore, if an increase in gamma dose rate of  $5 \times 10^{-2}$   $\mu\text{Sv/h}$  is recorded at a monitoring post, it should be considered as an indicator of additional radioactive contamination in the environment during the measurement period, i.e., the arrival of a radioactive plume at the measurement point.

The capability of the existing network of radiometric posts of the Ukrainian Hydrometeorological Service to detect exceedances of background gamma dose rates was assessed.

### Scenario 1: Kursk NPP

To model radioactive contamination of Ukraine's territory resulting from a release at the Kursk NPP, a meteorological situation was selected in which air masses in the lower atmospheric layer were transported in a southwesterly direction, followed by a shift toward the north.

The estimated deposition density of  $^{137}\text{Cs}$  in Sumy and Poltava regions reaches 37–46  $\text{kBq/m}^2$ , while the volumetric activity during the passage of the radioactive cloud at nearby monitoring posts is about 4–5  $\text{kBq/m}^3$ . Within the first 24 hours after the onset of the accident, the radioactive release reaches the Sumy, Poltava, and Cherkasy regions. On the second day, the radioactive cloud continues spreading across Central, Northern, and Western Ukraine.

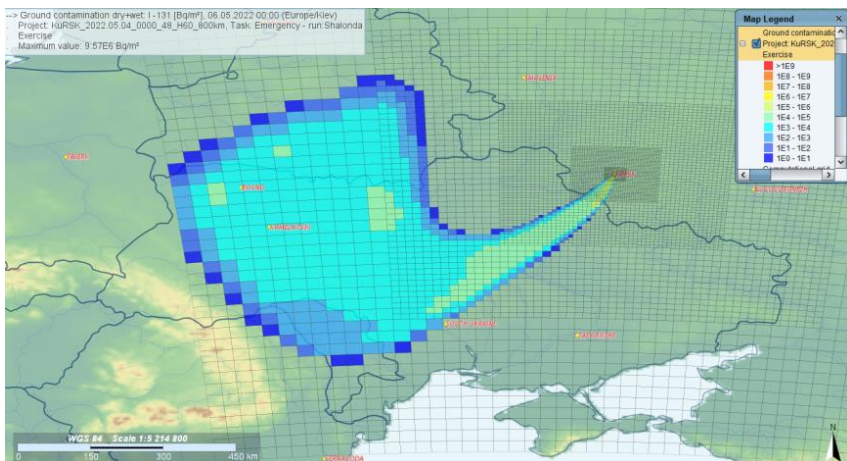


Fig. 1. Calculated field of  $^{131}\text{I}$  fallout density ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ) following a radiation accident at the Kursk NPP.

The maximum ambient gamma dose rate was recorded at the meteorological station in the city of Sumy, where it reached  $0.37 \mu\text{Sv/h}$  during the passage of the cloud and decreased to  $4.2 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$  afterward due to surface deposition. At monitoring posts in Central and Western Ukraine (e.g., Vinnytsia, Fastiv, Shepetivka, Cherkasy), these values were 3–4 times lower.

The calculated field of  $^{131}\text{I}$  radioactive fallout density, generated by such a release, is presented in Fig. 1.

### Scenario 2: Belarusian NPP

The meteorological conditions for the release dispersion were defined using results from the WRF numerical weather prediction model for October 8–9, 2022. Under the selected meteorological scenario, the radioactive release reaches the territory of Ukraine 26–28 hours after the onset of the accident, with maximum gamma dose rate and airborne activity levels recorded at nearby monitoring posts around 30 hours after the start of the release.

The highest volumetric activity of iodine-131 ( $^{131}\text{I}$ ) was observed at the Potashnya monitoring post — nearly  $600 \text{ Bq/m}^3$ . The highest deposition density and gamma dose rate were recorded in the southwestern part of Ivano-Frankivsk due to intensive wet deposition of radionuclides onto the ground surface, as rainfall occurred in this area during the cloud passage.

The calculated field of  $^{131}\text{I}$  radioactive fallout density, generated by such a release, is presented in Fig. 2.

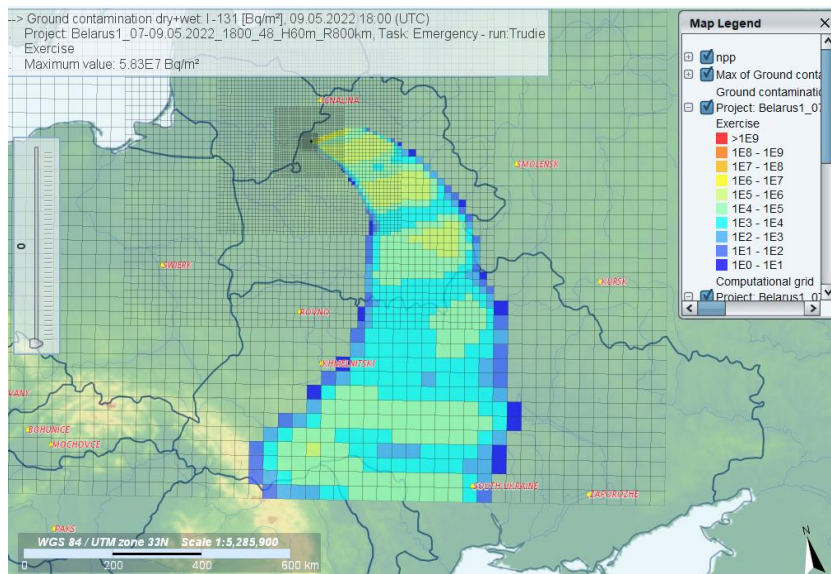


Fig. 2. Calculated field of  $^{131}\text{I}$  deposition density ( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ) during a radiation accident at the Belarusian NPP.

### Scenario 3: Zaporizhzhia NPP

Similar contamination calculations were carried out for the case of an emergency release from the Zaporizhzhia NPP. The maximum ambient gamma dose rate of 2.40  $\mu\text{Sv/h}$  was recorded at the monitoring post in Nova Kakhovka, located 120 km from the plant. In this case, the deposition density of iodine-131 ( $^{131}\text{I}$ ) reached up to 160  $\text{kBq/m}^2$ , and the volumetric activity during the passage of the radioactive cloud exceeded 35  $\text{kBq/m}^3$ . After the cloud passed, the ambient gamma dose rate at the Nova Kakhovka post was 0.16  $\mu\text{Sv/h}$  due to radiation from deposited radionuclides on the ground surface.

The calculated field of  $^{131}\text{I}$  radioactive fallout density, generated by such a release, is presented in Fig. 3.

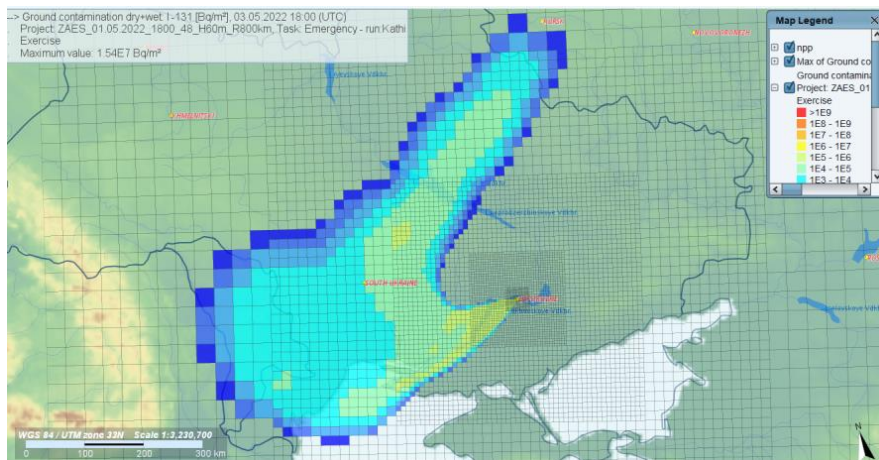


Fig. 3. Calculated field of  $^{131}\text{I}$  deposition density ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ) during a radiation accident at Zaporizhzhia NPP.

### Conclusions

For the considered typical meteorological scenarios of radionuclide atmospheric transport, modeled using the RODOS decision support system, it was found that even an extensive nationwide network of radiation monitoring posts — relying solely on ambient gamma dose rate measurements — does not provide reliable detection of transboundary transport of radioactive substances into the territory of Ukraine in the event of nuclear accidents at neighboring countries' NPPs, if the total iodine-131 release does not exceed  $3\times 10^{15} - 10^{16}$  Bq.

### References

1. Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience / Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006. — 168 p.
2. The Fukushima Daiichi Accident: Report by the Director General. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. — 240 p.

3. Stohl A., Seibert P., Wotawa G., Arnold D., Burkhart J.F., Eckhardt S. et al. Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: Determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2012. — Vol. 12, No. 5. — P. 2313–2343.

4. Hirao S., Fujita H., Kobayashi T. Estimation of source term and atmospheric dispersion for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident by coupling regional and local scale models // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2013. — Vol. 122. — P. 60–74.

## **RADIOACTIVELY CONTAMINATED WATER IN THE ROOMS OF THE SHELTER OBJECT WITHIN CONDITIONS OF OPERATION OF THE NEW SAFE CONFINEMENT**

***Odintsov Oleksii, Khan Valerii, Palamar Larisa, Sabenin Pavel, Ludmila Chikur***

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine,  
Kirova str., 36a, Chernobyl, 07270, Ukraine, oodin@ukr.net

To reduce the environmental impact of the destroyed Unit 4 of the Chernobyl Nuclear Power Plant (ChNPP), on November 29, 2016, the Arch of the New Safe Confinement (NSC) was installed in the design position over the Shelter object (SO). The installation of the NSC in the design position led to changes in the regime of atmospheric water inflow into the SO rooms. The arrival of atmospheric precipitation in the form of rain in the summer and snow in the winter, and accordingly meltwater in the spring, was stopped. The temperature and ventilation conditions of the SO rooms have changed. This led to significant changes in the conditions of formation and the existence of unorganized accumulations of radioactively contaminated water (RCW) in the rooms of the NSC-SO complex [1].

Before the Arch NSC was installed in the design position and the NSC contour was sealed in the OS rooms at levels below +12.5 m, depending on the season, there were constantly 330 – 350 m<sup>3</sup> of RCW. The main amount of RCW, approximately 270 m<sup>3</sup>, was localized in room 001/3 at the minus 2.60 m mark of the reactor compartment auxiliary systems (RCAS). In the rooms of the pressure suppression pool system (PSP) at the levels of minus 0.65 m and + 2.20 m, there were constantly 40–50 m<sup>3</sup> of RCW [2].

As a result of the drying of unorganized accumulations of RCW on the floor of the PSP rooms, highly active bottom sediments (BS) are formed, which contain uranium, <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>239+240</sup>Pu and <sup>241</sup>Am [3]. The uranium content in the PSP rooms 012/5 – 012/8 is 1 – 3 g/kg. The activity of radionuclides <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>239+240</sup>Pu and <sup>241</sup>Am in the PSP of rooms 012/7 is 5.7×10<sup>6</sup>, 6.3×10<sup>6</sup>, 6.1×10<sup>3</sup>, 3.9×10<sup>4</sup> Bq/g, respectively.

The study of the speciation of uranium and radionuclides in the BS of room 012/7 showed that the percentage of mobile forms of uranium and radionuclides is 5–

20%, which determines the high migration capacity of uranium and radionuclides under conditions of changes in the water regime in the NSC-SO complex.

Drying RCW due to secondary wind-driven uplift of the dispersed phase of the radioactive material makes an additional contribution to changes in the composition of radioactive aerosols in rooms at lower marks of the SO [4].

The aim of the work is to study changes in the volumes, element composition, activity of radionuclides and radiation characteristics of RCW in the rooms at the lower levels of the NSC-OS complex under NSC operating conditions for the period 2017 – 2024 years.

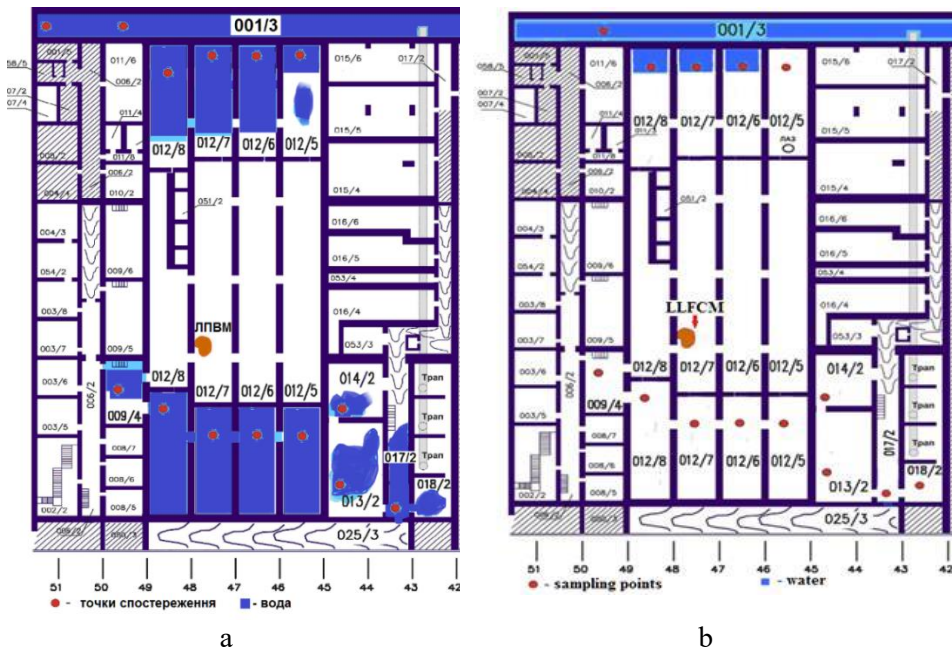


Fig. 1. Plan-scheme of the location of RCW accumulations and water depth monitoring points in the rooms of the OS at mark 0.00 m (a – 2016, b – 2024)

Fig. 1 shows the locations of water accumulations, control points of the depth of the RCW and sampling of waters on the plan of the rooms of the 4th unit of the ChNPP at the level of 0.00 m as of 2016 and 2024.

Most of the water leaks of the SO are collected in room 001/3 (Fig. 2), which is located between rows U and U1 and axes 42 and 51. The flow of RCW from the PSP into room 001/3 and, as a result, the increase in the concentration of radionuclides before the installation of the NSC occurred mainly during the period of intensive moisture inflow into the SO in the spring-summer period. Water from room 001/3 seeped through the dividing wall along axis 41 into room 001/3 of the RCAS of the 3rd unit of the Chernobyl NPP. During 2016 - 2020, the water level at the control point (axes 49–50, row U–U1) was about 1.1 m and practically did not change.

Installing the Arch NSC in the design position and sealing the contour from the eastern and western sides stopped the admission of atmospheric precipitation into the NSC space and, accordingly, into the SO rooms. Starting in December 2016, the volumes of RCW in rooms at the lower levels of the SO began to decrease due to water evaporation. The decrease in the height of the water layer in rooms 001/3 and 012/6 from November 2020 to the present time is well described by an inverse proportional relationship  $R^2$  0,884 and 0,966 Fig.3.

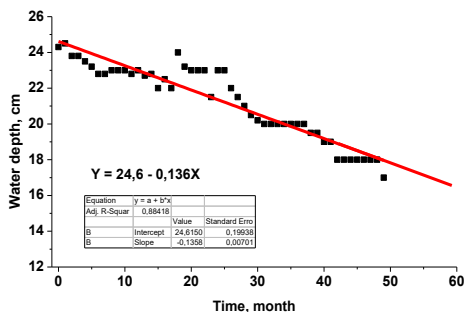


Room 001/3 on the mark minus 2,60 m

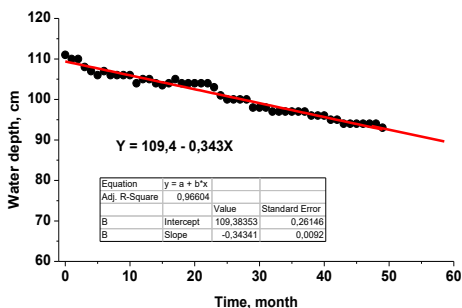
Room 012/6 pit on the mark minus 0,95 m

Fig. 2. RCW in the rooms of the NSC - SO complex

Calculation of the time according to the obtained equations of extrapolation of the height of the water layer in room 001/3 equal to 0 cm, i.e. complete drying of the water under unchanged temperature and humidity conditions of these rooms gives a value of approximately 26 years, i.e. 2047, and in room 012/6 approximately 15 years until 2036 (beginning of depth reduction November 2020).



a



b

Fig. 3. Change in the height of the water layer in the rooms of the SO depending on time  
a - 012/6, b - 001/3

The dynamics of changes in water volumes in unorganized water accumulation at the lower levels of the SO after the installation of the Arch NSC in the design position from 2016 to 2024 is shown in Fig. 4. As follows from Fig. 4, for the period from December 2016 (when the volume of RCW was about 340 m<sup>3</sup>) to July 2017, a decrease in RCW volumes was observed due to evaporation and flow RCW to the 3rd unit of the Chernobyl NPP.

Further, after a period of increasing water accumulation volume, due to moisture condensation and dust suppression sessions, the decrease in the volume of RCW in the NSC-SO complex continued until June 2018 and decreased to 290 m<sup>3</sup> by evaporation. In some rooms, where RCW accumulations were always present before the installation of the NSC in the design position, water was completely absent in June 2018. A similar pattern was observed in 2019 – 2021 years. In rooms 009/4, 013/2, 014/2, 017/2, 018/2, 061/2, 012/5-8 (except for the pits mark minus 0,95 in the northern part of rooms 012/6 – 8), 012/14 – 16 and 210/7 – 9, the water had completely dried up by November 2021.

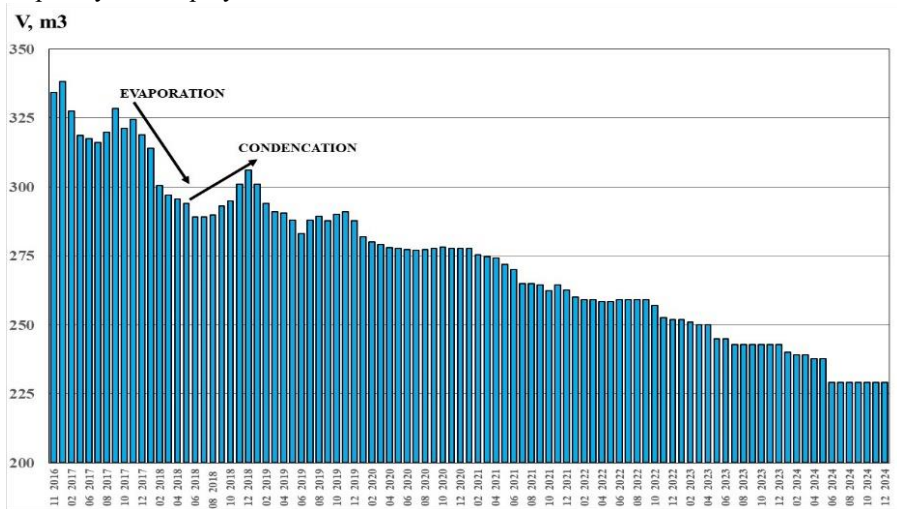


Fig. 4. Dynamics of changes in the volumes of RCW in the rooms at the lower levels of the NSC-SO complex

The dynamics of changes in uranium concentration (g/m<sup>3</sup>) in the RCW of rooms 012/16 (southern part, sampling water point (s. p.) 6), 009/4 (s. p. 7), 014/2 (s. p. 17), 017/2 (s. p. 18), 01/3 (s. p. 20), 012/13 (northern part, s. p. 21), 001/3 (s. p. 30), 012/6 (northern part, s. p. 31), 012/7 (southern part, s. p. 32), and 012/8 (southern part, s. p. 35) in the period 2016 – 2024 is shown in Fig. 5. As can be seen in Fig. 5, in rooms 017/2 (s. p. 18), 01/3 (s. p. 20), 012/7 (s. p. 32) and 012/16 (s. p. 6) after the installation of the Arch NSC over the SO, due to water evaporation, the uranium concentration increased to a value of more than 50 - 150 g/m<sup>3</sup>. In alkaline carbonate

conditions, uranium is found in the form of complex compounds that are highly soluble in water  $[(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2]$  and  $[(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3]^{4-}$  [5].

Fig. 6 and 7 shows changes in the volume activities ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  in the RCW of the NSC - SO rooms for the period 2016–2024. The volume activity of  $^{90}\text{Sr}$  (Fig. 6 - a) significantly increased by the time of complete drying in room 012/7 (s. p. 32) and in February 2018 was  $2.5 \times 10^{10} \text{ Bq}/\text{m}^3$ . In the RCW of room 012/16 (s. p. 6), under conditions of a decrease in the volume of water due to evaporation, the volumetric activity of  $^{90}\text{Sr}$  increased somewhat less than in room 012/7 and amounted to  $3.8 \times 10^9 \text{ Bq}/\text{m}^3$  in March 2020.

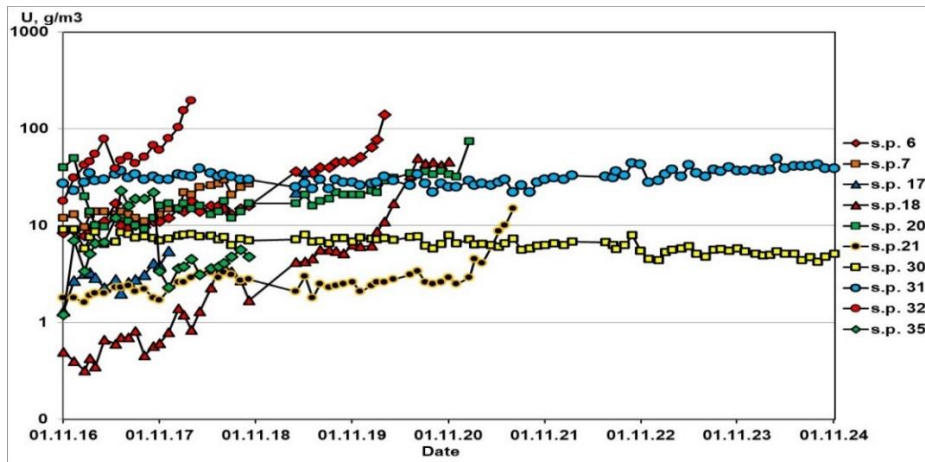


Fig. 5. Uranium concentration in the RCW rooms number 012/16 (s.p. 6), 009/4 (s.p. 7), 014/2 (s.p. 17), 017/2 (s.p. 18), 01/3 (s.p. 20), 012/13 (s.p. 21), 001/3 (s.p. 30), 012/6 (s.p. 31), 012/7 (s.p. 32) i 012/8 (s.p. 35)

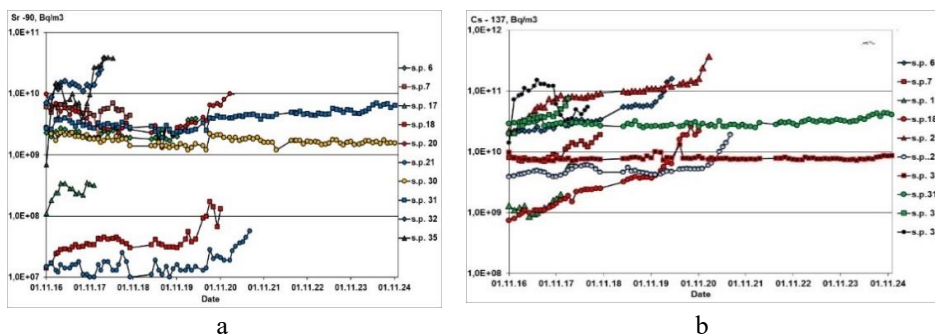


Fig. 6. Volume activity of radionuclides in the RCW rooms NSC – SO complex  
a -  $^{90}\text{Sr}$  and b -  $^{137}\text{Cs}$

This is probably due to the formation of compounds that are difficult to dissolve in water, namely calcium carbonates under conditions of increasing concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  cations and  $\text{CO}_3^{2-}$  anions - due to water evaporation and coprecipitation of strontium ( $^{90}\text{Sr}$ ) and calcium carbonates. The volume activity of  $^{137}\text{Cs}$  (Fig. 6 - b) in the RCW of rooms 012/7 and 012/16 also significantly increased to values of  $7.5 \times 10^{10}$  and  $1.4 \times 10^{11}$  Bq/m<sup>3</sup>, respectively. In the RCW in rooms 012/6 and 012/13, the volumetric activity of  $^{137}\text{Cs}$  is at the same level as before the installation of the Arch NSC in the design position: 012/6 –  $2.7 \times 10^{10}$  Bq/m<sup>3</sup> and 012/13 –  $5.2 \times 10^9$  Bq/m<sup>3</sup>. It should be noted that in room 001/3 a constant volumetric activity of  $^{137}\text{Cs}$  is observed (see Fig. 6 - b).

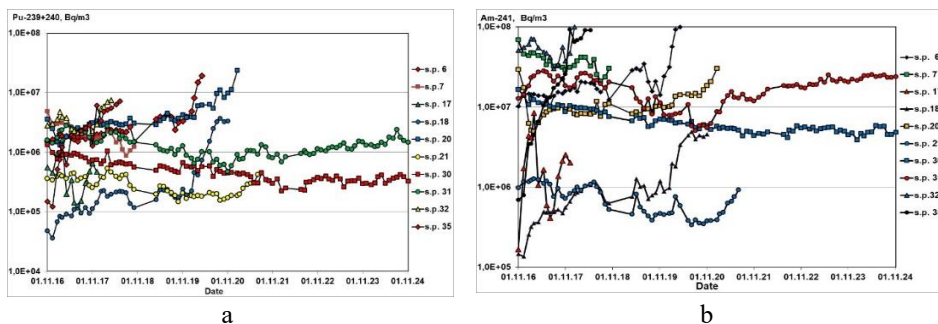


Fig. 7. Volume activity of radionuclides in the RCW rooms NSC – SO complex  
a –  $^{239+240}\text{Pu}$  and b –  $^{241}\text{Am}$

The volume activity of  $^{239+240}\text{Pu}$  (Fig. 7 - a) in the RCW of rooms 012/7 and 012/16 increased by almost an order of magnitude and amounted to  $5.6 \times 10^6$  Bq/m<sup>3</sup> in room 012/7 in February 2018, and  $1.5 \times 10^7$  Bq/m<sup>3</sup> in room 012/16 in March 2020. The volumetric activity of  $^{241}\text{Am}$  in the RCW of rooms 012/7 and 012/16 also increased by an order of magnitude and reached values of  $1.1 \times 10^8$  and  $9.2 \times 10^7$  Bq/m<sup>3</sup> (Fig. 7 - b).

The activity ratios of radionuclides  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{154}\text{Eu}/^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{244}\text{Cm}/^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}/^{239+240}\text{Pu}$  in the RCW of the SO differ significantly by one or two orders of magnitude from the calculated values for the irradiated fuel of the 4th unit of the Chernobyl NPP.

During water evaporation, an increase in the alkalinity of the NBK-SO RCW is observed, the pH increases to values of 9.5–10.2. March 2020, the concentration of carbonates in the RCW of room 012/16 increased 4 times and amounted to 620 mg/dm<sup>3</sup>, and hydro-carbonates 5 times and amounted to 2,560 mg/dm<sup>3</sup>. In the RCW of room 017/2, the concentrations of  $\text{CO}_3^{2-}$  and  $\text{HCO}_3^-$  increased almost 10 times and amounted to 2,370 and 9,940 mg/dm<sup>3</sup>, respectively, in July 2020.

Monthly monitoring of the composition of macro-components, uranium and volumetric activities of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  in the water of unorganized accumulations at the lower levels of the NSC-SO complex showed a steady trend of increasing concentrations of carbonates, hydro-carbonates, uranium

and volumetric activities of radionuclides  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  in the water of rooms 009/4, 012/7, 012/16, 014/2 and 017/2 until the water evaporated completely.

## Conclusions

In the eight years since the installation of the NSC in rooms SO 013/2, 014/2, 017/2, 009/4, 012/5–8 and 012/13–16, unorganized accumulations of RCW have completely dried up. The volume of RCW at the lower levels of the SO decreased by almost  $95\text{ m}^3$ . RCW remained only in rooms 012/6-8 (pits at minus 0.95 m) and 001/3, the total volume of RCW is approximately  $230\text{ m}^3$ .

Under conditions of water evaporation, there was a significant (10-20-fold) increase in the concentration of uranium, macro-components, and volumetric activity of radionuclides  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ , and  $^{241}\text{Am}$  in the accumulations of RCW in rooms 012/7, 012/16 and 017/2.

As a result of the drying of radioactively contaminated water in the premises at the lower levels of the NSC - SO, highly active bottom sediments containing uranium and radionuclides  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  were formed on an area of approximately  $1000\text{ m}^2$ .

## References

1. Odintsov A. A., Khan V. E. (2018). [Radioactive water in the Shelter object after installing the “Arch” of the New safe confinement into design position]. *Problemy bezpeky elektrostansiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants’ Safety and of Chornobyl], vol. 30, pp. 67—77. (in Russ.)
2. Odintsov A. A., Khan V. E., Krasnov V. A., Shcherbin V. N. (2016). [Long-term monitoring of unorganized accumulations of liquid radioactive waste at the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostansiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants’ Safety and of Chornobyl], vol. 27, pp. 43—58. (in Russ.)
3. Odintsov O. O., Palamar L. A., Chikur L. B. (2021) [Speciation of radionuclides in the bottom sediments of room 012/7 of the NSC - Shelter object]. *Nuclear power and environment*, no. 3 (22), pp. 58 – 66. (in Ukrain)
4. Lagunencko A. S., Khan V. Ye., Odintsov O. O., Kovalchuk V. P., et.al. (2019). [Radioactive aerosols in 2017—2018 near lava-like fuel containing materials in premise 012/7 of the Shelter object]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia* [Nuclear Power and the Environment], vol. 13, no. 1, pp. 83—90. doi: 10.31717/2311-8253.19.1.10. (in Russ.)
5. Siegel M. D., Bryan C.R. (2003) *Environmental Geochemistry of Radioactive Contamination*. SANDIA REPORT (SAND2003-2063) Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM. 114 p.

# ПРОГНОЗ РАДІАЦІЙНОГО СТАНУ ОКРЕМИХ ЗОН ВИКОНАННЯ РОБІТ ПО ДЕМОНТАЖУ НЕСТАБІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» НА ПЕРІОД ПОДОВЖЕННЯ ТЕРМІНУ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Павловський Л. І., Городецький Д. В., Деренговський В. В., Меньшенін Є. А.,  
Брилка С. Г., Одінцов О.О., Паламар Л.А.*

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль,  
07270, Україна. l.pavlovsky@ispnpp.kiev.ua

**Abstract:** Based on the analysis of data from sample studies in 2021 and 2024 of the parameters of the radiation situation in the future areas of work on dismantling unstable structures of the Shelter facility, a probable forecast of their dynamics for the period of extending the term of its safe operation until 2029 is given. It was determined that for the period until 2029, the values of the ambient dose equivalent of gamma radiation will practically not change, and the total dusting and total activity, as part of unfixed surface contamination of working surfaces in the areas of work, tend to increase.

**Keywords:** Shelter object, life extension, radiation situation.

На підставі аналізу даних вибіркових досліджень у 2021 і 2024 рр. параметрів радіаційної обстановки в майбутніх зонах виконання робіт з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», наведено ймовірний прогноз їхньої динаміки на період подовження терміну його безпечної експлуатації до 2029 р. Визначено, що за період до 2029 року величини потужності амбієнтного еквівалента дози гамма-опромінення, практично, не зміняться, а загальне запилення і сумарна активність, у складі нефіксованого поверхневого забруднення робочих поверхонь у зонах виконання робіт, мають тенденцію до збільшення.

*Ключові слова:* об'єкт «Укриття», подовження терміну експлуатації, радіаційна обстановка

## Вступ

Проектний термін експлуатації конструкцій об'єкта «Укриття», зведених протягом червня – листопада 1986 р. над зруйнованим 4-м енергоблоком Чорнобильської АЕС, становить 30 років. Наприкінці 1990-х років, під час контролю технічного стану будівельних конструкцій об'єкта «Укриття», виявлено низку нестабільних конструкцій, імовірність обвалення яких була неприпустимо високою. Визначено, що зменшення ризиків обвалення таких конструкцій можливе лише шляхом їхньої стабілізації (посилення), що й було реалізовано у 2004–2008 рр. Зважаючи на запроєктований 15-річний термін експлуатації стабілізованих конструкцій, це дозволило забезпечити прийнятний рівень безпеки об'єкта «Укриття» до кінця 2023 р.

На початку 2021 р. розпочався процес проектування заходів з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття». На той час уже були виконані передпроектні дослідження параметрів показників радіаційної обстановки в майбутніх зонах будівельно-демонтажних робіт.

У зв'язку з військовою агресією російської федерації проти України проектування робіт з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» було призупинено, а заплановану дату початку виконання робіт з демонтажу перенесено на невизначений термін.

Через затримку робіт з демонтажу нестабільних конструкцій та внаслідок закінченням терміну безпечної експлуатації локалізуючої споруди об'єкта «Укриття» (ЛС ОУ) виникла необхідність технічного обґрунтування подовження терміну її експлуатації. У постанові колегії Державної інспекції ядерного регулювання України (ДІЯРУ) від 19.10.2023 р. [1] було визначено вимоги для подовження терміну безпечної експлуатації ЛС ОУ. Вони базувалися на необхідності додаткового дослідження технічного стану будівельних конструкцій I та II категорії відповідальності за ядерно-радіаційну безпеку ЛС ОУ. Особливо це стосувалось конструкцій та їхніх опор, які не досліджувалися з моменту завершення будівництва об'єкта «Укриття» в 1986 р. у зв'язку з відсутністю фізичного доступу до них.

У бригади, які виконували обстеження технічного стану будівельних конструкцій та їхніх опор, також були включені фахівці з радіаційної безпеки. Окрім допоміжних функцій з обстеження технічного стану конструкцій, вони виконали додаткові вимірювання параметрів радіаційної обстановки в зонах обстежень. Ці роботи є продовженням передпроектних досліджень радіаційної обстановки, що були розпочаті у 2021 р., і мали на меті визначення сучасного (на той момент часу) радіаційного стану окремих запроєктованих зон виконання робіт по демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» в частині «раннього» демонтажу [2, 3].

Метою цієї роботи є аналіз динаміки параметрів радіаційної обстановки на деяких ділянках по демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» за період 2021–2024 рр., а також визначення тенденції в динаміці їхніх величин на наступний період до 2029 р.

Висловлюємо щирі вдячність співробітникам ДСП «Чорнобильська АЕС», особисто О. П. Солоненко, за вагому технічну допомогу під час виконання досліджень.

### **Об'єкти та методи досліджень**

Об'єктами досліджень параметрів показників радіаційної обстановки були ділянки майбутніх зон виконання робіт (ЗВР) з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» в частині «раннього» демонтажу, а саме:

- приміщення Г635/3 деаераторної етажерки об'єкта «Укриття»;
- металоконструкція блоку «Мишкін дім»;

- західна зона обпирання блоку балок Б1 і Б2 на металокожструкції підсилення;
- західні горизонтальні щити;
- сходово-ліфтовий блок.

*Приміщення Г635/3 деаераторної етажерки об'єкта «Укриття».*

Унаслідок аварії на Чорнобильській АЕС деаераторна етажерка (ДЕ) 4-го енергоблоку отримала суттєві пошкодження несучих будівельних кожструкцій. Для стабілізації каркаса ДЕ були виконані рішення, спрямовані на включення існуючих металевих L-подібних опор верхнього ярусу ДЕ (вище за відмітку 24,300 м) у спільну роботу із закріплення нахилених колон від зміщення в бік машинного залу. Стабілізація каркаса ДЕ з колонами, що відхилилися, проводилася за допомогою установки додаткових елементів підсилення і закріплення опорних вузлів уже існуючих елементів підсилення. Реалізація цих рішень забезпечила стабілізацію верхнього ярусу залізобетонного каркаса ДЕ в осях Б–В, вище відмітки 24,270 м, яка полягала в посиленні рам каркаса в осях 42–50. Відповідно до цих рішень у приміщенні Г635/3 було посилено 10 рам каркаса будівлі ДЕ в осях 42–50 для запобігання обвалу.

Також для запобігання обвалу аварійних плит верхнього перекриття приміщення Г635/3 будівлі ДЕ, на відмітці 38,900, була виконана стабілізація аварійних плит шляхом встановлення колон із круглих сталевих труб різних типорозмірів. Колони, що спираються на перекриття на відмітці 16,400 м у приміщенні Г553/2, проходять крізь отвори, виконані в нижньому перекритті приміщення Г635/3 (відмітка 24,300). На їхніх верхніх кінцях встановлено траверси з прокатних профілів для сприйняття навантаження аварійних плит перекриття.

*Металокожструкції блоку «Мишкін дім» належать до елементів північної зони покрівлі, функціональне призначення яких полягає в закритті кутової башти об'єкта «Укриття», яка є кожструкцією з'єднання між північною каскадною стіною і західною контрфорсною стіною.*

Блок «Мишкін дім» – пустотіла просторова металева кожструкція, що розташована між осями 50 – 51, С. Висота блоку 3,0 м, ширина 5,7 м, довжина 9,0 м, маса блоку 6,5 т. Каркас блоку «Мишкін дім» складається з вертикальних, повздовжніх та поперечних двотаврових балок, в'язів із швелерів і кутників та металевих покривних листів (верхнього та бокового), з товщиною листа 4 мм. Металокожструкції блоку «Мишкін дім» утримуються на опорних поверхнях за рахунок сил тертя (не мають фіксуєуючих з'єднань). Ділянка зони досліджень блоку «Мишкін дім» знаходиться між осями 50 – 51, С, має площу ~ 54 м<sup>2</sup>.

*Західна зона обпирання блоку балок Б1 і Б2 на металокожструкції підсилення.* Основні несучі блоки балок Б1 і Б2 по осях Ж і П призначені для сприйняття навантаження від металокожструкцій, що накривають центральну частину реакторного відділення аварійного 4-го енергоблоку Чорнобильської АЕС. Безпосередньо балки Б2 сприймають навантаження від накату із труб центрального залу і легкої покрівлі, а балки Б1 сприймають навантаження на

півдні від південних щитів, а на півночі від північних щитів-«ключок». Балки Б2 по осях Ж і П мають західні та східні місця обпирання.

На заході, по осях Ж і П, блоки балок Б1 і Б2 обпираються на залишки бетонної стіни по осі 50, що у свою чергу були підсилені металокожструкціями та додатково забетоновані. Після зведення об'єкта «Укриття» місця обпирання було закрито металевими кожструкціями. У процесі реалізації стабілізаційного заходу № 2 під блоки балок Б1 і Б2 було підведені металокожструкції підсилення (МКП), а для зменшення навантаження на стіну було виконано піддомкращування блоків балок Б1 і Б2 з метою перенесення частини навантаження від кожструкції центральної частини покрівлі об'єкта «Укриття» на МКП.

Зона досліджень західних ділянок обпирання блоків балок Б1 і Б2 знаходиться в місцях їхнього спирання по осях Ж і П, має площу ~10 м<sup>2</sup>.

*Західні горизонтальні щити.* Західні щити покриття представлені кожструктивними елементами (марками) А3 і А4. Металокожструкції західної зони покриття об'єкта «Укриття» є вільно обпертою на дві опори балковою системою, яка має прогін 11,495 м. Уздовж осі 51' металокожструкції вільно обпираються на західну гілку балок К1-ІІ і К2-ІІ. Уздовж західної кожтрфорсної стіни марки А3 і А4 обпираються на зварену балкову систему, що у свою чергу розташована вздовж металокожструкції стіни. Обпирання марок А3 і А4 на балкову систему вздовж металокожструкції західної кожтрфорсної стіни здійснено на позначці 51,200 м. Марки А3 і А4 розташовані між осями Д – С, при цьому марка А4 встановлена між осями Д – Ж, а чотири марки А3 встановлені між осями Ж – С. Після монтажу цих кожплексних щитів щілини між ними закриті нащільниками з листової сталі.

*Сходово-ліфтовий блок* між осями 51 – 52 примикає до блоку В, а також по осі В' примикає до будівлі ДЕ. Сходово-ліфтовий блок виконаний у вигляді багатопверхових залізобетонних рам (колони, ригелі), які об'єднані в єдину просторову систему за допомогою поздовжніх в'язів у вигляді плит перекриття, а також монолітних та збірно-монолітних стін.

**Методи досліджень.** Під час досліджень параметрів радіаційної обстановки вимірювались величина показника потужності амб'єнтного еквівалента дози (амб'єнтноі дози) гамма-опромінення на потенційних робочих місцях (на висоті 1 м від поверхні) та визначались характеристики загального і нефіксованого поверхневого забруднення (ПЗ) типових робочих поверхонь у межах ЗВР.

Методи визначення параметрів показників радіаційної обстановки, що застосовувались, детально наведено в наших попередніх роботах [3, 4, 5]. При цьому пряме визначення альфа- і бета-активності зразків нефіксованого ПЗ виконувалось у лабораторії ЦРБ ГСП «Чорнобильська АЕС» на приладі КРК-01.

Окремо виконувались дослідження з визначення маси пилу, що покриває робочі поверхні у типових місцях ЗВР, шляхом відбирання зразків пилу зі стандартної площі поверхні (100 см<sup>2</sup>) за допомогою автономного пирососу й подальшого зважування в лабораторних умовах (з точністю до 0,0001 г).

Зважаючи на високі рівні іонізуючого випромінювання в межах ділянок, де виконувались дослідження (понад 10 мЗв/год), кількість окремих визначень параметрів радіаційної обстановки та відібраних зразків ПЗ була мінімальною. Такий підхід запроваджено з огляду на отримання якомога меншої дози опромінення персоналом під час досліджень у зв'язку з тим, що вказані роботи виконувались одночасно з основною діяльністю – обстеженням технічного стану конструкцій I та II категорії відповідальності за ядерно-радіаційну безпеку ЛС ОУ. Зазначений підхід відповідає вимогам із застосування принципу оптимізації протирадіаційного захисту під час виконання радіаційно небезпечних робіт [6].

## Результати досліджень

Результати досліджень параметрів показників радіаційної обстановки надано за окремими майбутніми ЗВР з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» (у частині «раннього» демонтажу).

*Приміщення Г635/3 ДЕ об'єкта «Укриття».* Вимірювання величини амбієнтної дози та загального ПЗ у приміщенні Г635/3 виконувались уздовж осі В (від осі 51 до осі 42) та уздовж осі Б (від осі 41 до осі 43), а також уздовж осі 49 (від осі В до осі Б) – на перехідних містках (відмітка 29,670 м) та біля перетину осей В та 49 (відмітка 24,000 м).

Величина амбієнтної дози знаходилась у інтервалі значень від 0,08 до 0,36 мЗв/год. Величина загального ПЗ становила від  $1,2 \cdot 10^4$  до  $1,0 \cdot 10^5$  бета-част./( $\text{см}^2 \cdot \text{хв}$ ) при значенні середнього –  $5,7 \cdot 10^4$  бета-част./( $\text{см}^2 \cdot \text{хв}$ ).

*Металоконструкція блоку «Мишкін дім».* Вимірювання амбієнтної дози та загального ПЗ виконувалось на поверхні металоконструкції блоку «Мишкін дім» та опорних поверхнях північної контрфорсної стіни, у місцях з'єднання з нижньою частиною металоконструкції північних щитів-«ключок» по осях 50 – 41 та осі С (відмітка 53,000 м).

Величина амбієнтної дози за даними досліджень 2024 р. знаходилась в інтервалі значень від 0,20 до 1,50 мЗв/год (середнє – 0,63 мЗв/год). Величина загального ПЗ становила  $2,0 \cdot 10^3$  бета-част./( $\text{см}^2 \cdot \text{хв}$ ).

Величина амбієнтної дози за даними досліджень 2021 р. на цій ділянці знаходилась в інтервалі значень від 0,16 до 1,25 мЗв/год (середнє – 0,44 мЗв/год). Враховуючи похибки вимірювальних приладів та неповний збіг координат точок вимірювань, можна зробити висновок, що величина амбієнтної дози на ділянці металоконструкції блоку «Мишкін дім» за останні три роки суттєво не змінилась.

За результатами вимірювання 2024 року, маса пилу на горизонтальній поверхні металоконструкції блоку «Мишкін дім» становить від 38,2 до 47,4 г/м<sup>2</sup>.

Альфа- і бета-активність різних фракцій нефіксованого ПЗ наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Альфа- і бета-активність (густина потоку, частинок/см<sup>2</sup> · хв) окремих фракцій нефіксованого ПЗ на ділянці ЗВР «Металоконструкції блоку “Мишкін дім”»

Показник, що визначається	Відбір пилу пирососом	«Сухий» мазок	«Мокрий» мазок (розчин 1М HNO <sub>3</sub> )	Нефіксоване ПЗ (сумарне)
2021 р.				
β-частинки	415	31	52	498
α-частинки	0,4	0,1	0,2	0,7
2024 р.				
β-частинки	611	5	21	637
α-частинки	2,7	0	0	2,7

Аналіз даних табл. 1 показує, що співвідношення щільності потоку β- і α-частинок у зразках нефіксованого ПЗ за різні роки не збігається, у зв'язку з наявністю у зразках 2024 р. більшої частки паливної компоненти у складі ПЗ. Проте простежується тенденція у збільшенні активності нефіксованого ПЗ на цій ділянці.

*Західна зона обпирання блоку балок Б1 і Б2 на металоконструкції підсилення.* Вимірювання величини амбієнтної дози виконувалось у західній зоні обпирання блоку балок Б1 і Б2 на металоконструкції підсилення по осях Ж і П.

За результатами досліджень 2024 р. величина амбієнтної дози знаходилась в інтервалі таких значень:

- по осі П – від 0,59 до 2,60 мЗв/год (середнє – 1,10 мЗв/год);
- по осі Ж – від 0,65 до 2,50 мЗв/год (середнє – 1,40 мЗв/год).

За результатами досліджень 2021 р. величина амбієнтної дози на цій ділянці знаходилась в інтервалі таких значень:

- по осі П – від 0,47 до 1,00 мЗв/год (середнє – 0,81 мЗв/год);
- по осі Ж – від 0,44 до 1,10 мЗв/год (середнє – 0,71 мЗв/год).

Враховуючи похибки вимірювальних приладів та неповний збіг точок вимірювань, можна зробити висновок, що середня величина амбієнтної дози на ділянці західної зони обпирання блоку балок Б1 і Б2 на металоконструкції підсилення, практично, не змінилась за останні три роки.

*Західні горизонтальні щити.* Вимірювання величини амбієнтної дози виконувалось в осях 51'+10 м та від осі Д до осі С. Величина амбієнтної дози знаходилась в інтервалі значень від 0,32 до 3,20 мЗв/год (медіана – 1,64 мЗв/год).

*Легка покрівля над накатом з труб.* Визначення маси пилу на горизонтальній поверхні конструкції легкої покрівлі (північно-західна частина) показало, що цей показник становить від 25,4 до 51,6 г/м<sup>2</sup>. Аналогічні вимірювання, які виконувались на цій ділянці у 2021 р. [4], показали, що на той час запилення цих поверхонь сягало величини 15,0 г/м<sup>2</sup>. На підставі цього можна зробити висновок про певну тенденцію у збільшенні з плином часу запилення

горизонтальних поверхонь на покрівлях об'єкта «Укриття». Альфа- і бета-активність (густина потоку частинок) різних фракцій нефіксованого ПЗ наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Альфа- і бета-активність (густина потоку, частинок/см<sup>2</sup>·хв) окремих фракцій нефіксованого ПЗ на ділянці ЗВР «Легка покрівля над накатом з труб»

Показник, що визначається	Відбір пилу пирососом	«Сухий» мазок	«Мокрий» мазок (розчин 1М HNO <sub>3</sub> )	Нефіксоване ПЗ (сумарне)
2021 р.				
β-частинки	1260	41	55	1356
α-частинки	5,0	0	0	5,0
2024 р.				
β-частинки	2350	12	20	2382
α-частинки	7,4	0	0	7,4

Аналіз даних таблиці 2 помітно, що підвищення активності нефіксованого поверхневого забруднення відбулось за рахунок збільшення його найбільш рухомої фракції, яка була відібрана за допомогою пирососу і становила, відповідно, 92,9 і 98,7 % При цьому, аналіз його радіонуклідного складу, а саме співвідношення питомої активності основних дозо утворюючих радіонуклідів, наприклад <sup>137</sup>Cs/<sup>90</sup>Sr, вказує на його однакове походження як у 2021, так і у 2024 роках. Порівняння даних свідчить про тенденцію до збільшення активності нефіксованого ПЗ на ділянці, що досліджувалась. Враховуючи, що при цьому відбувалося збільшення маси пилу на робочих поверхнях майбутньої ЗВР, то можна зробити висновок, що процеси збільшення активності нефіксованого ПЗ триватимуть і протягом наступного періоду 2025–2029 рр..

*Сходово-ліфтовий блок.* Згідно із запланованим обсягом робіт з демонтажу нестабільних конструкцій, сходово-ліфтовий блок не включений у перелік конструкцій, які повинні бути демонтовані або стабілізовані. Тому ділянки сходово-ліфтового блоку не є потенційними ЗВР. У зв'язку з цим вимірювання амбієнтної дози виконувались тільки по маршруту обстеження технічного стану конструкцій блоку.

Вимірювання амбієнтної дози виконувались у сходово-ліфтовому блоці між осями В–Д та осями 52–54, у межах відміток від 5,800 до 49,900 м. Амбієнтна доза на відмітці 49,900 м становила 2,5 мЗв/год. На відмітках від 43,000 до 35,500 м величина цього показника поступово зменшується від 1,7 до 1,1 мЗв/год, що також спостерігається між відмітками від 31,000 до 16,400 м (зменшення від 1,0 до 0,2 мЗв/год), а також між відмітками від 10,000 до 5,800 м (зменшення від 0,15 до 0,05 мЗв/год).

## Висновки

1. Потужність амбієнтного еквівалента дози гамма-випромінювання, на ділянках майбутніх зон виконання робіт по демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» (у частині «раннього» демонтажу), протягом періоду 2021–2024 рр., практично, не змінилась. Ймовірно, що протягом наступного періоду 2025–2029 рр. величина цього показника також суттєво не змінюватиметься.

2. Порівняння даних досліджень нефіксованого поверхневого забруднення робочих поверхонь майбутніх зон виконання робіт на покрівлях об'єкта «Укриття» у 2021 і 2024 рр. свідчить про певну тенденцію у збільшенні маси їхнього загального заповнення, а також на збільшення активності у складі нефіксованого поверхневого забруднення. Відповідно протягом наступного періоду 2025–2029 рр., ймовірно, відбуватиметься подальше накопичення маси пилу на покрівлях об'єкта «Укриття» зі збільшенням сумарної активності у складі нефіксованого поверхневого забруднення.

3. Більш точно прогнозування динаміки активності нефіксованого поверхневого забруднення з плином часу потребує виконання спеціальних досліджень, що включатимуть відбір та аналіз відповідної кількості його зразків для отримання статистично достовірних висновків.

### Перелік посилань

1. Постанова Колегії ДІЯРУ від 19.10.2023 р. № 03 «Про результати державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки Звіту з переоцінки безпеки експлуатації локалізуючої споруди об'єкта «Укриття» (ЛС ОУ) з обґрунтуваннями можливості продовження її експлуатації до 31.10.2029 на рівні безпеки ЛС ОУ не нижче того, що був досягнутий після завершення невідкладної стабілізації», введена в дію наказом Держатомрегулювання від 24.10.2023 № 542.

2. НБК. ПК-2. Демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» ДСП ЧАЕС в частині «раннього» демонтажу. Етап 2. Радіаційне обстеження на шляхах доступу та у зонах виконання робіт. – Звіт за договором № 823-114-01 від 03.08.2021 р.

3. Павловський Л. І. Визначення радіаційної обстановки в районах демонтажу нестійких конструкцій об'єкта «Укриття» / Л. І. Павловський, Д. О. Хоменко, В. В. Єгоров // Ядерна енергетика та довкілля. – 2022. – Вип. 3 (25). – С. 16–23.

4. Актуальність прогнозування забруднення повітря робочої зони під час виконання демонтажних робіт об'єкта «Укриття» / Л. І. Павловський, Д. В. Городецький, В. В. Деренговський, Є. А. Меньшенін // Ядерна енергетика та довкілля. – 2022. – Вип. 2 (24). – С. 54–61.

5. Вплив герметизації контуру нового безпечного конфайнмента на поверхневе забруднення зовнішніх поверхонь покрівель об'єкта «Укриття» та оцінка можливості їхньої дезактивації / Л. І. Павловський, Д. В. Городецький, Є. А. Меньшенін [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. – 2022. – Вип. 3 (25). – С. 33–41.

6. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. – Київ, 1997.

# ДИНАМІКА ТЕМПЕРАТУРИ І ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ В ПРИМІЩЕННЯХ НБК - ОУ В ПЕРІОД ВЕСНА 2024 –ЗИМА 2024-25.

*Павлюченко Микола*

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій  
Національної академії наук України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270,  
Україна, [m.pavlyuchenko@ispnpp.kiev.ua](mailto:m.pavlyuchenko@ispnpp.kiev.ua)

**Abstract:** The paper presents and discusses the results of temperature and relative humidity measurements in the premises of the NSC-SO complex in the period spring 2024 - winter 2024-25 (4 seasons).

Measurements were made using temperature and air humidity loggers of the DLT-11-Pt, RC-4HC type and weather stations of the PCE-FWS-20 type.

The average monthly values of temperature and relative humidity for the above period were analysed and discussed. It has been established that the dynamics of the temperature field inside the NSC-SO correlates with the seasonal and daily dynamics of the external environment. There is also thermal inertia along the vertical, which is associated with different thermal conductivity and volumetric heat capacity of materials at lower levels, and the dynamics of relative humidity also has a seasonal and daily character.

The average temperature in the rooms for the period March 2024 - February 2025, in which measurements were taken, was within  $15.34 \pm 3.43^\circ\text{C}$  with a probability of 0.954, a coefficient of variation of 11.18%, which characterizes the variability as average, a standard deviation from  $0.58^\circ\text{C}$  at the lower levels to  $6.38^\circ\text{C}$  at the upper levels.

In the rooms in which there are FCM (012/7, 210/7, 305/2), the temperature is  $1.5\text{-}2.0^\circ\text{C}$  higher than in the adjacent ones where there are no FCM (for example, premise 318 /2, 006/2, 207/4), thermal overheating in the premises is not observed, FCM have low temperatures and cool down naturally.

The relative humidity at the levels of 43,000-67,000 did not exceed 86%, the minimum was not less than 36%, at the lower levels of 0,000-9,000 it reached 100% in the summer season, the minimum value was 36.3%.

Currently, there is no problem of thermal danger, it can be considered only in the case of SO conversion options, in which the natural ways of cooling the FCM will be blocked.

**Key words:** temperature field, temperature, NSC-SO, FCM, average monthly temperature, relative humidity.

**Анотація.** В роботі представлені в вигляді таблиць і графіків та обговорені результати вимірювання температури і відносної вологості в приміщеннях комплексу НБК-ОУ в період весна 2024 - зима 2024 – 25 (4 пори року).

Вимірювання проводили за допомогою логерів температури і вологості повітря типу DL-11-Pt, RC-4HC та метеостанцій типу PCE-FWS-20.

Аналізу та обговоренню піддані середньомісячні значення температури та відносної вологості за вказаний вище період. Встановлено, що динаміка температурного поля всередині НБК-ОУ корелює з сезонною та добовою динамікою зовнішнього середовища, також присутня теплова інерція по вертикалі, яка пов'язана з різною теплопровідністю та об'ємною теплоємністю матеріалів на нижніх відмітках, сезонний та добовий характер носить також динаміка відносної вологості.

Середня температура в приміщеннях за період березень 2024 – лютий 2025, в яких проводились вимірювання, знаходилась межах  $15,34 \pm 3,43^\circ\text{C}$  з ймовірністю 0,954, коефіцієнт варіації 11,18%, що характеризує мінливість як середню, стандартне відхилення від  $0,58^\circ\text{C}$  на нижніх відмітках до  $6,38^\circ\text{C}$  на верхніх.

В приміщеннях, в яких присутні ПВМ (012/7, 210/7, 305/2), температура на  $1,5-2,0^\circ\text{C}$  і більше вища, ніж в сусідніх з ними де відсутні ПВМ (наприклад, прим. 318/2, 006/2, 207/4), тепловий перегрів в приміщеннях не спостерігається, ПВМ мають не значні температури і охолоджуються природним шляхом.

Відносна вологість повітря на відмітках 43.000-67.000 не перевищувала 86%, мінімальна не менше 36%, на нижніх відмітках 0.000-9.000 досягала 100% в літній сезон, мінімальне значення 36,3%.

В даний час проблема теплової небезпеки відсутня і може розглядатися лише при варіантах перетворення ОУ, при яких природні шляхи охолодження ПВМ будуть перекриті.

**Ключові слова:** температурне поле, температура, НБК-ОУ, ПВМ, середньомісячна температура.

## Вступ

У червні 2017 року в режимі моніторингу [1, 2], тобто після встановлення арки в проєктне положення, розпочато роботи по контролю основних параметрів мікроклімату в приміщеннях комплексу НБК-ОУ (рис. 1):

- 1) на легкій покрівлі об'єкту «Укриття» (ОУ) під аркою на відмітці  $\approx 67$  м та в прим. 6004 – відмітка  $\approx 67$  м;
- 2) у просторі біля західної опори балки “Мамонт” та на сходах 059/2 на відмітках  $\approx 43 - \approx 41,5$  м, відповідно;
- 3) в прим. 318/2, суміжне з прим. 305/2 та 304/3, які вміщують паливновмісних (ПВМ) – підреакторні приміщення на відмітці  $\approx 9$  м;
- 4) в прим. 210/7 (вміщує ПВМ) та прим. 207/4 на відмітці  $\approx 6$  м;
- 5) в прим. 012/7 (вміщує ПВМ) та прим. 006/2 на відмітці  $\approx 0$  м.

На даний час вищевказані роботи по контролю тривають і виконуються в складі комплексу досліджень по моніторингу ПВМ.

Завданням контролю мікроклімату є отримання числової інформації в режимі моніторингу про динаміку основних метеорологічних параметрів (температури, відносної вологості та ін.) в просторі комплексу НБК-ОУ.

Мета роботи – оцінити вплив мікроклімату в комплексі НБК-ОУ на ядерну безпеку (ЯБ) та радіаційну безпеку (РБ), стан ПВМ, будівельних конструкцій, зміну динаміки випаровування-конденсації вологи, рекомендувати коригувальні заходи щодо роботи систем вентиляції.

У даній роботі розглядаються результати моніторингу  $T^{\circ}C$  та  $Rh\%$  за період з березня 2024 року по лютий 2025 року включно (4 сезони або 12 місяців) на легкій покрівлі та в приміщеннях ОУ в умовах комплексу НБК-ОУ.

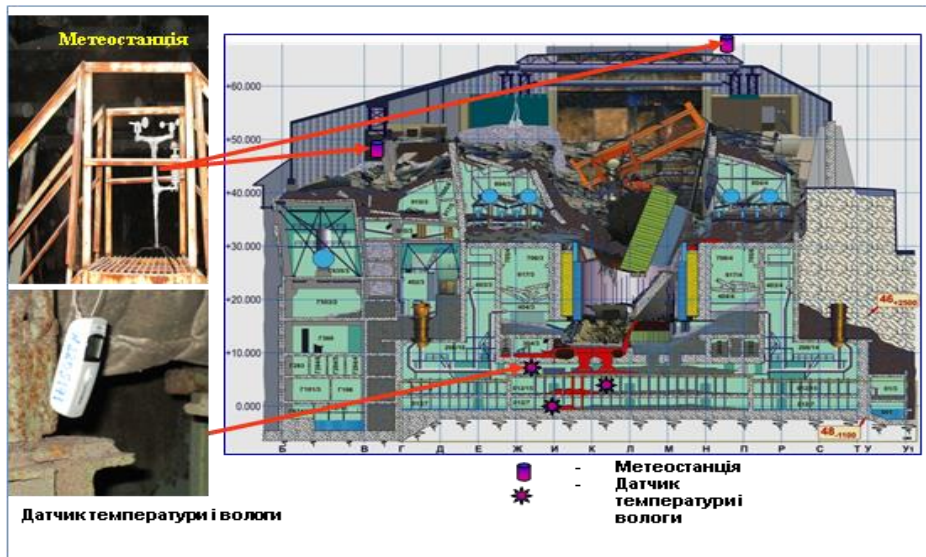


Рис.1 Схема розташування метеорологічних приладів

### Матеріали і методи

Для вимірювання температури і відносної вологості в приміщеннях НБК-ОУ застосовувались три типи приладів:

б) метеорологічні станції типу PCE-FWS-20 (рис. 1) – 2 комплекти;

б) логери (датчики) температури ( $T^{\circ}C$ ) і відносної вологості  $Rh\%$  типу DLT-11-P<sup>o</sup> в комплекті з зовнішнім датчиком температури ТСП-1-6 (рис. 2) – 3 комплекти;

в) реєстратори (датчики) температури ( $T,^{\circ}C$ ) і відносної вологості ( $Rh, \%$ ) типу Elitech RC-4HC (рис. 3) – 2 прилади.

Калібрування приладів виконано виготовлювачем, прилади виготовлені і прийняті у відповідності з обов'язковими вимогами державних стандартів і ТУ У 33.2-14242882-004-2011.

При цьому точність застосованих приладів по температурі  $\pm 0,5^{\circ}C$  ( $-20^{\circ}C/+40^{\circ}C$ ) і  $\pm 1^{\circ}C$  (в інших інтервалах) [3, 4, 5].



Рис.1



Рис. 2



Рис.3

### Результати і обговорення

Результати вимірювання  $T^{\circ}C$  і  $Rh\%$  систематизовані і представлені в таблицях та на рисунках нижче.

В таблицях 1-5 приведені середньомісячні значення  $T^{\circ}C$  і  $Rh\%$  та деякі показники описової статистики (мін., макс., стандартне відхилення) в 10 приміщеннях комплексу НБК-ОУ за період березень 2024 р. – лютий 2025 рр. [6], а в таблиці 6 результати їх порівняння з попереднім аналогічним періодом - березень 2023 р. – лютий 2023-24 р.

Крім вказаної інформації, по таблицям 1-5 можна вирахувати коефіцієнт варіації, а також довірчу ймовірність, використовуючи правило трьох сигм.

На рисунку 4 візуалізовано типову добову динаміку спостережених  $T^{\circ}C$  і  $Rh\%$  на легкій покрівлі ОУ на відмітці 67.000, яка характерна для інших приміщень на даній відмітці та на відмітках 41.500 – 43.000.

На рисунку 5 візуалізовано типову добову динаміку спостережених  $T^{\circ}C$  і  $Rh\%$  в приміщеннях 318/2 і 304/3 (відмітка 9.000), яка характерна і для інших приміщень на відмітках 9.000 – 0.000.

Мінливість (розсіяння) середньомісячних значень  $T^{\circ}C$  за досліджуваний період слабка (коэф. вар. 0,15% - 5,92%) на відмітках 0.000 – 9.000, від слабкої до середньої (коэф. вар. 1,4% - 17,32%) на відмітках 41.500 – 67.000.

Мінливість вважається слабкою, якщо коэф. вар. <10%; якщо коэф. вар. від 11-25%, то середньою і значною при коэф. вар. >25%.

Мінливість (розсіяння) середньомісячних значень  $Rh\%$  за досліджуваний період, від слабкої до середньої (коэф. вар. 0,06% - 15,8%) на відмітках 0.000 – 67.000.

Таблиця 1. Показники описової статистики значень температури і відносної вологості в приміщеннях НБК-ОУ на відмітці  $\approx 67.000$  (період спостережень 01.03.24 – 28.02.25 рр.)

Дата	Прим. 6004 - T°C & Rh%						Легка покрівля - T°C & Rh%					
	T°C			Rh %			T°C			Rh %		
	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.
<b>Бер.24</b>	4,8	8,6	5.69 ( $\pm 0.72$ )	66.0	85.0	75.92 ( $\pm 4.73$ )	9.9	13.2	10.7 ( $\pm 0.64$ )	46.0	62.0	56.16 ( $\pm 4.77$ )
<b>Кві.24</b>	8.6	12.5	10.83 ( $\pm 0.95$ )	67.0	84.0	79.46 ( $\pm 3.51$ )	13.1	16.0	14.38 ( $\pm 0.77$ )	54.0	64.0	58.80 ( $\pm 2.24$ )
<b>Тра.24</b>	12.0	18.8	14.48 ( $\pm 2.17$ )	71.0	86.0	64.56 ( $\pm 6.91$ )	15.1	20.1	17.26 ( $\pm 1.53$ )	47.0	60.0	53.01 ( $\pm 2.81$ )
<b>Чер.24</b>	18.7	22.5	20.03 ( $\pm 0.77$ )	65.0	81.0	74.45 ( $\pm 3.46$ )	19.8	22.0	20.98 ( $\pm 0.51$ )	55.0	67.3	62.37 ( $\pm 2.22$ )
<b>Лип.24</b>	22.1	25.4	23.94 ( $\pm 0.95$ )	56.0	74.0	65.48 ( $\pm 5.03$ )	21.4	26.2	24.37 ( $\pm 1.26$ )	56.5	73.3	59.29 ( $\pm 1.61$ )
<b>Сер.24</b>	22.7	24.2	23.64 ( $\pm 0.45$ )	46.0	64.0	56.33 ( $\pm 4.28$ )	23.5	25.1	24.25 ( $\pm 0.35$ )	50.5	57.2	54.00 ( $\pm 1.30$ )
<b>Вер.24</b>	21.3	24.3	22.94 ( $\pm 0.72$ )	39.0	62.0	49.48 ( $\pm 5.04$ )	22.8	25.9	24.76 ( $\pm 0.66$ )	42.0	54.5	49.80 ( $\pm 2.77$ )
<b>Жов.24</b>	17.5	22.0	18.92 ( $\pm 1.91$ )	49.0	51.0	50.06 ( $\pm 0.66$ )	18.4	22.7	19.66 ( $\pm 1.69$ )	45.0	51.0	46.78 ( $\pm 2.02$ )
<b>Лис.24</b>	7.2	17.5	14.50 ( $\pm 2.13$ )	43.0	60.0	47.66 ( $\pm 2.91$ )	11.5	18.5	15.52 ( $\pm 1.45$ )	40.0	51.0	44.59 ( $\pm 2.1$ )
<b>Гру.24</b>	6.9	10.3	8.62 ( $\pm 0.86$ )	48.0	62.0	56.06 ( $\pm 2.92$ )	11.5	13.6	12.35 ( $\pm 0.64$ )	40.0	52.0	46.32 ( $\pm 2.81$ )
<b>Січ.25</b>	6.6	9.7	7.13 ( $\pm 0.50$ )	51.0	73.0	62.42 ( $\pm 5.30$ )	10.7	11.9	11.23 ( $\pm 0.36$ )	43.0	58.0	49.92 ( $\pm 3.09$ )
<b>Лют.25</b>	4.5	7.3	6.22 ( $\pm 0.73$ )	50.0	73.0	57.89 ( $\pm 5.74$ )	6.8	11.9	8.90 ( $\pm 1.53$ )	40.0	67.0	53.44 ( $\pm 8.46$ )

Таблиця 2. Показники описової статистики значень температури і відносної вологості в приміщеннях НБК-ОУ на відмітці  $\approx 43.000$  (період спостережень 01.03.24 – 28.02.25 рр.)

Дата	сходи 059/2 - T°C & Rh%						відм. +43.0 - T°C & Rh%					
	T°C			Rh %			T°C			Rh %		
	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Бер.24</b>	9.7	11.9	10.27 ( $\pm 0.34$ )	50.0	66.0	57.11 ( $\pm 4.37$ )	9.7	12.0	10.33 ( $\pm 0.46$ )	47.0	67.0	57.14 ( $\pm 4.97$ )
<b>Кві.24</b>	11.5	12.4	11.87 ( $\pm 0.28$ )	66.0	69.0	67.14 ( $\pm 0.78$ )	12.0	13.1	12.57 ( $\pm 0.37$ )	61.0	68.0	64.07 ( $\pm 2.28$ )
<b>*Тра.24</b>			16.10			67.22			16.57			64.66
<b>Чер.24</b>	19.0	21.8	20.35 ( $\pm 0.64$ )	63.0	72.0	67.30 ( $\pm 2.26$ )	19.3	22.5	20.56 ( $\pm 0.73$ )	60.0	75.	65.25 ( $\pm 0.28$ )
<b>Лип.24</b>	21.8	24.3	23.30 ( $\pm 0.74$ )	59.0	69.0	64.06 ( $\pm 2.39$ )	22.4	24.8	23.70 ( $\pm 0.78$ )	53.0	66.0	59.83 ( $\pm 2.84$ )

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Сер.24</b>	23.5	25.1	24.02 (±0.56)	53.0	60.0	56.56 (±1.58)	23.5	25.1	24.24 (±0.5)	48.0	57.0	52.72 (±1.28)
<b>Вер.24</b>	22.6	25.3	24.22 ±0.64	46	54	50.41 ±2.15	22.7	25.1	24.00 ±0.65	43	54	48.52 ±2.71
<b>Жов.24</b>	19.1	22.6	19.66 (±0.66)	44.0	50.	46.61 (±1.6)	18.4	22.6	18.82 (±0.68)	42.0	51.0	44.90 (±1.88)
<b>Лис.24</b>	14.5	19.1	16.27 (±1.34)	40.0	50.	42.93 (±2.17)	13.5	18.5	15.32 (±1.44)	41.0	50.0	44.81 (±2.09)
<b>Гру.24</b>	11.7	14.5	12.75 (±0.84)	36.0	49.0	44.94 (±3.11)	11.5	13.6	12.29 (±0.61)	40.0	52.0	46.35 (±2.88)
<b>Січ.25</b>	11.1	11.7	11.40 (±0.20)	42.0	55.0	48.52 (±2.7)	10.7	11.9	11.23 (±0.36)	43.0	58.0	49.92 (±3.09)
<b>Лют.25</b>	6.6	11.5	9.42 (±1.63)	40.0	56.0	45.12 (±4.0)	6.8	11.8	8.90 (±1.50)	40.0	67.0	53.2 (±8.41)

Таблиця 3. Показники описової статистики значень температури і відносної вологості в приміщеннях НБК-ОУ на відмітці  $\approx 9,000$  (період спостережень 01.03.24 – 28.02.25 рр.)

Дата	прим. 304/3- T°C			прим. 318/2 - Rh% & T°C					
	T °C			Rh %			T°C		
	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.
<b>Бер.24</b>	15.3	15.7	15.43 (±0.12)	50.7	67.0	59.09 (±4.39)	10.8	11.4	11.17 (±0.16)
<b>Кві.24</b>	15.3	15.7	15.50 (±0.13)	67.2	78.5	72.88 (±3.29)	11.4	12.2	11.86 (±0.20)
<b>Тра.24</b>	15.7	16.3	15.93 (±0.15)	66.9	80.4	74.69 (±3.70)	12.1	13.8	12.49 (±0.44)
<b>Чер.24</b>	16.2	17.5	16.87 (±0.36)	77.9	91.4	86.81 (±3.55)	13.8	15.1	14.61 (±0.35)
<b>Лип.24</b>	17.5	18.8	18.15 (±0.40)	90.4	90.4	96.20 (±1.95)	14.9	16.3	15.53 (±0.42)
<b>Сер.24</b>	18.8	19.9	19.40 (±0.30)	93.0	99.4	96.36 (±1.67)	16.2	17.3	16.75 (±0.29)
<b>Вер.24</b>	19.9	20.7	20.30 (±0.22)	78.8	93.0	85.19 (±4.38)	17.2	19.1	17.82 (±0.54)
<b>Жов.24</b>	20.6	21.0	20.90 (±0.11)	54.3	79.0	66.53 (±10.4)	19.1	19.6	19.35 (±0.10)
<b>Лис.24</b>	20.4	21.0	20.74 (±0.18)	39.4	55.8	44.45 (±3.36)	17.1	21.3	18.28 (±0.61)
<b>Гру.24</b>	18.8	20.4	19.59 (±0.47)	36.9	47.3	42.92 (±2.37)	14.2	17.8	15.52 (±0.32)
<b>Січ.25</b>	17.4	18.8	18.06 (±0.39)	41.4	52.7	47.49 (±2.47)	13.1	14.4	13.80 (±0.36)
<b>Лют.25</b>	16.1	17.5	16.69 (±0.35)	36.3	52.8	41.91 (±3.84)	11.7	14.4	12.64 (±0.65)

Таблиця 4. Показники описової статистики значень температури і відносної вологості в приміщеннях НБК-ОУ на відмітці  $\approx 6.000$  (період спостережень 01.03.24 – 28.02.25 рр.)

Дата	прим. 304/3- T°C			прим. 318/2 - Rh% & T°C					
	T °C			Rh %			T °C		
	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.
<b>Бер.24</b>	14.1	14.6	14.30 ( $\pm 0.11$ )	47.6	67.8	56.58 ( $\pm 5.43$ )	12.1	14.2	12.21 ( $\pm 0.11$ )
<b>Кві.24</b>	13.9	14.3	13.96 ( $\pm 0.10$ )	61.7	69.8	66.97 ( $\pm 1.50$ )	12.5	13.3	13.14 ( $\pm 0.21$ )
<b>Тра.24</b>	13.8	14.0	13.91 ( $\pm 0.04$ )	67.7	76.9	70.27 ( $\pm 3.05$ )	13.3	13.5	13.37 ( $\pm 0.05$ )
<b>Чер.24</b>	14.0	14.3	14.15 ( $\pm 0.10$ )	77.0	93.3	88.15 ( $\pm 4.17$ )	13.4	14.0	13.70 ( $\pm 0.15$ )
<b>Лип.24</b>	14.3	15.0	14.69 ( $\pm 0.21$ )	92.9	97.8	95.82 ( $\pm 1.16$ )	14.0	14.8	14.32 ( $\pm 0.25$ )
<b>Сер.24</b>	15.0	15.4	15.18 ( $\pm 0.14$ )	96.3	98.5	97.85 ( $\pm 0.30$ )	14.6	15.3	14.94 ( $\pm 0.17$ )
<b>Вер.24</b>	15.4	15.7	15.61 ( $\pm 0.08$ )	94.0	98.4	95.74 ( $\pm 1.10$ )	15.2	15.6	15.41 ( $\pm 0.08$ )
<b>Жов.24</b>	15.7	15.8	15.79 ( $\pm 0.02$ )	73.5	95.3	86.68 ( $\pm 8.83$ )	15.4	15.7	15.54 ( $\pm 0.65$ )
<b>Лис.24</b>	15.8	16.0	15.86 ( $\pm 0.05$ )	47.7	74.2	57.06 ( $\pm 6.83$ )	15.5	15.9	15.76 ( $\pm 0.08$ )
<b>Гру.24</b>	15.8	16.0	15.88 ( $\pm 0.05$ )	40.6	50.1	46.28 ( $\pm 1.97$ )	14.5	15.4	15.00 ( $\pm 0.32$ )
<b>Січ.25</b>	15.4	15.8	15.62 ( $\pm 0.12$ )	42.4	55.4	47.18 ( $\pm 2.56$ )	13.7	14.5	14.01 ( $\pm 0.25$ )
<b>Лют.25</b>	14.9	15.4	15.22 ( $\pm 0.15$ )	37.5	57.4	46.48 ( $\pm 4.62$ )	11.7	14.2	12.89 ( $\pm 0.15$ )

Таблиця 5. Показники описової статистики значень температури і відносної вологості в приміщеннях НБК-ОУ на відмітці  $\approx 0.00$  (період спостережень 01.03.24 – 28.02.25 рр.)

Дата	прим. 012/7- T°C			прим.006/2 - Rh% & T°C					
	T °C			Rh %			T °C		
	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.	мін	макс	срд.-міс.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Бер.24</b>	12.4	12.5	12.42 ( $\pm 0.04$ )	47.8	66.6	56.27 ( $\pm 4.96$ )	11.3	11.5	11.45 ( $\pm 0.05$ )
<b>Кві.24</b>	12.5	12.8	12.67 ( $\pm 0.09$ )	66.7	76.5	73.91 ( $\pm 1.75$ )	11.5	12.0	11.78 ( $\pm 0.14$ )
<b>Тра.24</b>	12.8	12.9	12.83 ( $\pm 0.04$ )	73.4	81.6	77.13 ( $\pm 2.01$ )	11.9	12.2	12.06 ( $\pm 0.07$ )
<b>Чер.24</b>	12.9	13.2	13.06 ( $\pm 0.09$ )	81.6	95.2	89.83 ( $\pm 3.55$ )	12.2	12.6	12.37 ( $\pm 0.11$ )
<b>Лип.24</b>	13.2	13.5	13.33 ( $\pm 0.09$ )	89.9	96.6	97.47 ( $\pm 1.42$ )	12.5	13.8	12.73 ( $\pm 0.12$ )

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Сер.24</b>	13.5	13.7	13.60 (±0.08)	97.9	100.0	99.81 (±0.36)	12.9	13.3	13.10 (±0.12)
<b>Вер.24</b>	12.3	13.8	12.79 (±0.30)	98.4	100.0	100.00 (±0.06)	13.3	14.1	13.45 (±0.09)
<b>Жов.24</b>	12.4	14.0	13.35 (±0.59)	80.4	100.0	91.98 (±8.31)	13.6	13.9	13.72 (±0.10)
<b>Лис.24</b>	13.9	14.2	14.13 (±0.07)	50.1	82.6	62.13 (±8.81)	13.8	14.4	14.18 (±0.07)
<b>Гру.24</b>	13.9	14.2	14.08 (±0.10)	40.7	52.4	47.48 (±2.48)	13.5	16.6	13.91 (±0.28)
<b>Січ.25</b>	13.5	13.9	13.72 (±0.11)	41.8	56.3	48.40 (±2.90)	12.8	14.3	13.08 (±0.22)
<b>Лют.25</b>	12.6	13.6	13.16 (±0.28)	38.5	56.7	47.70 (±4.69)	10.9	14.4	12.06 (±0.61)

Таблиця 6. Порівняльна таблиця.

Порівняльні періоди	<b>прим. 6004</b>		<b>легка покрівля</b>	
	<b>Т°С</b>	<b>Rh %</b>	<b>Т°С</b>	<b>Rh %</b>
2024 - 2025	14,75	61,64	17,03	52,87
2023 - 2024	13,26	66,24	16,19	51,70
(2024-25) – (2023-25)	1,49	-4,60	0,84	1,17
Порівняльні періоди	<b>сходи 059/2</b>		<b>відм. +43.0</b>	
	<b>Т°С</b>	<b>Rh %</b>	<b>Т°С</b>	<b>Rh %</b>
2024 - 2025	16,64	54,83	16,54	54,28
2023 - 2024	15,85	54,21	15,78	53,84
(2024-25) – (2023-25)	0,79	0,62	0,76	0,44
Порівняльні періоди	<b>прим. 318/2</b>		<b>прим. 304/3</b>	
	<b>Т°С</b>	<b>Rh %</b>	<b>Т°С</b>	
2024 - 2025	14,99	67,88	18,13	
2023 - 2024	14,34	66,82	17,56	
(2024-25) – (2023-25)	0,65	1,06	0,57	
Порівняльні періоди	<b>прим. 207/4</b>		<b>прим. 210/7</b>	
	<b>Т°С</b>	<b>Rh %</b>	<b>Т°С</b>	
2024 - 2025	14,19	71,26	15,01	
2023 - 2024	13,56	69,24	14,70	
(2024-25) – (2023-25)	0,63	2,02	0,31	
Порівняльні періоди	<b>прим. 006/4</b>		<b>прим. 012/7</b>	
	<b>Т°С</b>	<b>Rh %</b>	<b>Т°С</b>	
2024 - 2025	12,73	74,34	13,35	
2023 - 2024	12,51	71,11	13,09	
(2024-25) – (2023-25)	0,23	3,23	0,26	

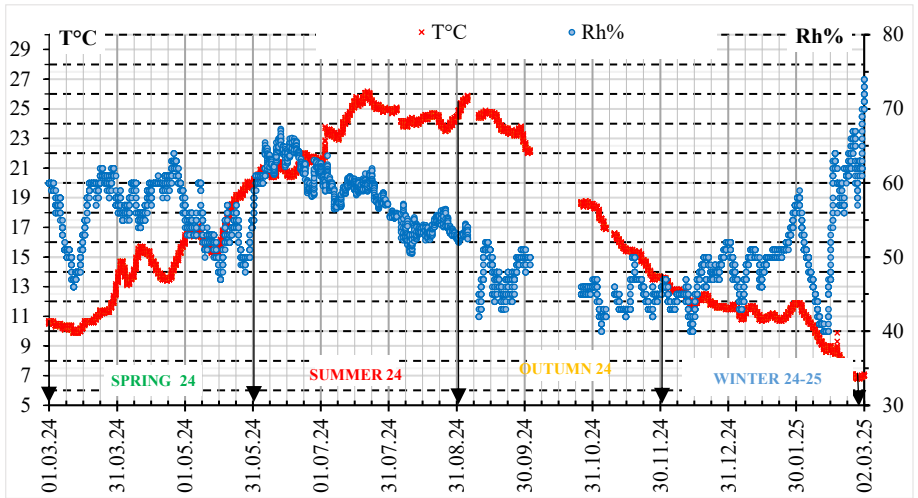


Рис. 5. Динаміка T°C і Rh% на легкій покрівлі ОУ на відм. 67.000

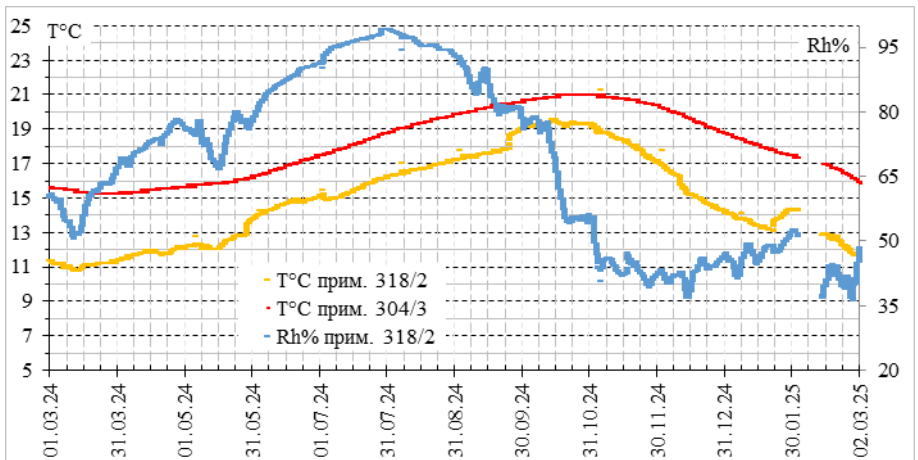


Рис. 6. Динаміка T°C і Rh% приміщеннях 318/2 і 304/3 на відм. 9.000

Порівняння середніх значень T°C і Rh% за період 2024-25 (12 місяців) з попереднім аналогічним періодом 2023-24 (12 місяців) показує, що середні значення T°C і Rh% в період 2024-25 років практично не змінилися (див. табл. 6).

Динаміка температурного поля всередині комплексу НБК-ОУ відповідає сезону і корелює з температурою зовнішнього середовища та її добовими коливаннями, динаміка Rh% аналогічна.

Якщо проаналізувати графіки (рис. 4 - 5), то можна побачити, що екстремуми (мін., макс.) на відмітках 0,00-9,00 зсуваються по відношенню до відміток 43,00-67,00 на 1-1,5 місяці, що пов'язано з ефектом «підвалу», де відчувається значна теплова інерція (термін «інерція» не має прямого

відношення до застосовуваного в механіці), яка залежить від теплопровідності та об'ємної теплоємності матеріалів.

### **Висновки.**

Динаміка температурного поля всередині НБК-ОУ в основному залежить від температури зовнішнього середовища та його сезонних коливань, незначний вплив вносять обігрівачі в зимовий сезон, а також температура скупчень ПВМ.

Середня температура в приміщеннях за період березень 2024 – лютий 2025, в яких проводились вимірювання, знаходилась межах  $15,34 \pm 3,43^\circ\text{C}$  з ймовірністю 0,954, коефіцієнт варіації 11,18%, що характеризує мінливість як середню, стандартне відхилення від  $0,58^\circ\text{C}$  на нижніх відмітках до  $6,38^\circ\text{C}$  на верхніх.

В приміщеннях, в яких присутні ПВМ (012/7, 210/7, 304/3), температура на  $1,5-2,0^\circ\text{C}$  і більше вища, ніж в сусідніх з ними де відсутні ПВМ, тепловий перегрів в приміщеннях не спостерігається, ПВМ мають не значні температури і охолоджуються природним шляхом.

На даний час теплова небезпека відсутня і може розглядатися лише при варіантах перетворення ОУ, при яких природні шляхи охолодження ПВМ будуть перекриті.

Відносна вологість повітря на відмітках 43.000-67.000 не перевищувала 86%, мінімальна не менше 36%, на нижніх відмітках 0.000-9.000 досягала 100% в літній сезон, мінімальне значення 36,3%.

Ймовірність досягнення точки роси (крапель) висока на відмітках 9.00 і нижче, коли відносна вологість досягає 90% і вище.

Середні значення  $T^\circ\text{C}$  і  $Rh\%$  в період 2024-25 років практично не змінилися в порівнянні з аналогічним попереднім періодом 2023-24 р.

### **Використана література**

1. Оцінка зміни динаміки випаровування-конденсації вологи в ОУ під НБК, поведінка ПММ у умовах, що змінилися, та оцінка зміни пилоутворення: Звіт, заключний, договір № 374/17 / ПІБ АЕС НАН України. ДР № 0117U002963. - Чорнобиль, 2017. – 183 с.

2. Програма моніторингу паливовмісних матеріалів (ПВМ) ОУ (ядерна та радіаційна безпека ОУ). Розділ 6 / ДСП «Чорнобильська АЕС», ТВ інв. № 04, Чорнобиль, 2018. – 72 с.

3. Manual Meteorological Station PCE-FWS-20. Version 2.1

4. DLT-11-Pt. Логер температури та відносної вологості в комплекті з ТСП-1-6. [www.ao-tera.com.ua](http://www.ao-tera.com.ua)

5. RC-4HC Quick Start Guide. Elitech Technology. Inc.

6. Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта «Укриття» (моніторинг паливовмісних матеріалів): Звіт, етап 2 за договором 4Н-ВЯРБ від 07.08 2024 р./ПІБ АЕМ НАН України. ГР № 0124U003991. - Чорнобиль, 2024. – 212 с.

# ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНОГО МЕТАЛУ, ДЕЗАКТИВОВАНОГО МЕТОДОМ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПЛАВКИ

*Рак Павло Вікторович, Балакін Валерій Федорович,  
Машиністов Віктор Єгорович*

Український Державний Університет Науки та Технологій, місто Дніпро,  
office@ust.edu.ua

Аспірант: Рак Павло Вікторович

Науковий керівник: д.т.н., професор Балакін Валерій Федорович

**Annotation:** The purpose of this scientific work concludes in studying the effects of corrosion on the final state and change in the physical and mechanical properties of steels used as structural materials of components, equipment and structures of nuclear facilities during their operation, which can be decontaminated by the improved method of metallurgical melting.

The result of studying the metal samples of NPP's equipment and structures decontaminated by the method of metallurgical melting will be an engineering statement and certain recommendations based on the results of research, regarding the possible use and certain restrictions (or their absence) for the production of the metallurgical assortment, as well as further use in the production of goods, parts, equipment and structures according to the needs of national economy.

If the unexpected results will be raised or the scientific finding, news or discovery will take place during research process, then all aspects of such finding (news) will be properly noted.

Separately, during the laboratory metallurgical melting, a change (decrease) in the levels of radioactive contamination of samples of metal will be noted to confirm the possibility of decontamination of certain types of radioactive contaminated metal without prior chemical or mechanical decontamination that will make this decontamination technology more economically attractive compared to similar ones.

**Анотація:** Метою цієї наукової роботи є вивчення впливу корозії на кінцевий стан та зміну фізико-механічних властивостей сталей, використаних в якості конструкційних матеріалів компонентів, обладнання та конструкцій об'єктів ядерної енергетики в процесі її експлуатації, які можуть бути дезактивовані від радіоактивного забруднення методом металургійної плавки.

Підсумком дослідження зразків металів, які працювали в складі систем та конструкцій АЕС та опісля були дезактивовані методом металургійної плавки, буде інженерне твердження та рекомендації на підставі результатів досліджень, щодо можливого використання та певні обмеження (або їх відсутність) для виробництва металургійного сортаменту, а також подальшого використання у виробництві товарів, деталей, обладнання та конструкцій.

Додатково, під час проведення лабораторних металургійних плавок, будуть занотовані зміни (зменшення) рівнів радіоактивного забруднення зразків металу для підтвердження можливості дезактивації певних типів радіоактивно

забруднених металів без попередньої хімічної та механічної дезактивації, що зробить таку технологію дезактивації більш економічно привабливою в порівнянні з аналогічними.

Атомна енергетика має свої особливості в галузі матеріалознавства та конструкційних матеріалів, які необхідно приймати до уваги на всіх етапах життєвого циклу будь-якого ядерного об'єкта, зокрема, Атомних Електричних Станцій (АЕС). [1]

В процесі експлуатації АЕС невідворотно відбувається радіаційне опромінювання (забруднення) певної частини конструкційних матеріалів, використаних для виробництва технологічного обладнання та трубопроводів ядерної енергетичної установки (ЯЕУ) та компонентів і обладнання систем та конструкцій, які безпосередньо задіяні в процесах поводження з ядерним паливом та радіоактивними відходами (РАВ), що генеруються та накопичуються під час її експлуатації [2].

Проблема поводження з радіоактивно забрудненим металом (РЗМ) на майданчиках тимчасового зберігання на інфраструктурних об'єктах та на майданчиках АЕС сьогодні є надзвичайно актуальною темою, тому що такий захід потребує значних витрат на забезпечення технічних та організаційних умов для їх безпечного зберігання, а в умовах військових дій на території України і можливих військових впливах на тимчасові сховища, вони створюють додаткову загрозу здоров'ю людей та оточуючому середовищу. Таким чином, найскоріша ліквідація тимчасових сховищ РЗМ шляхом дезактивації цих металів з метою повернення їх частини в обіг для подальшого використання і відправлення певної частини РЗМ, дезактивація яких є неможливою чи недоцільною, на довгострокове зберігання в спеціально обладнані сховища є важливим аспектом забезпечення комплексної радіаційної безпеки ядерного об'єкта під час його експлуатації в умовах сьогодення.

З іншого боку, невідворотною стадією життєвого циклу ядерного об'єкта є етап його зняття з експлуатації, під час якого найголовнішими видами діяльності є демонтаж споруд та обладнання об'єкта, а також поводження з радіоактивними відходами, а, таким чином, й поводження з РЗМ. Враховуючи, що переважна більшість енергоблоків Українських АЕС вже відпрацювала свій проектний термін експлуатації і її подовження пов'язане зі значними обсягами модернізації з заміною обладнання, виробленого саме з металу, який отримав різні види та рівні радіоактивного забруднення під час експлуатації, поводження з ним і, зокрема, його дезактивація є вкрай важливою задачею задля запобігання його купчення на промислових майданчиках діючих АЕС.

Найбільш поширеними методами дезактивації металів є хімічні, механічні та термічні методи дезактивації металів, а також методи, засновані на електролізі та нанесенні на поверхні РЗМ захисного покриття. Вибір конкретного методу дезактивації залежить від типу радіоактивного забруднення, властивостей металу, доцільності його очищення, нормативних вимог діючого законодавства та доступності фінансових коштів на впровадження тої чи іншої технології.

В той же час необхідно пам'ятати, що забезпечення ядерної та радіаційної безпеки ядерного об'єкта на всіх етапах його експлуатації є безумовним пріоритетом

та обов'язком ядерного оператора згідно вимог законодавства. Таким чином, економічна доцільність при виборі методів дезактивації металів безумовно має бути врахована, але ж ефективність очищення металів задія збільшення частки обсягу, яким може бути повернуто для обмеженого чи вільного використання має бути збільшено настільки, наскільки це є технічно та економічно прийнятним для запобігання збільшення обсягу РАО, які потребують захоронення. [3]

Сама по собі дезактивація РЗМ методом металургійної плавки не є новітньою та використовується в світі з позитивними результатами. [4]

Відмінність технології, яку планується впровадити в Україні полягає у відсутності попередньої дезактивації РЗМ перед плавкою, що робить такий підхід значно більш економічно привабливим.

Технології дезактивації РЗМ методом металургійної плавки заснована на відмінності вільної енергії утворення оксидів металів або відмінності температур кипіння основного металу і радіонуклідів. Так як температура кипіння радіонуклідів, які створюють загальне забруднення є значно нижчою за температуру плавлення заліза, то при розплавленні заліза більша частина радіонуклідів випаровується, інша частина захоплюється шлаками, що знаходяться на поверхні розплаву, а залишки рівномірно розподіляються по об'єму переплавленого металу.

*Таблиця 1* – Температури плавлення та кипіння основних забруднюючих радіонуклідів

Матеріал	Т плавлення, °С	Т кипіння, °С
Цезій	28.44	670.8
Стронцій	777	1382
Плутоній	639.4	3232
Залізо	1538	2862

Таким чином, дезактивація металів АЕС та їх повернення у обіг використання для потреб ядерної галузі та економіки країни додатково створює основу для нових викликів перед наукою, а саме аналіз змін фізико-механічних властивостей дезактивованого металу, з метою виявлення механізмів його деградації під час експлуатації на АЕС під впливом таких шкідливих чинників, як іонізуюче випромінювання, високі температур, значні робочих навантажень, корозійно-ерозійні процеси. Цей аспект має бути перевірено для видачі обґрунтованих рекомендацій щодо можливого використання та певні обмеження (або їх відсутність) для виробництва металургійного сортаменту і подальшого використання в виробництві компонентів, обладнання та конструкцій за потребами економіки країни. Залежно від застосування того чи іншого металу аналізуються окремі властивості та їх комбінації.

Необхідно визначити наявність та ступінь деградації металів, яка відбувається в них, під час експлуатації на ядерному об'єкті (АЕС) під впливом таких шкідливих чинників, як іонізуюче випромінювання, високі температури, корозійно-ерозійні процеси, але, крім того, треба врахувати, що зразки металів для дослідження будуть отримані після дезактивації методом металургійної плавки при температурах понад 1500 °С, що також може мати певні впливи на кінцевий стан та фізико-механічні властивості отриманих злитків металу.

Саме тому важливо проаналізувати маючі місце сукупні процеси деградації та визначити кінцевий стан дезактивованих металів з метою виявлення змін їх фізико-механічних властивостей після дезактивації методом металургійної плавки.

Найбільший інтерес викликає вивчення кінцевого стану та змін фізико-механічних властивостей металів внаслідок корозійних процесів в них, з урахуванням того, що окремим фактором під час експлуатації АЕС, є радіаційне випромінювання, яке, внаслідок опромінення металу, прискорює процеси його корозії [5].

Різні види корозії по-різному впливають на механічні властивості матеріалів. Види корозії класифікують і залежно від характеру пошкодження корозійного матеріалу, як то загальна та місцева корозія, рівномірна чи не рівномірна, точкова чи міжкристалітна [6].

Серед інших видів корозії, які можуть бути виявлені в структурі зразків металу, що досліджується, особлива увага буде приділена явищу міжкристалітної корозії, яка виникає внаслідок накопичення газів у металах в процесі трансмутаційних реакцій при нейтронному опроміненні.

Серед причин виникнення міжкристалітної корозії є нагрівання металу при обробці тиском або зварюванні, а також тривала експлуатація обладнання при температурах вище 450 С.

З застосовуваних у енергетиці сталей, до міжкристалітної корозії схильні хромонікелеві, хромонікельмолібденові, хромонікельмарганцеві корозійностійкі сталі аустенітного, феритного, аустенітно-феритного та аустенітно-мартенситного класів, а також високолеговані нікельні сплави [7].

Основною відмінністю ЯЕУ є наявність потужних радіаційних полів, що викликають структурні зміни в обсязі матеріалу і на поверхні і, як наслідок цього, погіршення властивостей матеріалу, що опромінюється.

Властивості металів і сплавів істотно залежать від дефектів кристалічних решіток. Такі властивості металів, як здатність чинити опір механічним навантаженням, радіаційна стійкість, сумісність, пов'язані з властивостями точкових та лінійних дефектів кристалічних решіток.

Специфіка радіаційного впливу ядерного випромінювання ЯЕУ на пошкодження та зміну структури в обсязі матеріалу полягає у наявності швидких (понад 1 МеВ) нейтронів, які вибивають атоми твердого тіла налітаючою (бомбардуючою) частинкою.

Зміщення атомів супроводжується накопиченням у матеріалі дефектів: міждоузельних атомів та вакансій. Внаслідок різної рухливості дефектів, взаємодії їх між собою та з елементами структури конструкційні матеріали розпухають, зазнають радіаційно-прискореної повзучості та структурно-фазових змін [8].

Тому основними критеріями оцінки довговічності КМ ЯЕУ, є: радіаційне крихтіння, розпухання та радіаційна повзучість.

Лабораторне вивчення зразків металу, дезактивованого методом металургійної плавки, містить в собі два види досліджень: а) дослідження зразків переплавленого металу задля візуального виявлення ознак та наслідків процесів корозії в структурі виплавленого злитку металу; б) виконання

лабораторних випробувань (тестів) з метою встановлення поточних значень показників фізико-механічних властивостей виплавленого злитку металу.

Для встановлення візуальних ознак корозії планується застосувати щонайменше два з перерахованих нижче методів для перекриття та верифікації отриманих результатів: а) металографічний аналіз: цей метод включає мікроскопічний аналіз структури металу під світловим чи електронним мікроскопом. Корозія може призводити до змін у мікроструктурі, таких, як поява пор, тріщин, видозміни зерен, а також змін структури на межі зерен, тощо. Металографічний аналіз може виявити пухирчасті області, вузлові дефекти та інші ознаки; б) електронна мікроскопія з розсіюванням енергії рентгенівських променів (EDX): Цей метод дозволяє вивчити хімічний склад міжкристалітних меж, що може вказати на наявність міжкристалітної корозії; в) електрохімічна мікроскопія: деякі електрохімічні методи, такі як сканувальна електрохімічна мікроскопія (SECM), можуть допомогти вивчити локальні корозійні процеси на межах зерен.

Результати візуального вивчення будуть включати в себе опис спостережень та висновки, які можуть бути зроблені на основі візуальних даних щодо оцінки ступеня пошкодження металу.

Для встановлення поточних значень показників фізико-механічних зразків металу, будуть проведені лабораторні випробування на розтяг, стиск, згин та ударну в'язкість.

Підсумком дослідження зразків металів, які працювали в складі систем та конструкцій АЕС, та після були дезактивовані методом металургійної плавки, буде інженерне твердження та певні рекомендації на підставі результатів досліджень, щодо можливого використання та певні обмеження (або їх відсутність) для виробництва металургійного сортаменту, а також подальшого використання в виробництві товарів, деталей, обладнання та конструкцій.

#### **Список посилань:**

1. Широков С.В. Ядерні енергетичні реактори: Навчальний посібник- Київ : НТУУ «КПІ», 1997- 279 с.
2. Бекман, І. Н. Ядерні технології: підручник для вузів / І. Н. Бекман. Видавництво Юрайт, 2017-404 с. ISBN – 978-5-534-00418-2.
3. Радіоактивний металобрухт: практика та економіка звернення. <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=94>
4. Melting Decontamination for Radioactive Metal Waste. KNF-WASTE-01. <https://www.knfc.co.kr/UploadFiles/down/eng-KNF-WASTE-01.pdf>
5. Безкоровайний, Н.М. Конструкційні матеріали ядерних реакторів: Підручник для вузів/Н.М. Безкоровайний, Б.А.Калін, П.А. Платонов, І.І.Чернов. – М.: Вища школа, 1995. - 704 с.
6. Тутнов А.А. Радіаційні ефекти зміни механічних властивостей конструкційних матеріалів та методи їх дослідження. Київ. Думка. 1977. 78 с.
7. Овчинніков І.І., Овчинніков І.Г., Богіна М.Ю. «Вплив радіаційних середовищ на механічні характеристики матеріалів та поведінку конструкцій», Інтернет-журнал «НАУКОВОВЕДЕННЯ»
8. Паршин, А.М. Структура, міцність та радіаційна ушкоджувальність корозійностійких сталей та сплавів / О.М. Паршин. - Металургія, 1988. - 656 с.

# APPLICATION OF INNOVATIVE BINDERS FOR CONDITIONING OF BORON-CONTAINING LRW

*Alla Rozko \**, *Yuriy Fedorenko \*\**, *Boris Zlobenko \*\**

\* Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine

\*\* State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine"

Radioactive waste is diverse and covers various radionuclides, half-lives, activity concentrations, volumes, and physical and chemical properties. Because of this diversity of composition, the selection of processes to treat and condition the waste is quite complex and depends on the activity level, the type (form and characteristics) of the waste, and the overall waste management strategy.

The technologies and methods for processing and conditioning are well defined for the most common waste streams. However, some problematic waste streams still do not have optimised treatment routes. It is known that the most common method for conditioning LRW is their cementation. Most often, Portland cement with a small admixture of bentonite clay is used. The resulting compounds are characterised by high strength and meet the requirements for cemented waste. Currently, the search for a replacement for Portland cement is gradually expanding. This is because the production of 1 ton of cement emits more than 800 kg of CO<sub>2</sub> into the atmosphere, contributing to global warming. In addition, in conditions of a combination of Portland cement with boron-containing salt melt, there is uncertainty about maintaining sufficient strength of Portland cement compounds for a long time.

As a new treatment method, the technology of cementing boron-containing LRW into mineral matrices using geopolymer binders based on blast furnace slags is considered. Such mineral matrices have increased chemical resistance and can increase mechanical strength over time. The technology is much cheaper due to the low cost of Blast Furnace Slag (BFS). Some works show the possible conditions of cementing LRW at an ordinary temperature [1, 2] with Cement II type, in which alkalis are added to the composition [3].

For the composite binder, the amount of Portland cement in the mixture was 50%, and another 50% was Granulated BFS, which had the following chemical composition (Table 1):

*Table 1.* Chemical composition of the BFS of Kamensk Metallurgical Plant

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	H <sub>2</sub> S	TiO <sub>2</sub>	Loss on ignition
41,6	4,9	0,42	45,6	3,84	0,1	1,1	0,72

The ratio between Portland cement and slag can differ, but the geopolymer composition binder only becomes apparent when combined with alkaline activation.

An essential point in conditioning boron-containing LRW with composite binders is the temperature of the process itself. It has been established that at a

temperature of 55°C - 60°C, the imitate of the liquid salt melt is uniformly mixed with the composite binder powder and forms a paste-like mixture with an initial plastic strength of about 2 kPa - 3 kPa. Such a mixture can contain (36 ÷ 38) % of the simulant and has sufficient plasticity to fill out the corresponding forms for subsequent setting and a gradual increase in strength. Compressive strength of the mix composite, after 7 days - 24.9 MPa, and 28 days - 44.7 MPa. Start setting the mix at 130 min.

Experimental studies of a series of samples showed that one sample, in which a composite binder with bentonite was used as a component, had a strength of 13.5 MPa and a porosity of 2.4%. Adding bentonite clay instead of zeolite powder increased porosity (11.1%), and adding metakaolin reduced the strength to 12 MPa and increased porosity to 24.5%.

It has been shown that the composite binder can be used for conditioning boron-containing LRW at a temperature of (55-60) °C in an amount by weight of up to 35% of the boron-containing salt melt simulant.

### Literature

1. Munzer K. Tverdenië vyazhushchikh i betonov na osnove shchelochnykh shlakoportlandtsementov Avtoref. dis. kand. tekhn. N. – K, 1989
2. Glukhovskiy V.D. Betony proshlogo, nastoyashchego i budushchego tez. dokl. 3 vsesoyuznoy nauchnoy konfer., - Kiyev. – 1989, t 1, str 11
3. Davraz, M., 2015. The effect of boron compounds on cement hydration and the controllability of this effect. Acta Phys Pol A 128 (2-B), B26–B33. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.B-26>.

## НОВИЙ ВІТЧИЗНЯНИЙ МАТЕРІАЛ ДЛЯ РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ – ФІБРОБЕТОН З МОДИФІКОВАНИМ БАЗАЛЬТОВИМ ВОЛОКНОМ

*Середа С.В.<sup>1</sup>, Голюк М.І.<sup>1</sup>, Дідук І.І. (к.т.н.)<sup>2</sup>, Чувашиов Ю.М. (к.х.н.)<sup>2</sup>,  
Носовський А.В. (академік)<sup>1</sup>, Гулік В.І. (к.т.н.)<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, вул. Кірова, 36а, 07270, м. Чорнобиль, Київська обл., Україна.

<sup>2</sup> Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М Францевича НАН України, вул. Омеляна Пріцака, 3, 03142, м. Київ, Україна.  
Контактний e-mail: serhii.sereda@ispnpp.kiev.ua

**Abstract:** The ECOSCREEN project is being implemented within the framework of the international Horizon 2020 program (EURIZON) with the support of the Ukrainian Science and Technology Center (USTC). The research also involves international partners from leading scientific institutions in the Baltic region: the Lithuanian Energy Institute (Kaunas), Riga Technical University (Riga), the University of Tartu (Tartu), and the Arctic University of Norway (Narvik). The project is carried out by a team of scientists from the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Frantsevich

Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine.

The aim of the project is to develop a new, efficient material for radiation protection: fiber-reinforced concrete with modified basalt fiber. The core idea is to add neutron-absorbing additives to basalt fiber and use it as a reinforcing component in concrete. This type of fiber not only increases the strength and durability of the material but also significantly improves its ability to shield against neutron and gamma radiation. The research includes both the development of the fiber itself and modeling its effectiveness using Monte Carlo simulation codes. The new material is expected to have practical applications at nuclear power plants, in storage facilities for radioactive sources and waste, and to contribute to greater public acceptance of nuclear technologies.

**Ключові слова:** модифіковане базальтове волокно, базальтова фібра, Монте Карло моделювання, радіаційний захист.

Забезпечення ефективного захисту від іонізуючого випромінювання є дуже важливою складовою безпечної експлуатації об'єктів атомної енергетики [1]. Одним із перспективних напрямків удосконалення радіаційного захисту є використання композитних матеріалів з модифікованими функціональними властивостями [2].

Базальтове волокно (фібра) — це матеріал, який виготовляється з природного базальтового щербену шляхом його плавлення. Потім розплавлений базальт витягується в тонку нитку, яку нарізають і додають до бетону. Така фібра добре зарекомендувала себе у будівництві — вона підвищує міцність та тріщиностійкість бетону [3]. Ми запропонували вдосконалити цей матеріал, додаючи до базальтового розплаву оксиди бору, гадолінію, гафнію або ітрію. У результаті утворюється нове волокно з унікальними властивостями. Після подрібнення його можна додавати до бетонних сумішей як модифіковану фібру, яка не тільки покращує фізичні характеристики бетону, а й забезпечує радіаційний захист [4].

У лабораторіях Інституту проблем матеріалознавства були виготовлені зразки таких волокон, зокрема з гадолінію, гафнію та ітрію — були отримані вперше у світі. Усі зразки волокон пройшли детальне дослідження на хімічний склад та мікроструктура за допомогою електронних мікроскопів.

Для оцінки ефективності нового матеріалу проводяться чисельні моделювання та розрахунки за допомогою Монте-Карло кодів Serpent, MCNP та OpenMC.

На першому етапі було змодельовано просту геометричну модель з шаром фібробетону, розміщеним перед джерелом випромінювання. На Рис. 1 представлена схема простої моделі.

Результати показали, що додавання модифікованого волокна знижує інтенсивність теплового піку нейтронів. Найбільш виражений ефект спостерігався при застосуванні фібри з оксидами гадолінію та ітрію. Однак, у випадку з гадолінієвою фіброю зафіксовано збільшення вторинного гамма-

випромінення, що потребує додаткового аналізу та буде враховуватись при розробці кінцевого продукту.

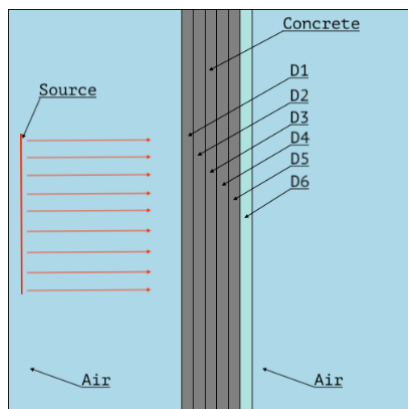


Рис. 1. Схема простої моделі для Монте-Карло моделювання

На другому етапі досліджень було побудовано більш реалістичні моделі контейнерів типу Hi-Storm 190 (для зберігання відпрацьованого ядерного палива з реакторів ВВЕР-1000) та Constor (для РБМК-1500). Усі моделі реалізовані в кодах Serpent та MCNP. Результати підтвердили зменшення потоків нейтронів при використанні модифікованого фібробетону як частини захисної оболонки.

Окрім того, в рамках іншого проекту — ACES — моделюється повномасштабна структура реактора ВВЕР-1000 з біологічним захистом, де планується заміна звичайного бетону на фібробетон з модифікованим волокном. Паралельно ведеться робота над моделюванням захисту від активованої води в термоядерному реакторі DEMO.

Модифіковане базальтоне волокно з додаванням оксидів елементів з високим перерізом поглинання нейтронів показало перспективні результати як складова фібробетону для радіаційного захисту. Комбіноване застосування волокон різного складу дозволяє досягти гнучкого керування захисними властивостями матеріалу. Подальші дослідження будуть зосереджені на оптимізації складу фібри та оцінці довготривалої радіаційної стійкості матеріалу в реальних умовах експлуатації.

Розробка нового типу бетону з модифікованим базальтовим волокном має всі шанси стати важливою технологією для забезпечення безпеки в ядерній енергетиці. Команда вже отримала перші позитивні результати, які підтверджують ефективність цього підходу. Всі напрацювання активно публікуються в міжнародних виданнях, що сприяє підвищенню впізнаваності української науки на світовій арені [4].

У найближчому майбутньому планується масштабування досліджень, подальше вдосконалення складів фібри та, можливо, практичне впровадження матеріалу в об'єктах енергетичної інфраструктури України та Європи.

### Список літератури:

- [1] A. Voß, “Energy in a sustainable development perspective,” in *Earth System Science in the Anthropocene*, Springer, 2006, pp. 153–166.
- [2] S.-J. Jeon and B.-M. Jin, “Improvement of impact-resistance of a nuclear containment building using fiber reinforced concrete,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 304, pp. 139–150, 2016.
- [3] Y. Zheng, Y. Zhang, J. Zhuo, Y. Zhang, and C. Wan, “A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 359, p. 129360, 2022.
- [4] I. Romanenko et al., “New composite material based on heavy concrete reinforced by basalt-boron fiber for radioactive waste management,” *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*, vol. 5, p. 22, 2019.

## СТВОРЕННЯ НАУКОВО-ІНДУСТРІАЛЬНОГО ПАРКУ В ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ: ПЕРСПЕКТИВИ ТА ВИКЛИКИ ІННОВАЦІЙНОГО ВІДРОДЖЕННЯ

*Сидоренко Марія Андріївна*

Корпорація «Українські атомні прилади та системи», м. Київ,  
mas2103mas@gmail.com

**Abstract:** This article deeply analyzes the potential and challenges of creating a scientific and industrial park within the Chernobyl Exclusion Zone (ChEZ). It considers this endeavor not merely an economic project, but a strategic step to transform the legacy of a man-made catastrophe into a catalyst for Ukraine's innovative development. Particular attention is given to the rapid growth of renewable energy, the formation of a unique international scientific environment, and the exploration of the groundwork for establishing small modular reactor (SMR) technologies. Furthermore, it highlights the potential for utilizing large areas of the ChEZ for testing advanced demining complexes. The article integrates an analysis of existing infrastructure, the unique natural laboratories, and the economic stimulus for regional development, while thoroughly examining key challenges related to radiation safety, funding, investment attraction, and effective project management.

**Keywords:** Chernobyl Exclusion Zone, Scientific and Industrial Park, Renewable Energy, Small Modular Reactors (SMR), Demining Technologies, Radiation Safety, Innovation, International Cooperation

Чорнобильська зона відчуження, що колись була символом трагедії та екологічної катастрофи, нині постає перед нами як унікальна територія з колосальним, досі не повністю реалізованим потенціалом. Десятиліття після аварії, що призвела до утворення цієї зони, рівні радіації в багатьох її частинах значно знизилися, відкриваючи нові горизонти для переосмислення її ролі. Однією з найбільш перспективних ініціатив є створення науково-

індустріального парку – амбітного проєкту, що має на меті поєднати передові наукові дослідження з високотехнологічним виробництвом, використовуючи при цьому унікальні особливості та вже існуючу, хоч і потребує модернізації, інфраструктуру ЧЗВ.

Переваги такого стратегічного рішення є багатограними. По-перше, ЧЗВ є неперевершеною та унікальною природною лабораторією для досліджень в галузі радіаційної екології, радіохімії, біології, генетики, мутагенезу, а також вивчення довгострокових наслідків радіаційного впливу на екосистеми. Наявність реальних даних, що охоплюють десятиліття, дозволяє проводити унікальні експерименти та моніторинг, які є неможливими в інших умовах. Цей фактор здатний привабити провідні міжнародні наукові установи та дослідників, формуючи потужне міжнародне наукове середовище, що є рушійною силою інновацій. По-друге, зона вже має значну кількість інженерних споруд, дорожніх мереж, об'єктів енергопостачання та інших інфраструктурних елементів. Хоча вони потребують дезактивації та суттєвої модернізації, їхнє існування може значно знизити початкові капіталовкладення у створення парку, роблячи проєкт більш економічно привабливим. Наприклад, вже існуючі лінії електропередач та підстанції можуть бути адаптовані для потреб майбутніх об'єктів, а великі вільні площі є ідеальними для розміщення відновлювальних джерел енергії. [3,4]

Економічний стимул, що виникне від створення парку, є не менш значущим. Він не тільки забезпечить нові робочі місця для населення прилеглих регіонів, але й сприятиме залученню прямих інвестицій, розвитку супутніх послуг та інфраструктури, що може вивести ці території з економічної депресії. Це може створити цілий кластер пов'язаних виробництв та послуг, від логістики до наукового супроводу. Крім того, проєкт такого масштабу здатен суттєво зміцнити міжнародний імідж України, демонструючи здатність країни перетворювати виклики на унікальні можливості для інновацій та сталого розвитку.

Особливе місце в концепції науково-індустріального парку займає стрімкий розвиток відновлювальної енергетики. Величезні площі ЧЗВ, що характеризуються низькою щільністю населення та відсутністю сільськогосподарської діяльності, створюють ідеальні умови для будівництва масштабних сонячних та вітрових електростанцій. Окрему увагу треба приділити використанню ставка-охолоджувача та ґрунтових вод. За оцінками експертів, потенціал сонячної енергетики в ЧЗВ є одним з найвищих в Україні. Парк може стати не просто місцем виробництва "зеленої" енергії, а й центром розробки, тестування та виробництва компонентів для відновлювальних джерел, включаючи панелі, турбіни, системи зберігання енергії та інтелектуальні мережі. Це відповідає світовим тенденціям та стратегічним пріоритетам енергетичної безпеки. [2]

Ще одним перспективним напрямком є вивчення підґрунтя для започаткування технологій малих модульних реакторів (ММР). Хоча це питання вимагає надзвичайно ретельного та виваженого підходу з точки зору радіаційної безпеки та суспільного сприйняття, концепція ММР, що передбачає високий рівень безпеки та можливість поетапного розширення потужностей, може стати

цікавим для вивчення з точки зору майбутнього розвитку енергетики та наукових досліджень, а також залучити до роботи велику площу занедбаних земель. Початковим етапом має стати проведення геодезичного та сейсмічного аналізу. ЧЗВ, з її досвідом ядерної енергетики та існуючими об'єктами, може надати унікальний тестовий полігон для досліджень з їх дезактивації та екологічного відновлення, а також для відпрацювання технологій, пов'язаних з ММР, за умови дотримання найвищих стандартів безпеки та міжнародних регуляцій. Ця ідея потребує подальших глибоких наукових досліджень та обговорення з міжнародною спільнотою.

Оскільки значні території України нині забруднені мінами та вибухонебезпечними предметами, Чорнобильська зона відчуження може стати ідеальним полігоном для тестування новітніх комплексів розмінування, зокрема модульні рішення, що включають літаючі дрони різних типів та наземні роботизовані платформи, керовані єдиним програмним забезпеченням. Умови зони – це різноманітний ландшафт, різні типи ґрунтів та рослинності, а також можливість роботи в умовах, що не загрожують цивільному населенню. Це дозволить відпрацювати ефективність, швидкість та безпеку роботи сучасних технологій розмінування, які так необхідні для післявоєнного відновлення країни. Тестування тут може включати як дистанційно керовані машини, так і повністю автономні роботи, здатні розпізнавати та знешкоджувати вибухонебезпечні предмети, мінімізуючи ризики для людини.

Серед інших можливих напрямків спеціалізації парку слід виділити: розробку та виробництво обладнання для радіаційного контролю, систем моніторингу навколишнього середовища та засобів індивідуального захисту; дослідження та впровадження нових методів дезактивації ґрунтів, води та будівель, а також технологій переробки та зберігання радіоактивних відходів; дослідження впливу малих доз радіації на живі організми та розробку нових методів лікування радіаційних уражень, а також біологічні дослідження на унікальних зразках флори та фауни зони; вивчення вирощування радіостійких культур та технологій для безпечного сільського господарства на територіях з низьким рівнем забруднення, а також розробку та тестування автономних систем та роботів для роботи в небезпечних умовах. [1,5,6]

Проте, реалізація такого масштабного проекту пов'язана з низкою значних викликів. Радіаційна безпека є і залишатиметься першочерговим завданням. Необхідна ретельна оцінка радіаційної обстановки на кожному етапі, розробка та впровадження найсуворіших протоколів безпеки, постійний моніторинг та контроль, що вимагатиме значних інвестицій та постійного науково-військового супроводу. Фінансування та залучення інвестицій також є критично важливими. Необхідно розробити привабливі механізми стимулювання інвесторів, включаючи податкові пільги, державні гарантії безпеки та підтримку. Тут ключову роль відіграє формування відповідної законодавчої бази. Наприклад, існують ініціативи щодо створення спеціальних економічних зон та індустріальних парків в Україні, які могли б бути адаптовані для ЧЗВ, з урахуванням її специфіки. Важливо, щоб будь-які майбутні законопроекти, що стосуються ЧЗВ, чітко визначали правовий статус, механізми залучення

інвестицій, регулювання діяльності та стандарти безпеки, а також зберегли статус заповідника для збереження червонокнижних представників флори та фауни. Це може включати положення, подібні до тих, що обговорювалися в контексті "Закону України про індустріальні парки" або інших законодавчих актів щодо інвестиційної діяльності. [2]

Кадрова політика вимагатиме не лише залучення висококваліфікованих науковців та інженерів, але й створення привабливих умов праці, високого рівня безпеки та соціальних гарантій для них та їхніх родин. Суспільне сприйняття також відіграє значну роль. Перетворення Чорнобиля з місця катастрофи на осередок інновацій потребуватиме широкомасштабної інформаційної кампанії, яка б висвітлювала потенціал зони та її внесок у світову науку та технологічний розвиток. Нарешті, ефективне управління проектом, яке б об'єднало наукові, промислові та державні інтереси, є критично важливим для успіху.

На шляху до реалізації цього грандіозного проекту необхідна низка послідовних кроків. Створення міжвідомчої робочої групи за участю представників Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, Державного агентства України з управління зоною відчуження, Національної академії наук України, а також міжнародних експертів є першочерговим завданням. Розробка детального техніко-економічного обґрунтування (ТЕО), що включатиме оцінку радіаційної обстановки, аналіз існуючої інфраструктури, розрахунок необхідних інвестицій, бізнес-план та модель управління, є обов'язковою. Проведення міжнародного конкурсу проєктів для залучення провідних наукових та інженерних команд, а також активне залучення міжнародних організацій та країн-донорів до фінансування та експертної підтримки є ключовим для глобального успіху. Створення спеціальної економічної зони з пільговим податковим режимом та спрощеними процедурами для залучення інвестицій може стати визначальним фактором успіху.

Отже, створення науково-індустріального парку на території Чорнобильської зони відчуження є не просто амбітним, а стратегічно важливим проєктом для України. Він здатен трансформувати ЧЗВ з символу трагедії на центр світових інновацій, що спеціалізуватиметься на відновлювальній енергетиці, радіаційній безпеці, унікальних екологічних дослідженнях, а також відкриє перспективи для майбутнього вивчення та розробки прогресивних енергетичних технологій. Успішна реалізація цього проєкту вимагатиме консолідованих зусиль уряду, наукової спільноти, бізнесу та міжнародних партнерів, але його потенційні вигоди, як для України, так і для світової науки та екології, значно перевищують пов'язані з ним виклики. А також зміцнення міжнародного співробітництва та координації зусиль у справі вивчення, пом'якшення та мінімізації наслідків Чорнобильської катастрофи та спрямована на виконання Україною зобов'язань в рамках 1) Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (Закон України від 29.10.1996 р. № 435/96-ВР); 2) Паризької конвенційної угоди про зміну клімату (Закон України від 14.07.2016 р. № 1469-VIII); 3) Монреальського протоколу та змін до нього (Закон України від 02.11.2000 № 2083) та 4) Кігалійської поправки до Монреальського протоколу (проект Закону України перебуває на розгляді ВР України).

## Перелік використаних джерел

1. Про схвалення стратегії розвитку територій у зоні відчуження і зоні безумовного (обов'язкового) відселення на 2024-2032 роки.  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/49-2024-%D1%80#Text>.
2. Закон України про індустріальні парки.  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5018-17#Text>.
3. Стан радіаційного фону в місті Чорнобиль, Чорнобильської зони відчуження: моніторинг радіації онлайн - SaveEcoBot.  
<https://www.saveecobot.com/radiation/kyivska-oblast/chornobyl>.
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The International Chernobyl Project, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (1991)  
<https://www.iaea.org/publications/3756/the-international-chernobyl-project>.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Environmental Impact Assessment of the Drawdown of the Chernobyl NPP Cooling Pond as a Basis for Its Decommissioning and Remediation, IAEA-TECDOC-1886, IAEA, Vienna (2019)  
<https://www.iaea.org/publications/13595/environmental-impact-assessment-of-the-drawdown-of-the-chernobyl-npp-cooling-pond-as-a-basis-for-its-decommissioning-and-remediation>
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience, Radiological Assessment Reports Series No. 8, IAEA, Vienna (2006)  
<https://www.iaea.org/publications/7382/environmental-consequences-of-the-chernobyl-accident-and-their-remediation-twenty-years-of-experience>

## АНАЛІЗ ХІМІЧНОГО ТА ІЗОТОПНОГО СКЛАДУ СКИДНОГО ГАЗУ ПІД ЧАС ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ОПРОМІНЕНОГО ГРАФІТУ

<sup>1,2</sup>Сімейко К.В., <sup>3</sup>Лобач К.В., <sup>1</sup>Скоблик О.М., <sup>4</sup>Бондарьков М.Д.,  
<sup>1</sup>Дорошенко А.О., <sup>1</sup>Сабенін П.В.

<sup>1</sup>Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль, Київська обл., Україна, [k.simeiko@ispnpp.kiev.ua](mailto:k.simeiko@ispnpp.kiev.ua)

<sup>2</sup>Інститут газу НАН України, м. Київ, Україна, [k\\_simeyko@ukr.net](mailto:k_simeyko@ukr.net)

<sup>3</sup>Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків, Україна, [lobach0709@gmail.com](mailto:lobach0709@gmail.com)

<sup>4</sup>Чорнобильський центр з проблем ядерної безпеки, радіоактивних відходів та радіоекології, м. Славутич, Київська обл., Україна, [mbondarkov@chornobyl.net](mailto:mbondarkov@chornobyl.net)

**Анотація.** У роботі представлено результати міжінституційного дослідження, присвяченого аналізу складу скидного газу, що утворюється під час термічної обробки опроміненого графіту з ядерних установок. Запропонований метод аналізу дозволяє одночасно оцінювати, хімічний та ізотопний склад газоподібних продуктів, що утворюються під час термічної обробки. Розробка проходить на базі експериментальних досліджень із використанням чистого графіту,

з подальшим впровадженням прототипу лабораторної установки. Отримані дані мають стати основою для оптимізації стратегій поводження з опроміненим графітом, включаючи ідентифікацію та контроль радіонуклідів. Робота є актуальною у контексті виведення з експлуатації ядерних енергоблоків і зменшення обсягів твердих радіоактивних відходів.

Реакторний графіт становить одну з найбільших частин накопичених у світі твердих радіоактивних відходів, очевидно, що пошук способів поводження з таким графітом є актуальною науковою проблемою. На теперішній час у провідних наукових установах розглядаються два варіанти поводження з відпрацьованим опроміненим графітом (ВОГ): спалювання та ізоляція з подальшим захороненням [1].

Вибір методів та їх реалізація з поводженням ВОГ безпосередньо пов'язана з дослідженням його основних характеристик. Серед яких це ізотопний та хімічний склад графіту.

Авторами розроблені методи аналізу ізотопного та хімічного складу скидного газу під час термічної обробки графіту [2, 3, 4]. Саме їх поєднання в перспективі дозволяє одночасно визначати їх склад.

Попередня експериментальна апробація методів аналізу на чистому графіті надала необхідні науково та технічні дані для конструювання та випробування лабораторної установки для визначення радіоактивних ізотопів у опромінену графіті.

Отримані результати безумовно позитивно вплинуть на безпечне поводження з опроміненим графітом ядерних установок.

**Ключові слова:** опромінений графіт, ядерна установка, зольність, хімічний склад, ізотопний склад.

#### **Список посилань:**

1. Носовський А.В. Поводження з опроміненим графітом при знятті з експлуатації енергоблоків АЕС. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2007. № 3 (53). С. 12–19.

2. Патент України № 155177 Спосіб визначення зольності графіту / К.В. Сімейко, А.В. Носовський, В.О. Краснов, А.О. Синяговський, А.О. Дорошенко, С.В. Купріячук // Заявник та власник: Інститут проблем безпеки АЕС НАН України. № заявк. №u202303564, заявл. 24.07.2023, опубл. 24.01.2024, бюл. № 4.

3. Патент України № 156179 Спосіб визначення складу скидного газу при спалюванні графіту / К.В. Сімейко, А.В. Носовський, В.О. Краснов, А.О. Синяговський, А.О. Дорошенко, С.В. Купріячук // Заявник та власник: Інститут проблем безпеки АЕС НАН України. № заявк. u 2023 03564, заявл. 24.07.2023, опубл. 23.05.2024, бюл. № 21.

4. Патент України №157299. Спосіб визначення хімічного складу скидного газу при спалюванні графіту / К.В. Сімейко, А.В. Носовський, В.О. Краснов, А.О. Синяговський, А.О. Дорошенко, К.В. Лобач, П.В. Сабенін, Є.В. Малий // Заявник та власник: Інститут проблем безпеки АЕС НАН України. №заявк. №u202401594. заявл. 01.04.2024, опубл. 25.09.2024, бюл.№ 4.

# СУЧАСНІ ВИКЛИКИ ЩОДО ПОВОДЖЕННЯ З РЕАКТОРНИМ ГРАФІТОМ ПРИ ВИВЕДЕННІ АЕС З ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Сімейко К.В.<sup>1,2</sup>, Тежкаєв Є.Т.<sup>1</sup>, Дорман О.Ю.<sup>1</sup>, Хвалін Д.І.<sup>1</sup>, Ховавко О.І.<sup>2</sup>,  
Колодій І.В.<sup>3</sup>, Малий Є.В.<sup>4</sup>, Хоменко Д.О.<sup>1</sup>, Лобач К.В.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль, Київська обл.,  
Україна, k.simeiko@ispnpp.kiev.ua

<sup>2</sup>Інститут газу НАН України, м. Київ, Україна, k\_simeyko@ukr.net

<sup>3</sup>Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»,  
м. Харків, Україна, lobach0709@gmail.com

<sup>4</sup>Інститут ядерних досліджень НАН України, м. Київ, Україна,  
evgen.malyj@gmail.com

**Acknowledgments:** This scientific study is related to the project “7121” funded by the Science and Technology Center in Ukraine.

**Abstract.** This paper addresses the pressing issue of managing irradiated graphite generated during the operation of uranium-graphite nuclear reactors. The scale of dismantling graphite masonry is emphasized, particularly in the case of the Chernobyl NPP, where over 5,400 tons of highly radioactive graphite with a significant fire load was accumulated. The current state of disposal technologies is analyzed, revealing a lack of effective and safe solutions that adequately account for radioisotope hazards (particularly the presence of <sup>14</sup>C), environmental safety, and technical feasibility. The authors highlight the urgent need to develop new technological approaches that consider the reactor type, graphite characteristics, and operational and storage conditions. This study was carried out within the framework of Project “7121” with the support of the Science and Technology Center in Ukraine.

**Keywords:** irradiated graphite, graphite-moderated nuclear energy systems, high-power channel-type reactor (RBMK), gas-cooled reactors.

**Анотація.** У роботі розглядається актуальна проблема по поводженню з опроміненим графітом, що утворюється в результаті експлуатації уран-графітових ядерних реакторів. Підкреслюється масштабність завдання демонтажу графітової кладки, зокрема на прикладі Чорнобильської АЕС, де накопичено понад 5,4 тис. тон високорадіоактивного графіту із суттєвим пожежним навантаженням. Проаналізовано сучасний стан технологій утилізації та наголошено на відсутності ефективних і безпечних рішень, які враховують радіоізотопні ризики (зокрема наявність <sup>14</sup>C), екологічну безпеку та технічну реалізованість. Автори акцентують увагу на необхідності розробки нових технологічних підходів з урахуванням типу реактора, властивостей графіту та умов його експлуатації і зберігання. Роботу виконано в межах проекту «7121» за підтримки Science and Technology Center in Ukraine.

**Ключові слова:** опромінений графіт, ядерні енергетичні установки з графітовим сповільнювачем, реактор великої потужності каналний (РВПК), графіто-газові реактори.

Широке використання графіту в ядерних реакторах пояснюється його доступністю, задовільними сповільнючими властивостями та малим перетином захоплення нейтронів. У світовій практиці найбільш поширені реактори з графітовим сповільнювачем кількох типів: каналні водо-графітові з киплячою водою та з перегріванням пари; корпусні водо-водяні з некиплячою та киплячою водою; реактори з газовим охолодженням (в якості теплоносія використовується вуглекислий газ); високотемпературні реактори з газовим охолодженням (з гелієвим теплоносієм); реактори на швидких нейтронах із натрієвим теплоносієм; басейнові водо-водяні реактори [1].

На даний час ядерні енергетичні установки на Чорнобильській та Ігналінській АЕС (ядерні реактори типу РВПК-1000 та РВПК-1500, відповідно) проходять процедуру зняття з експлуатації. Наприклад, відповідно до [2] на Чорнобильській АЕС протягом наступних 40 років необхідно демонтувати понад 5,4 тис. тон відпрацьованого реакторного графіту.

Наразі у світовій практиці відсутні апробовані методи та технології щодо демонтажу графітової кладки ядерних установок і подальшого поводження з відпрацьованим опроміненим графітом.

При плануванні заходів щодо поводження з опроміненим графітом необхідно враховувати тип реактора, характеристики графіту, особливості його експлуатації та зберігання [3].

У випадку аварійних ситуацій або терористичного акту (можливість якого підтверджено влучанням безпілотного літального апарату російської федерації у Новий безпечний конфайнмент Чорнобильської АЕС) ці фактори можуть спричинити вибух і пожежу з горінням графіту, яку буде достатньо важко загасити.

Враховуючи вищезгадане, очевидно, що виклики стосовно поводження з відпрацьованим графітом ядерних енергетичних установок (у тому числі процес демонтажу) є важливими та актуальними.

#### **Список посилань:**

1. Воеводін В.М., Грибанов Ю.О., Гурін В.А., Гурін І.В., Гуйда В.В. Вуглець-графітові матеріали в ядерній енергетиці (Огляд). Питання атомної науки і техніки. 2015. №2(96). – С. 52-64.
2. Азаров С.И., Бабич Е.В. Возможные варианты утилизации отработанного реакторного графита при выводе энергоблоков ЧАЭС из эксплуатации. - Наукові та технічні аспекти міжнародного співробітництва в Чорнобилі. Зб. наукових статей, Вип. 3, К.: Вища школа, 2001, с. 219-231.
3. Носовський А. В. Поводження з опроміненим графітом при знятті з експлуатації енергоблоків АЕС. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2007. № 3 (53). С. 12–19.

# ДИНАМІКА ЗМІН ПОВІТРООБМІНУ НБК З ОТОЧУЮЧИМ СЕРЕДОВИЩЕМ ПІД ВПЛИВОМ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ І ЧАСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Скляренко Дмитро, Круковський Григорій, Дядюшко Євгеній, Старовіт Іван*

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а,  
Ел. адреса: [kruk\\_2@ukr.net](mailto:kruk_2@ukr.net)

**Annotation.** The paper is devoted to modeling the dynamics of changes in the areas of air leaks through the NSC shells into the surrounding environment under the influence of climatic conditions and the time of NSC operation.

The paper considers a calculation model that allows determining the areas of leaks based on NSC operational data and calculating the costs through these leak points in the shells and building structures under the NSC walls, and the model also takes into account the external flow of air around the NSC Arch in the form of variable boundary conditions and variable NSC ventilation costs over time.

A description of the existing locations of air leaks from the main volume under the walls of the NSC in the environment is also provided, as well as a description of the methodology for performing the work. The results of modeling the dynamics of changes in the areas of air leaks are presented, which show an increase in the values of the areas over the time of operation of the NSC and the leakage of air flows from the main volume outside the NSC ("low" emission) for the five-year period of operation of the NSC from 2020 to 2024 and quantitative clarifications of these dependences of the areas of leaks on the seasons of the year (winter-summer), which should be carried out as a permanent monitoring of the NSC for the purpose of controlling, predicting air flows outside the NSC and planning work on dismantling unstable structures of the shelter object.

Новий Безпечний Конфайнмент (НБК) ЧАЕС побудований з метою перетворення будівельних конструкцій Об'єкта «Укриття» (ОУ) в екологічно безпечну систему. Для забезпечення безпеки персоналу, населення та навколишнього середовища НБК має зовнішню і внутрішню оболонки, які не є повністю герметичними. Ще більш не герметичними є місця ущільнення під західною та східною стінами НБК і будівельними конструкціями, а також самі будівельні конструкції під цими стінами. Оскільки в кільцевому просторі (КП) НБК підтримується надлишковий тиск (5-20 Па), а в основному об'ємі (ОО) негативний тиск (мінус 5-10 Па), то основні протічки повітря з радіоактивними аерозолями (РА) мають місце із ОО під стінами НБК і частково через оболонки НБК.

**Метою роботи** є аналіз та уточнення площ протічок та витрат повітрообміну через внутрішню оболонку із кільцевого простору в основний об'єм, із ОО в оточуюче середовище (ОС) за допомогою розробленої моделі НБК і багаторічного об'єму експлуатаційних даних, одержаних від НБК при різних напрямках і швидкостях вітру, а також вивчити можливі залежності площ протічок і коефіцієнтів протічок від різних сезонів року і від часу експлуатації НБК.

## Результати роботи.

Наведено результати опису наявних місць протічок повітря із ОО в ОС, в місцях ущільнення мембран та крізь будівельні конструкції під західною та східною стінами НБК та ділянці обшивки вентиляції ДСРВ.

Представлені в табл.1 результати моделювання витіку потоків повітря із ОО за межі НБК («високого» викиду через витяжку НБК та «низького» викиду повітря з РА під стінами НБК).

Проведено аналіз впливу кліматичних умов і часу експлуатації НБК на значення площ протічок при обробці 24-х вибірок експлуатаційних даних НБК загальною кількістю ~336 тис. даних за період експлуатації 4,5 календарні роки з 2020 по 2024 роки.

Під час виконання робота застосовувалась розроблена гідравлічна модель НБК, яка заснована на рівнянні Бернуллі:

$$G = R \cdot \Delta P; \quad (1)$$

де:  $G$  – витрата;  $\Delta P$  – перепад статичних тисків ( $P_{oo}-P_{зс}$ ,  $P_{oo}-P_{сс}$ ,  $P_{oo}-P_{дсрв}$ ,  $P_{кп}-P_{oo}$ , 3-ри  $P_{кп}-P_{ос}$ );  $R$  – гідравлічна провідність у вигляді:

$$R = \mu \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho \cdot |\Delta P|}}; \quad (2)$$

де:  $\mu=0,6$  – коефіцієнт витрати;  $S$  – умовна площа протічки між вибраними частинами НБК і оточуючим середовищем;  $\rho$  – густина повітря.

Коефіцієнт витрати  $\mu$  через отвір у тонкій стінці залежить від багатьох параметрів та його значення змінюється від 0,1 до 1 для різних умов. Для НБК достеменно невідомо це значення коефіцієнта витрати  $\mu$  і задаються відомим значенням 0,6, яке відповідає для отвору в тонкій стінці. Тому пошук точних значень площ протічок буде залежить від, того яким значенням коефіцієнта витрати  $\mu$  задаємось, тоді для НБК більш коректною розглядати коефіцієнт протічки  $K$  та шукати його значення за допомогою експлуатаційних даних з НБК:

$$K = \mu \cdot S; \quad (3)$$

Отримані результати уточнення площ  $S$  протічок, коефіцієнтів протічок  $K$  для НБК за допомогою розробленої моделі [1] були зроблені при коефіцієнті витрати  $\mu=0,6$  та показують їх поступове зростання з роками експлуатації НБК, а саме площа внутрішньої оболонки НБК між КП і ОО за 4,5 роки зросла з 7,08 до 8,10 м<sup>2</sup> (на 12,6%), або за рік на 2,8%, рівняння лінії тренду:  $S^{cp}_{кп-oo} = 0,26 \cdot \tau - 508,06$ . Площа низького викиду під західною стіною (зп) НБК за 4,5 роки зросла з 1,48 м<sup>2</sup> до 1,79 м<sup>2</sup> (на 17,4%) або за рік на 3,9%, рівняння лінії тренду:  $S^{cp}_{oo-зп} = 0,08 \cdot \tau - 156,40$ . Площа низького викиду під східною стіною (сп) НБК за 4,5 роки зросла з 3,35 м<sup>2</sup> до 5,03 м<sup>2</sup> (на 33,4%) або за рік на 7,4%, рівняння лінії тренду:  $S^{cp}_{oo-сп} = 0,42 \cdot \tau - 844,62$ .

Отримані результати уточнення площ протічок і коефіцієнта протічок в оболонках і місцях протічок під стінами НБК показало, що їх значення зростають в літній період періоду року і частково зменшуються в зимній період

року. Кількісні уточнення цих залежностей площ протічок і коефіцієнтів витрат від сезонів року (зима-літо) потребує подальших досліджень.

Табл.1. Вихідні експлуатаційні дані НБК для 2020-2024 років та результати середньомісячних витрат припливів повітря із ОС в ОО та «низького викиду» із ОО в ОС (млн. м<sup>3</sup>/місяць)

Середньомісячні за рік витрати (млн. м <sup>3</sup> /місяць) між об'ємами НБК					Результати аналізу витрат, млн. м <sup>3</sup> /місяць	
№ п/п	Рік	Приплив осушеного повітря із КП в ОО	Приплив повітря через ВУ із ОС в ОО	Високий викид повітря через ВУ із ОО в ОС	Приплив повітря із ОС в ОО	Середньомісячні витрати «низького» викиду повітря із ОО в ОС
1	2	3	4	5	6	7
1	2020	49,15	1,99	-58,08	10,26	-3,31
2	2021	46,32	1,85	-84,94	38,01	-1,21
3	2022	36,65	0,00	-70,79	35,24	-1,10
4	2023	32,32	0,00	-73,96	43,27	-1,63
5	2024	39,72	0,00	-95,28	55,58	-0,02

*Річні дані* – це сукупність експлуатаційних даних, одержаних від ЧАЕС протягом року з різною кількістю місяців і часовими кроками 1 час або 5 хвилин

Витрати «низького» викиду із ОО в ОС зменшуються це пов'язано з тим що з 2022 року майже постійно працюють 3-и витяжні ВУ «високого» викиду із ОО в ОС та тим, що приплив осушеного повітря в КП здійснюється тільки 2-а ВУ, замість 3-х як було у 2020 та 2021 роках з метою економії електроенергії при забезпеченні умов експлуатації НБК.

### **Висновки.**

1. Проведено аналіз, обробку і використання даних за п'ятирічний період експлуатації НБК з 2020 по 2024 роки та відібраних 258 тис. вимірів вихідних даних вперше дозволив виконати важливу роботу з уточнення по рокам площ протічок в оболонках і місцях протічок низького викиду під стінами НБК, а також можливі залежності площ протічок від року і сезонів року (зима-літо).

2. Отримані результати уточнення площ протічок та коефіцієнтів протічок К в оболонках і місцях протічок під стінами НБК показало зростання їх значень з роками експлуатації НБК, а саме площа та коефіцієнт протічки К внутрішньої оболонки НБК між КП і ОО зростає за рік на 2,8%. Площа і коефіцієнт протічки К «низького» викиду під західною стіною НБК зростає за рік на 3,9%. Площа і коефіцієнт протічки К «низького» викиду під східною стіною НБК зростає за рік на 7,4%.

3. Площі і коефіцієнт протічки К переважно зростають в літній період періоду року і переважно зменшуються в зимній період року. Кількісні уточнення цих залежностей площ і коефіцієнт протічки К від сезонів року (зима-літо) потребує подальших досліджень.

### **Перелік посилань.**

1. Круковський П.Г., Скляренко Д.І., Дядюшко Є.В., Кондратенко С.О. Аналіз неорганізованого повітрообміну Нового Безпечного Конфайнменту з оточуючим середовищем (попередні результати моделювання за експлуатаційними даними) // V міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища» INUDECО, 27–29 квітня, 2020 р., м. Славутич, Україна. – с.109-117.

## **РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ СУПРОВІДУ ГІДРАВЛІЧНОГО СТАНУ НБК ЧАЕС НА ЗАСАДІ ТЕХНОЛОГІЇ ІМІТАТОР – ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК**

*Старовіт Іван<sup>1</sup>, Савко Володимир<sup>2</sup>, Круковський Павло<sup>1</sup>, Гаврилко Євген<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, kruk\_2@ukr.net

<sup>2</sup> Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, gev.1964@ukr.net

**Abstract.** The study is dedicated to the development of a prototype digital twin for the hydraulic state of the New Safe Confinement (NSC) of the Chernobyl Nuclear Power Plant. Given the critical importance of preventing radioactive aerosol leakage, the work substantiates the need to create a digital twin capable of assessing, forecasting, and optimizing the behavior of the ventilation system in real time. The novelty of the proposed approach lies in the use of an emulator as a virtual test bench that simulates realistic input conditions and enables the validation of digital twin algorithms prior to their implementation on the actual facility. The schematic diagram of the prototype, based on a nodal Bernoulli model, is described, with the potential for further integration of a CFD model for detailed simulation of aerosol transport. Additional experiments will allow for the evaluation of the digital twin's sensitivity to changes in leakage areas, investigation of the impact of measurement errors, and testing of various ventilation control strategies under both normal and emergency operating conditions.

**Анотація.** Роботу присвячено розробленню прототипу цифрового двійника гідравлічного стану Нового Безпечного Конфайнмента (НБК) Чорнобильської АЕС. Зважаючи на актуальність задачі запобігання витокам радіоактивних аерозолів, у роботі обґрунтовано доцільність створення цифрового двійника, що здатен в реальному часі оцінювати, прогнозувати та оптимізувати поведінку системи вентиляції. Новизною роботи є використання імітатора як віртуального стенда, що моделює реальні вхідні умови та дозволяє відпрацювати алгоритми цифрового двійника до етапу його впровадження на реальному об'єкті. Показано принципову схему прототипу, заснованого на вузловій моделі Бернуллі, з можливістю подальшої інтеграції CFD-моделі для детального моделювання перенесення аерозолів. Проведення додаткових експериментів дозволить оцінити чутливість цифрового двійника до зміни площ

протічок, дослідити вплив похибок вимірювання та відпрацювати варіанти керування вентиляційними установками в нормальних і аварійних режимах.

З метою мінімізації наслідків аварії на ЧАЕС, що сталася у 1986 році, було зведено об'єкт «Укриття», покликаний зменшити обсяг радіоактивних викидів у навколишнє середовище. З часом конструкція «Укриття» стала потенційно небезпечною через ризик обвалу нестабільних елементів, зокрема покрівлі та несучих опор. У зв'язку з цим виникла необхідність створення більш надійної та довготривалої інженерної споруди – Нового Безпечного Конфайнмента (НБК). Основна функція НБК полягає в ізоляції залишків зруйнованого енергблока, запобіганні подальшим радіоактивним викидам та створенні умов для безпечного демонтажу старого об'єкта «Укриття».

**Метою** даної роботи є аналіз основних чинників, що впливають на гідравлічний стан НБК, а також обґрунтування необхідності створення прототипу його цифрового двійника та відпрацювання технології з використанням спеціально створеного імітатора, що виконує роль реального об'єкту.

НБК складається з основного об'єму, в якому розміщено залишки зруйнованого енергблока та елементи старого об'єкта «Укриття», що є головною зоною утримання радіоактивних матеріалів, і кільцевого простору, який додатково оточує основний об'єм по верхній поверхні і забезпечує буферну зону. Оскільки НБК не є герметичною спорудою та, внаслідок конструктивних особливостей, містить значну кількість нещільностей, його гідравлічний стан значною мірою залежить від швидкості та напрямку вітру. Вітер формує розподіл тиску на зовнішніх поверхнях об'єкта. При цьому найбільш несприятливими є західний та східний напрямки вітру, що зумовлено великою площею контакту НБК із залишками конструкцій ЧАЕС з відповідних боків.

З метою запобігання витокам радіоактивних аерозолів передбачено можливість активного керування гідравлічним станом за допомогою вентиляційних установок (ВУ). Виділяють два основні типи ВУ: установки, що викачують повітря з основного об'єму та установки, що подають повітря до кільцевого простору.

Згідно проекту, ВУ повинні забезпечувати виконання таких вимог:

1. Підтримання невеликого вакууму (приблизно -5 Па) у зоні розташування об'єкта «Укриття», що сприяє зменшенню ризику виходу повітря з аерозольним забрудненням у довкілля;

2. Створення підвищеного тиску (+15 Па) та підтримання відносної вологості не вище 40% у кільцевому просторі з метою уповільнення корозійних процесів.

Враховуючи, що фактичні площі протічок перевищують проєктні значення [1] та мають тенденцію до збільшення, а запланований строк експлуатації НБК перевищує 100 років, постає низка науково-інженерних задач. Серед них:

1. Ідентифікація актуальних площ протічок;
2. Розрахунок обсягів витоків радіоактивних аерозолів;
3. Оптимізація режимів роботи вентиляційних систем залежно від параметрів вітру;

4. Моделювання аварійний режимів (обвал конструкцій, пожежа, вихід з ладу обладнання тощо).

Розв'язання вказаних задач неможливе без розроблення цифрового двійника гідралічного стану НБК, який дозволить проводити моделювання, прогнозування та оптимізацію в режимі реального часу.

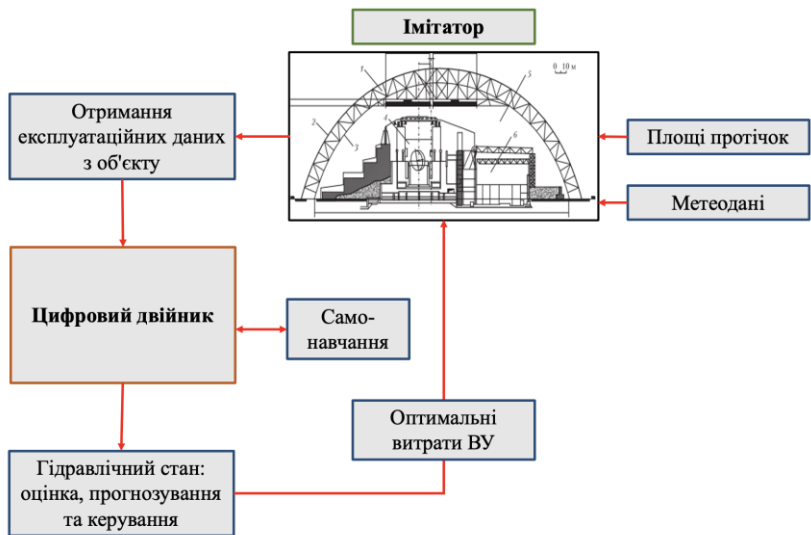


Рисунок 1 – Взаємодія цифрового двійника з імітатором НБК

**Цифровий двійник (digital twin)** – це віртуальна (розрахункова) модель реального об'єкта, яка постійно оновлюється за допомогою даних з фізичного прототипу в реальному часі та використовується для задач моніторингу, прогнозування та керування об'єктом. На відміну від раніше запропонованої системи підтримки прийняття рішень [2], концепція цифрового двійника передбачає можливість розширення ряду закладених моделей, постійну інтеграцію з об'єктом (його експлуатаційними даними) та оперативне оновлення розрахункових моделей у відповідь на зміну параметрів об'єкта (площі протічків, режимів вентиляції тощо).

Оскільки пряма інтеграція з реальними системами НБК наразі неможлива, з метою відпрацювання відповідної технології запропоновано створення прототипу, що складається з імітатора НБК та цифрового двійника НБК, заснованих на вузловій моделі Бернуллі [1]. Додатково в цифровий двійник можлива інтеграція CFD-моделі, зокрема, для детального аналізу поширення радіоактивних аерозолів [3].

Імітатор відіграє роль реального об'єкту, для якого задаються регламент роботи ВУ та площі протічків, на кожній ітерації задаються реальні швидкість та напрям вітру. Цифровий двійник на кожному кроці отримує експлуатаційні дані з імітатора та розраховує викиди радіоактивних аерозолів з НБК (Рисунок 2), а

також розраховує оптимальні витрати ВУ. При цьому також періодично розраховується середня похибка між перепадами тисків отриманих з імітатора та тих що розраховані самим двійником – при великих відхиленнях, шляхом вирішення оптимізаційної задачі цифровий двійник знаходить актуальні площі протічок. Таким чином, використання імітатора дозволяє:

1. Дослідити вплив похибки вимірів на точність розрахунків гідравлічного стану цифровим двійником;
2. Визначити чутливість цифрового двійника до зміни площ протічок об'єкту;
3. Відпрацювати різні стратегії керування вентиляційними установками.

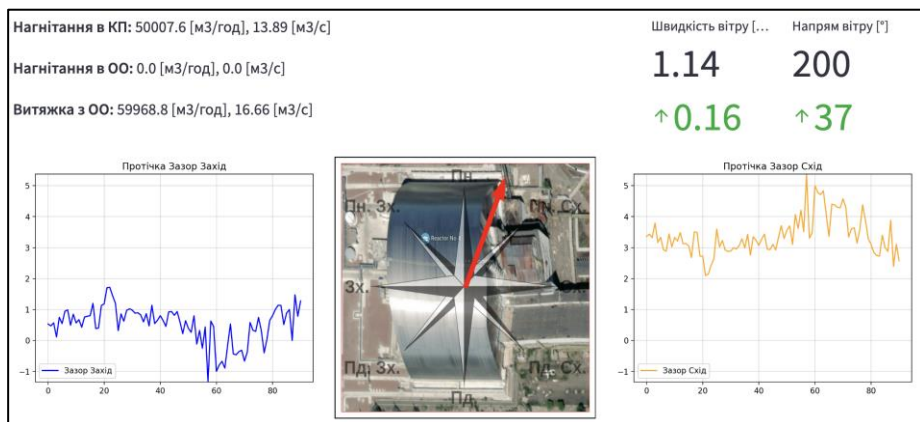


Рисунок 2 – Розраховані протічки радіоактивних аерозолів

**Висновки.** Застосування імітатора дає можливість експериментально перевірити ефективність обраного підходу до побудови цифрового двійника гідравлічного стану НБК, виявити потенційні обмеження технології та сформулювати рекомендації щодо її подальшого вдосконалення.

### Література

1. P. Kruckovskiy, Y. Diadiushko, D. Skliarenko, I. Starovit. Unorganized air releases with radioactive aerosols from the New Safe Confinement of ChNPP into the environment. Problems of atomic science and technology, 2021. Vol. 6, pp. 181–186. doi: 10.46813/2021-136-181
2. Старовіт, І. С. Моделі та програмні засоби управління вентиляційними установками НБК ЧАЕС з використанням машинного навчання : дис. д-ра філософії Київ, 2024. – 208 с.
3. P. Kruckovskiy, M. Metel, A. Polubinskiy, V. Krasnov, D. Sklsarenko, A. Deineko. Model of thermogasdynamic, humid and radiation state of the new safe confinement and the “Shelter” Object // II International Conference "International Conference on Nuclear Decommissioning and Environment Recovery" INUDECO. April 25-27, 2017, Slavutych, Ukraine, p. 347-350.

# ENSURING INFORMATION SECURITY IN THE TRANSPORTATION OF NUCLEAR

*Trunov Oleksii<sup>1</sup>, Dorosh Mariia<sup>2</sup>*

Chernihiv Polytechnic National University, Ukraine

<sup>1</sup>alexeytrunov1995@gmail.com, <sup>2</sup>mariyaya5536@gmail.com

**Abstract.** Nuclear waste transportation is a critical and high-risk process where information security (IS) plays a key role along with physical and radiation protection. This is due to high risks associated with unauthorized access to transportation information. The study analyzes key aspects of ensuring security in the organization of this process in Ukraine, including cyber, physical, insider, man-made and natural threats to information assets. National and international legal and regulatory frameworks in this area are considered. The main threats to IS, such as cyberattacks, phishing, theft and human factor, are identified. A comprehensive approach to ensuring an adequate level of security is proposed, including risk management, access control, data protection, network security, incident management, staff training and physical security. It emphasizes the need for continuous monitoring, legislative updates, risk assessment, multi-level protection and prioritization of critical information, investment in technology, communication security, training, response plans and international cooperation. It emphasizes the continuous nature of the IS process to ensure safety of nuclear waste transportation.

**Keywords:** nuclear waste, transportation, information security.

Transportation of nuclear waste is an integral part of the nuclear fuel cycle and the process of radioactive material management [1]. This process is associated with increased risks, which requires an integrated approach to security, including physical protection, radiation safety and, last but not least, IS. Unauthorized access, disclosure, modification or destruction of information related to the transportation of nuclear waste can lead to serious consequences, including increased risk of theft or sabotage, panic among the public and damage to national security.

Information Security in nuclear waste transportation in Ukraine is governed by national legislation, including the Law «On physical protection of nuclear facilities, nuclear materials, radioactive waste, and other sources of ionizing radiation» [2], which sets access restrictions, and «Rules for Handling Information on Physical Protection of Nuclear Facilities, Nuclear Materials, and Other Radiation Sources, Access to Which is Restricted» [3]. The State Nuclear Regulatory Inspectorate plays a key role in enforcing these. Globally, the International Atomic Energy Agency (IAEA) provides standards for safe handling, integrating information protection into physical security. Additionally, international dangerous goods transport regulations (ADR for road, RID for rail, IMDG Code for sea, ICAO TI/IATA DGR for air) mandate specific requirements for information documentation and transmission.

Information related to the transportation of nuclear waste is a valuable asset for attackers. The main IS threats in nuclear waste transportation include:

*Cyber threats:* hacking of information systems (attacks on route planning, transport monitoring, personnel databases, and communication systems to gain unauthorized access to confidential information: route details, traffic schedules, cargo information, security measures, personal data of personnel); malicious software (infection of systems to steal data, block access to critical information or demand ransom, such as Malware or Ransomware); phishing and social engineering (attempts to deceive personnel into disclosing confidential information (passwords, transportation details) or installing malicious software); attacks on communication systems (intercepting, jamming or distorting communications between the vehicle and the control center); attacks on the software and hardware supply chain (compromising the software or hardware components of systems used in transportation at the stage of their development or delivery).

*Physical threats to information assets:* theft or loss of storage media (laptops, USB drives, paper documents containing transportation plans, personnel lists, contact information, etc.); unauthorized access to documents and premises (penetration of document storage areas or transportation management systems).

*Insider threats (human factor):* intentional actions of personnel (leaking information to intruders, sabotage of information systems); negligence and mistakes of personnel (violation of rules for handling confidential information, accidental disclosure of data, use of weak passwords, loss of information media). Lack of awareness of threats and IS rules).

*Man-made and natural threats:* damage or destruction of IP and data storage media as a result of accidents, natural disasters, and military operations.

To ensure an adequate level of information security, it is necessary to implement a comprehensive approach, the key elements of which are the following:

*IS risk management:* regular identification and assessment of information assets related to nuclear waste transportation (route plans, GPS tracking data, communication protocols, personal data, etc.); analysis of potential threats and vulnerabilities of IS and processes; development and implementation of measures to reduce identified risks to an acceptable level.

*Access control:* physical (restriction of access to premises where confidential transportation-related information is processed and stored); logical (implementation of reliable user authentication and authorization systems - multi-factor authentication, the principle of minimum required privileges - Role-Based Access Control, differentiation of access to information depending on the job responsibilities of personnel); access control to mobile devices and storage media.

*Data protection:* encryption (use of reliable encryption algorithms to protect confidential information both during storage (data-at-rest) on servers, workstations, mobile devices, and during transmission (data-in-transit) through communication channels); protection against information leakage - Data Leak Prevention (implementation of technical means and organizational measures to prevent unauthorized copying and transmission of confidential information); data backup and recovery (regular backup of critical information and availability of plans for different scenarios).

*Network and communication system security:* network perimeter protection (use of firewalls, intrusion detection and prevention systems); secure communication channels (use of VPNs, encrypted radio protocols or satellite communications to

exchange information between vehicles and control centers); regular monitoring of network security (detection of suspicious activity and potential attacks); endpoint security (anti-virus software, application control on workstations and mobile devices).

*IS Incident Management:* developing and implementing plans for responding to IS incidents (data breaches, cyberattacks on tracking systems): conducting incident investigations, remediation, and taking measures to prevent reoccurrence.

*Personnel training and awareness raising:* regular IS training for all personnel involved in the organization and transportation of nuclear waste; training on the rules for handling confidential information, recognizing phishing attacks and other social engineering methods; and developing an IS culture in the organization.

*Physical security of information assets:* ensuring the security of premises where documents and IS are stored; control over the use and storage of removable media.

*Supply chain security:* assessing the security risks associated with the involvement of third-party organizations (logistics companies, security companies, IT service providers); including security requirements in contracts with contractors.

*The human factor:* remains pivotal in ensuring security. Even robust technical protection tools can be compromised if personnel disregard established rules or succumb to social engineering. Therefore, continuous training, awareness, clear instructions, and compliance monitoring are critical.

Information security is an integral part of the overall security system for nuclear waste transportation. An integrated approach, combining regulatory frameworks, modern technical measures, effective organizational practices, and ongoing personnel engagement, is essential to minimize risks from unauthorized information access. Key recommendations for ensuring IS include: continuous monitoring and updating of the regulatory framework; regular, threat-aware risk assessments; implementing a multi-level IS system; investing in advanced technologies (encryption, network protection, monitoring); ensuring secure and redundant communication channels; strengthening personnel training and security culture; developing and testing incident response plans; and fostering international cooperation. This continuous process of adaptation and improvement guarantees maximum safety for this highly responsible activity.

Ensuring security in the transportation of nuclear waste is a continuous process that requires constant attention, adaptation to new challenges, and improvement of security measures. Only such approach will guarantee the maximum level of safety of this extremely responsible activity.

## References

1. Pope, R. B., & Rawl, R. R. (2009, July 26–30). Security in the Transport of Radioactive Materials. Paper presented at ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.1115/pvp2009-77089>
2. On physical protection of nuclear facilities, nuclear materials, radioactive waste, and other sources of ionizing radiation. (2000). Law of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2064-14>
3. IAEA. Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities : (INFCIRC/225/Revision 5). International Atomic Energy Agency, 2012.

**ПЕРЕДПРОЄКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО «РАНЬОГО ДЕМОНТАЖУ»  
НЕСТАБІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» ДСП ЧАЕС**

*Фаренюк Генадій<sup>1</sup>, Немчинов Юрій<sup>1</sup>, Бамбура Андрій<sup>1</sup>,  
Сазонова Ірина<sup>1</sup>, Дорогова Олена<sup>1</sup>,  
Лазаренко Сергій<sup>2</sup>, Багіров Владислав<sup>2</sup>, Резніков Борис<sup>2</sup>, Бійчук Артем<sup>2</sup>.  
Рудько Володимир<sup>3</sup>, Брилка Сергій<sup>3</sup>, Балан Олег<sup>3</sup>,  
Кондратенко Сергій<sup>4</sup>, Лищина В'ячеслав<sup>4</sup>, Дерюга Сергій<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних  
конструкцій» e-mail: [ndibk@ndibk.gov.ua](mailto:ndibk@ndibk.gov.ua)

<sup>2</sup>ТОВ «ЮТЕМ-ІНЖИНІРИНГ» e-mail: [office@utem-group.com](mailto:office@utem-group.com)

<sup>3</sup>Інститут проблем безпеки АЕС НАН України

<sup>4</sup>Державне спеціалізоване підприємство Чорнобильська АЕС,  
e-mail: [office@chnpp.gov.ua](mailto:office@chnpp.gov.ua)

**Abstract.** Almost four decades have passed since the day of the world's largest man-made accident, which resulted in the complete destruction of the 4th power unit of the Chernobyl NPP. During this time, the containment facility "Shelter" (LS SO) was erected and the unstable structures of the "Shelter" facility were strengthened, a strategy was developed for transforming the LS SO into an environmentally safe system and a "New Safe Confinement" (NSC) was built. The next step in solving this problem is the early dismantling of unstable structures.

The article presents the results of work that was carried out within the framework of pre-design studies on the "early" dismantling of unstable structures of the LS SO. Calculation analysis of the bearing capacity and stability of the position of structures of categories I and II of NRS responsibility, taking into account the data of visual inspections of their technical condition and an assessment of the probability of failure of these structures. Drawing up a final list of unstable structures subject to reinforcement or "early" dismantling, based on an analysis of calculations of the bearing capacity and stability of the position of the LS SO structures.

And in the same 1986, the protective structure of the "SO" was erected. Given the scale of the destruction and the great danger to the health and life of personnel, it was decided that as part of emergency measures to support the main load-bearing structures, the rubble and building structures of the 4th power unit, which had supercritical defects, should be used.

Since 1989, the State Research Institute of Building Construction has been carrying out work on scientific and technical support and monitoring of the structures of the Shelter facility, namely: survey of the technical condition of the structures of the Shelter facility of the Chernobyl NPP; development of design criteria when developing stabilization measures and "NSC" projects; preparation of passports of building structures of the SO; development of a stabilization measures project; calculation assessment of the bearing capacity of the damaged structures of the 4th power unit and the stability of the structures of the Shelter facility of the Chernobyl NPP built in 1986; determination of the list of unstable structures of the 4th power unit; development and

optimization of the list of stabilization measures (from "List 29", "List 20" to "List 15"); calculations as part of the work on developing the stabilization project; development and analysis of design options for a new safe confinement and identification; development of a conceptual design of the NSC (the "Arch" option).

Currently, work is being carried out on the early dismantling of unstable structures within the framework of the SIP program to transform the SO into an environmentally safe state.

**Анотація.** Минуло майже чотири десятиліття від дня найбільшої у світі техногенної аварії, в результаті якої був повністю зруйнований 4-й енергоблок Чорнобильської АЕС. За цей час було зведено локалізуючу споруду об'єкт «Укриття» (ЛС ОУ) та виконано посилення нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», розроблена стратегія перетворення ЛС ОУ в екологічно безпечну систему та побудовано «Новий безпечний конфайнмент». Наступним кроком у вирішенні цієї задачі є раннього демонтажу нестабільних конструкцій.

В статті наведено результати робіт, що були виконані в рамках передпроектних досліджень щодо «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій ЛС ОУ. А саме, розрахунковий аналіз несучої здатності та стійкості положення конструкцій I та II категорії відповідальності за ЯРБ з врахуванням даних візуальних обстежень їх технічного стану та оцінка імовірності відмови цих конструкцій; складання заключного переліку нестабільних конструкцій, що підлягають підсиленню або «ранньому» демонтажу, на основі аналізу розрахунків несучої здатності та стійкості положення конструкцій ЛС ОУ.

## **Вступ**

26 квітня 1986 року на Чорнобильській атомній електростанції сталася найбільша у світі техногенна аварія, в результаті якої був повністю зруйнований 4-й енергоблок Чорнобильської АЕС. Конструктивна система будівлі енергоблоку не змогла забезпечити стійкість до непропорційного руйнування. У зв'язку з цим, була поставлена задача в найкоротший час збудувати захисну споруду з метою зменшення радіаційного впливу на навколишнє середовище і персонал. І у тому ж 1986 році була зведена захисна споруда об'єкт «Укриття». Враховуючи масштаб руйнування і велику небезпеку для здоров'я та загрози життя персоналу було прийнято рішення, що в рамках протиаварійних заходів для спирання основних несучих конструкцій використати завали і будівельні конструкції 4-го енергоблоку, які мали закритичні дефекти. Зрозуміло, що проект об'єкту «Укриття» було зроблено за межами вимог будівельних норм. Таким чином, нові конструкції виготовлялись зі значним запасом (у 2-3 рази) несучої здатності в той час, як стійкість їх положення завжди визивала сумніви.

За проектом термін експлуатації об'єкту «Укриття» складав 30 років, що дозволяло розробити проект і виконати роботи по будівництву. Розвал Радянського Союзу завадив виконанню вказаних робіт у терміни, передбачені планом, і це викликало розробку та реалізацію проекту стабілізаційних заходів по підсиленню конструкцій об'єкту «Укриття» в критичних зонах. Починаючи з

1989 року ДП НДІБК виконував роботи щодо науково технічного супроводу і моніторингу конструкцій об'єкту «Укриття», а саме:

- обстеження технічного стану конструкцій об'єкту «Укриття» ЧАЕС;
- розробка проектних критеріїв при розробці проектів стабілізаційних заходів та «Нового безпечного конфайнмента»;
- складання паспортів будівельних конструкцій ОУ;
- розробка проекту стабілізаційних заходів;
- розрахункова оцінка несучої здатності пошкоджених конструкцій 4-го енергоблоку та стійкості збудованих у 1986 році конструкцій об'єкту «Укриття» ЧАЕС;

- визначення переліку нестабільних конструкцій 4-го енергоблоку;
- розроблення та оптимізація переліку заходів зі стабілізації (від «Переліку 29», «Переліку 20» до «Переліку 15»);
- розрахунки у складі робіт з розроблення проекту стабілізації;
- розроблення та аналіз конструктивних варіантів нового безпечного конфайнмента та визначення раціональних передпроектних пропозицій;
- розроблення концептуального проекту НБК (варіант «Арка»).

На даний час в рамках програми SIP по перетворенню об'єкту «Укриття» в екологічно безпечний стан виконуються роботи щодо раннього демонтажу нестабільних конструкцій.

#### **Підстави для виконання робіт**

- Стратегія перетворення об'єкта «Укриття» (схвалена рішенням міжвідомчої комісії з питань комплексного вирішення проблем ЧАЕС від 12.03.2001) [1];

- Технично-экономическое обоснование (концептуальный проект) нового безопасного конфайнмента. Дополнение к Пояснительной записке SIP K 0021 000 EXN 001 01. Стратегия дальнейшей реализации проекта НБК, SIP-P-PM-21-330-EXN-004-01 [2];

- Грантова Угода №2 Рахунку міжнародного співробітництва для Чорнобиля (РМСЧ) [3];

- Постанова Колегії Державної інспекції ядерного регулювання України від 19 жовтня 2023 року № 03 "Про результати державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки Звіту з переоцінки безпеки експлуатації локалізуючої споруди об'єкта «Укриття» (ЛС ОУ) з обґрунтуваннями можливості продовження її експлуатації до 31.10.2029 на рівні безпеки ЛС ОУ не нижче того, що був досягнутий після завершення невідкладної стабілізації [4].

#### **Склад робіт**

- Розробка Проектних критеріїв та вимог до інфраструктури НБК для демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» в частині:

- визначення вихідних подій для проектування інфраструктури для демонтажу нестабільних конструкцій,
- вимог та критеріїв будівельного проектування,
- вимог до класифікації та до послідовності демонтажу нестабільних конструкцій.

- Виконання систематизованого розрахункового аналізу несучої здатності та стійкості положення до сейсмічних впливів та систематизованих оцінок імовірності відмови конструкцій категорії I та II відповідальності за ЯРБ ЛС ОУ в період продовження їх експлуатації до завершення демонтажу з врахуванням результатів додаткових обстежень.

- Проведення аналізу результатів регламентного контролю (візуального, інструментального, геодезичного та автоматизованого контролю СКСБК ІАСК) технічного стану будівельних конструкцій ЛС ОУ категорії I та II відповідальності за ЯРБ та розробка пропозицій щодо змін регламенту посиленого контролю за станом ЛС ОУ та методики аналізу результатів контролю.

- Розрахунки несучої здатності та стійкості конструкцій ОУ для рішень з демонтажу/підсилення, включаючи переоцінку стійкості системи балок Б1/Б2 та їх опорних конструкцій під впливом МРЗ на основі проведеного аналізу зміни коефіцієнта передачі навантаження від покрівлі ОУ на стіну по осі 50 та МКП за результатами геодезичних спостережень після насування НБК в проектне положення, перегляд доцільності та терміну реалізації стабілізаційного заходу №4 та підсилення плит перекриття деаераторної етажерки на відмітці 38.600.

- Заключний аналіз переліку нестабільних конструкцій, що підлягають підсиленню або «ранньому» демонтажу.

#### **Постановка завдання**

Метою даної роботи є визначення технічного стану конструкцій ЛС ОУ, а саме:

- розрахунковий аналіз несучої здатності та стійкості положення конструкцій I та II категорії відповідальності за ЯРБ з врахуванням даних візуальних обстежень їх технічного стану;

- оцінка імовірності відмови конструкцій категорії I та II відповідальності за ЯРБ;

- розрахунок стійкості положення системи балок Б1/Б2 та їх опорних конструкцій під впливом МРЗ;

- рішення з демонтажу/підсилення системи балок Б1/Б2 та їх опорних конструкцій;

- аналіз стану плит ДЕ на відм. 38,600;

- рішення з демонтажу/підсилення плит ДЕ на відм. 38,600;

- аналіз результатів регламентного контролю (візуального, інструментального, геодезичного та автоматизованого контролю СКСБК ІАСК) технічного стану будівельних конструкцій ЛС ОУ категорії I та II відповідальності за ЯРБ;

- розробка пропозицій щодо змін "Регламенту посиленого контролю за станом будівельних конструкцій I та II категорії відповідальності за ЯРБ ЛС ОУ комплексу НБК-ОУ" та методики аналізу результатів контролю з урахуванням зауважень Висновку державної експертизи ЯРБ;

- на основі аналізу розрахунків несучої здатності та стійкості положення конструкцій ЛС ОУ з врахуванням даних візуальних оглядів і обстежень та

інструментальних спостережень скласти заключний перелік нестабільних конструкцій, що підлягають підсиленню або «ранньому» демонтажу.

На рисунку 1 наведено загальний вигляд об'єкту «Укриття» після виконання заходів з стабілізації конструкцій.

### **Класифікація будівельних конструкцій ОУ**

Виходячи з оцінок радіаційних наслідків у разі руйнування локалізуючої споруди ОУ, ця споруда загалом може бути віднесена до I-ї категорії за умовами відповідальності за ядерну та радіаційну безпеку.

Водночас, враховуючи, що обвал окремих конструкцій локалізуючої споруди ОУ не призведе до опромінення персоналу та населення понад встановлені санітарними нормами межі доз, ці конструкції можуть бути віднесені до II категорії за умовами відповідальності за ЯРБ.

До I категорії віднесено конструкції ОУ, обвалення яких може призвести до найбільшого аварійного викиду пилу в основний обсяг НБК і, відповідно, до високих рівнів забруднення НБК. Крім того, до I категорії віднесено конструкції ОУ, відмови яких можуть вплинути на стан ядерної безпеки внаслідок:

- порушення функцій контролю стану ПВМ та підтримки їх у підкритичному стані (внаслідок пошкодження/руйнування відповідних систем ОУ);
- неконтрольованого переміщення ПВМ з утворенням нових ядерно-небезпечних композицій.

**До I категорії конструкцій за умовами відповідальності за ЯРБ належать:**

- металоконструкції посилення (західна зона);
- конструкції каркаса ДЕ в осях Б-В (південна зона);
- південна вентшахта (східна зона);
- північна вентшахта (східна зона);
- балки Б1 та Б2 по осях Ж і П;
- балка "Мамонт" та її опори;
- балки Б3 та Б5.

**До II категорії конструкцій за умовами відповідальності за ЯРБ відносяться:**

- південні щити покриття;
- південні щити-"ключки";
- східні щити покриття;
- східні щити-"ключки";
- північні щити-"ключки";
- стіна по осі 50 з конструкціями, що примикають (західна зона);
- західна контрфорсна стіна;
- сходово-ліфтовий блок (західна зона);
- розподільні балки К1, К2;
- балка "Восьминіг" та її опори;
- західні щити-«ключки»;
- західні плоскі щити;
- легка покрівля ЦЗ;
- північна контрфорсна стіна.

При виконанні систематизованого розрахункового аналізу несучої здатності та стійкості положення конструкцій ЛС ОУ використані наступні матеріали:

- Технічне рішення №04 від 29.01.2015 «Про вибір варіанта «раннього» демонтажу для розробки Робочого проекту ПК-2 НБК «Інфраструктура для демонтажу нестабільних конструкцій ОУ»»;
- Технічне рішення №07 від 21.02.2024 «Щодо продовження терміну експлуатації ЛС ОУ до 30.10.2029»;
- Реферат ДНТЦ ЯРБ № 14-11-7601 «Про виконання технічної оцінки документа ДСП ЧАЕС «Звіт з переоцінки складу нестабільних конструкцій ОУ, що підлягають «ранньому» демонтажу» SIP 09-2-001-NI-03-RPT-037-04». 2014 р.;
- Звіт ДНТЦ ЯРБ №15-11-8107 про виконання державної експертизи ЯРБ документу ДСП ЧАЕС «Технічне рішення «Про вибір варіанта «раннього» демонтажу для розробки Робочого проекту ПК-2 НБК «Інфраструктура для демонтажу нестабільних конструкцій ОУ»», 2015 р.;
- Технологічний регламент експлуатації комплексу «НБК-ОУ», 1Е-С-НБК-ОУ (Погоджено 10.08.2021 р.);
- наявні креслення будівельних конструкцій ЛС ОУ;
- паспорти будівельних конструкцій ЛС ОУ;
- акти періодичних візуальних оглядів конструкцій, що виконуються співробітниками ДСП ЧАЕС;
- результати обстежень будівельних конструкцій ЛС ОУ, проведених співробітниками ДП НДІБК та ІПБ НАН України;
- документи, розроблені в складі робочого проекту по стабілізаційним заходам;
- інші документи, розроблені за час експлуатації об'єкта «Укриття».

### **Основний матеріал і результати**

При виконанні систематизованого розрахункового аналізу несучої здатності та стійкості положення до сейсмічних впливів та систематизованих оцінок імовірності відмови конструкцій категорії I та II відповідальності за ЯРБ ЛС ОУ в період продовження їх експлуатації до завершення демонтажу з врахуванням результатів додаткових обстежень були розроблені нові та актуалізовані наявні комп'ютерні моделі для всіх конструкцій ЛС ОУ категорії I та II відповідальності за ЯРБ.

Нижче на рисунках 2 – 3 наведені просторові комп'ютерні моделі окремих зон та конструкцій ЛС ОУ, що використовувались при виконанні розрахункового аналізу.

Імовірність відмови конструкцій ЛС ОУ, що відносяться до I та II категорій за умовами відповідальності за ЯРБ, з врахуванням аналізу даних візуальних та інструментальних обстежень і результатів розрахунків наведена в таблиці 1 та 2 відповідно. Ці роботи виконувались разом з ТОВ «ЮТЕМ - ІНЖИНІРИНГ» та ДСП ЧАЕС.

Таблиця 1 - Імовірність відмови конструкцій ЛС ОУ, що відносяться до І категорії за умовами відповідальності за ЯРБ

Конструкції	Оцінка ймовірності відмови, рік <sup>-1</sup>		Примітка
	після стабілізації	на дату звіту	
МКП	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	
Балки Б1/Б2 та їх опори по осям Ж та П	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою опор балок на консолях МКП та стінах вентшахт
Південна вентшахта	-	$1 \cdot 10^{-4}$	
Північна вентшахта	-	$1 \cdot 10^{-4}$	
Деаераторна етажерка	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	
Балка «Мамонт» та її опори	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовами ДЕ і опор балки «Мамонт» на горизонтальне навантаження
Балка Б3 та її опори	-	$1 \cdot 10^{-4}$	Загальна оцінка ймовірності відмови балки визначається відмовою її опор на швелероподібних стінах товщиною 1400 мм по осям И та Н
Балка Б5 та її опори	-	$1 \cdot 10^{-4}$	Загальна оцінка ймовірності відмови балки визначається відмовою її опор на стінах вентшахт товщиною 700 мм

Таблиця 2 - Імовірність відмови конструкцій ЛС ОУ, що відносяться до ІІ категорії за умовами відповідальності за ЯРБ

Конструкції	Оцінка ймовірності відмови, рік <sup>-1</sup>		Примітка
	після стабілізації	на дату звіту	
Стіна по осі 50 з конструкціями (західна зона)	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	
Короби-балки К1 И, К2 И	оцінка відсутня	$2 \cdot 10^{-3}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою конструкцій каркасу в осях 50-51'

Конструкції	Оцінка ймовірності відмови, рік <sup>-1</sup>		Примітка
	після стабілізації	на дату звіту	
Західні щити	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою конструкцій каркасу в осях 50-51'
Західні щити - «ключки»	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою стіни по осі 50 з конструкціями
Західна контрфорсна стіна	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	
Південні щити - «ключки»	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою східної опори балки «Мамонт» та каркасу ДЕ
Південні щити покриття	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою східної опори балки «Мамонт» та каркасу ДЕ
Балка «Восьминіг» та її опори	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою каркасу ДЕ
Північна контрфорсна стіна	оцінка відсутня	$1 \cdot 10^{-4}$	
Північні щити - «ключки»	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою північної контрфорсної стіни
Легка покрівля ЦЗ	оцінка відсутня	$1 \cdot 10^{-4}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою блоків балок Б2
Трубний накат	оцінка відсутня	$1 \cdot 10^{-4}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою блоків балок Б2
Східні щити покриття та щити - «ключки»	оцінка відсутня	$1 \cdot 10^{-4}$	Загальна оцінка ймовірності відмови визначається відмовою стін вентшахт та швелероподібних стін по осям И та Н, на які спираються балки Б3 та Б5
Сходово-ліфтовий блок	оцінка відсутня	$2 \cdot 10^{-3}$	Стійкість положення при сейсмічних впливах залежить від стійкості стіни по осі 50 з прилеглим каркасом (колон по осі 51')

Проведений аналіз результатів візуальних оглядів та обстежень і результатів розрахунків конструкцій, що відносяться до I та II категорії за ЯРБ, дозволяє зробити наступні висновки:

- підчас візуальних оглядів та обстежень, в тому числі, виконаних у 2024 році, не виявлено дефектів, що можуть вплинути на несучу здатність конструкцій та стійкість їх положення;
- несуча здатність перерізів конструкцій та стійкість їх положення при сейсмічних впливах забезпечена;
- імовірність відмови конструкцій I категорії знаходиться в межах  $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$ ;
- імовірністю відмови конструкцій II категорії знаходиться в межах  $2 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$ .

На основі аналізу результатів багаторічних спостережень, візуальних та інструментальних обстежень і розрахункового аналізу складений заключний перелік нестабільних конструкцій ЛС ОУ, що підлягають «ранньому» демонтажу.

Заключний перелік нестабільних будівельних конструкцій ОУ, що підлягають «ранньому» демонтажу, наведено в таблиці 3.

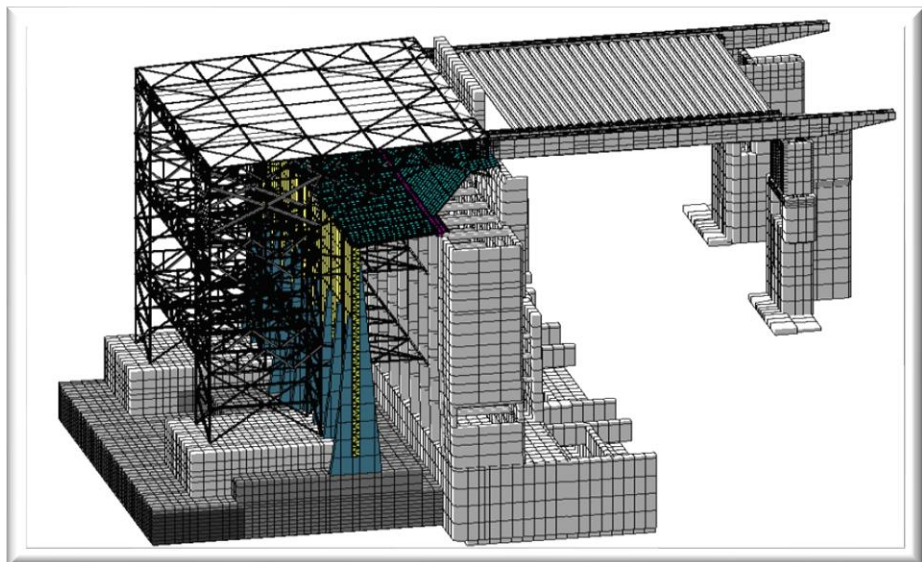
Таблиця 3 - Заключний перелік нестабільних будівельних конструкцій ОУ, що підлягають «ранньому» демонтажу

Ч/ч	Найменування конструкцій	Висновок про необхідність посилення	Примітки
Нестабільні конструкції, що включені в перелік за результатами обстежень та розрахунків			
1	Південні щити-«ключки» в осях 40-52/Б-В на відм. 43,160-57,565	не посилювати	
2	Легка покрівля над трубним накатом в осях 43-50/Ж-П на відм. 62,700	не посилювати	
3	Південні щити в осях 40-50/В-Ж на відм. 57,565-63,920	не посилювати	-
4	Балка «Мамонт» (з виконанням проміжних опор для можливості розділення балки на окремі частини, що демонтуються)	не посилювати	
5	Балка «Восьминіг» в осях 40-52/Б на відм. 43,000	не посилювати	-
6	Західна опора балки «Мамонт» в осях 50-51/В на відм. 45,880-52,760	не посилювати	-
7	Розподільча рама східної опори балки «Мамонт»	не посилювати	-

Ч/ч	Найменування конструкцій	Висновок про необхідність посилення	Примітки
8	Східна опора балки «Мамонт» в осях 41-42/В на відм. 43,000-51,970	не посилювати	-
9	Плити перекриття ДЕ в осях 40-51/Б-В на відм. 38,600	не посилювати	-
10	Північні щити-«ключки» в осях 41-50/П-С на відм. 54,600-63,920	не посилювати	-
11	Трубний накат в осях 43-50/Ж-П на відм. 62,700	не посилювати	-
<b>Супутні конструкції, що заважають демонтажу нестабільних конструкцій</b>			
12	Металева ферма посилення, що об'єднує південні щити та південні щити-«ключки»		Встановлена під час реалізації стабілізаційного заходу 8 та заважає демонтажу південних щитів-«ключок» і південних щитів
13	Похилі щити, які обпираються на покриття машинного залу та на південні щити-«ключки» в осях 40-50/В		Заважають демонтажу південних щитів-«ключок»
14	Трубопроводи існуючої модернізованої системи пилопригнічення (МСПП)		Заважають демонтажу легкої покрівлі над трубним накатом
15	Об'ємний блок «Кішкін дім» в осях 50-52/Е на відм. 59,000		Заважає демонтажу балки «Мамонт»
16	Об'ємний блок «Мишкін дім» в осях 50-51/С на відм. 55,200		Заважає демонтажу північних щитів - «ключок»
17	Додаткова опора балки «Мамонт»		Заважає демонтажу завалів на ДЕ
18	Завали на Деаераторній етажерці, основа балок «Мамонт» та «Восьминіг» в осях 40-51/Б-В на відм. 38,600		Заважають демонтажу плит перекриття ДЕ в осях 40-51/Б-В на відм. 38,600

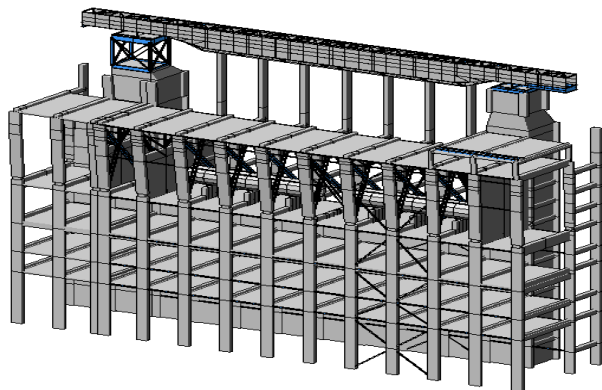


*Рисунок 1 – Загальний вигляд об'єкту «Укриття» після виконання стабілізаційних заходів*

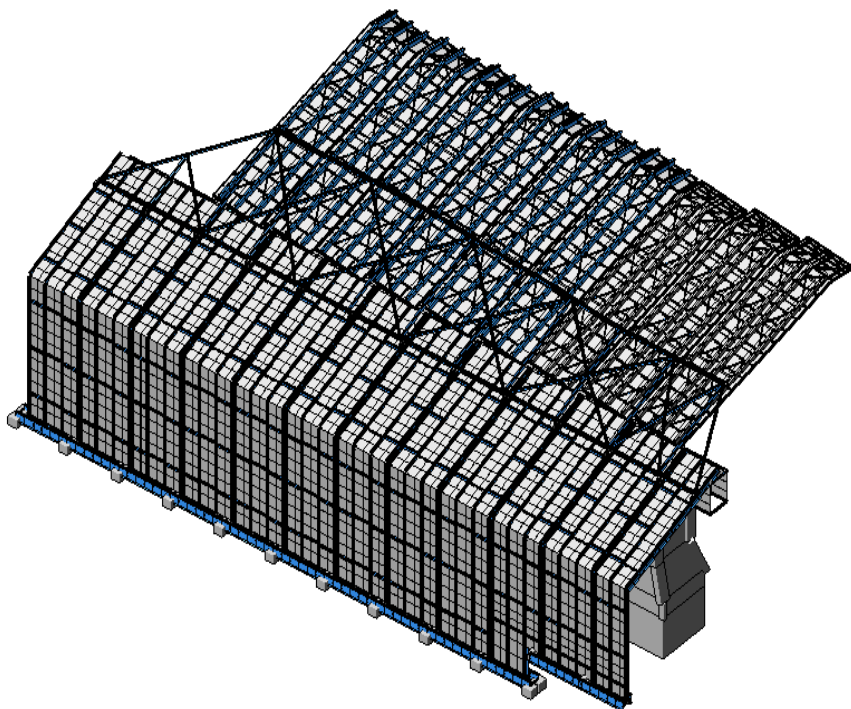


*Рисунок 2 - Комп'ютерна модель західної зони з балками Б1/Б2, трубним накатом та вентиляційними шахтами*

а)



б)



*Рисунок 3 - Комп'ютерна модель південної зони:  
а) деаераторна етажерка; б) південні щити та південні щити – «ключки»*

## **Висновки**

Проведений заключний аналіз результатів візуальних обстежень, інструментальних спостережень і результатів розрахунків конструкцій I та II категорії за умовами відповідальності за ЯРБ показав:

- несуча здатність та стійкість положення при сейсмічних впливах інтенсивністю 5 балів по шкалі MSK-64/ДСТУ Б В.1.1-28:2010 [5] та вимог ДБН В.1.1-12:2014 (Зміна № 1) [6] конструкцій ЛС ОУ, що включені до переліку «раннього» демонтажу, забезпечена до завершення виконання робіт з «раннього» демонтажу у 2029 році;
- несуча здатність та стійкість положення при сейсмічних впливах інтенсивністю 6 балів по шкалі [5] та вимог ДБН В.1.1-12:2014 [6] інших конструкцій ЛС ОУ I категорії за умовами відповідальності за ЯРБ забезпечена до завершення виконання робіт з «раннього» демонтажу у 2029 році;
- несуча здатність та стійкість положення при сейсмічних впливах інтенсивністю 5 балів по шкалі [5] та вимог ДБН В.1.1-12:2014 [6] конструкцій ЛС ОУ, що не включені до переліку «раннього» демонтажу, забезпечена до завершення виконання робіт з «раннього» демонтажу у 2029 році без необхідності їх підсилення.

## **Бібліографічний список**

1. Стратегія перетворення об'єкта «Укриття» (схвалена рішенням міжвідомчої комісії з питань комплексного вирішення проблем ЧАЕС від 12.03.2001)
2. Техніко-економічне обґрунтування (концептуальний проект) нового безпечного конфайнменту. Додаток до Пояснювальної записки SIP К 0021000 EXN 00101. Стратегія подальшої реалізації проекту НБК, SIP-P-PM-21-330-EXN-004-01
3. Грантова Угода №2 Рахунку міжнародного співробітництва для Чорнобиля (РМСЧ)
4. Постанова Колегії Державної інспекції ядерного регулювання України від 19 жовтня 2023 року № 03 "Про результати державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки Звіту з переоцінки безпеки експлуатації локалізуючої споруди об'єкта «Укриття» (ЛС ОУ) з обґрунтуваннями можливості продовження її експлуатації до 31.10.2029 на рівні безпеки ЛС ОУ не нижче того, що був досягнутий після завершення невідкладної стабілізації.
5. ДСТУ Б В.1.1-28:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності. Мінрегіонбуд України/ Україна: ДП НДІБК, ІГФ НАНУ, ТОВ БудНДіЕП, Кримська ЕРОСНіПЗ, ОДАБА, ДП «Інститут «КримНДІпроект» та інші. «Укрархбудінформ», 2011. – 47 с.
6. ДБН В.1.1-12: 2014 «Будівництво у сейсмічних районах України». Київ, Мінрегіон, 2014. – 110 с. Зміна № 1. Київ, 2019/ Наказ № 314, 2.11.2018. Інформаційний бюлетень, 1` 2019.- 7 с.

**LONG-TERM IONIZING RADIATION EFFECT ON THE SEXUAL  
REPRODUCTIVE CAPACITY OF THE COMMON REED  
*PHRAGMITES AUSTRALIS* (CAV.) TRIN. EX. STEUD.**

*Shevtsova N., Belyaev V., Prysliak S., Gudkov D.*

Institute of hydrobiology of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine,  
shevtsovanl245@gmail.com

The modern state of seed productivity of the dominant helophyte species in the Chernobyl Exclusion Zone (ChEZ) was studied. The obtained data were compared with our own data from previous years. A consistently low seed productivity of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex. Steud. in ChEZ is recorded with a tendency to decrease. The state of macrophyte reproduction is affected by a decrease in the length and width inflorescences-panicles, the number of flowers in the inflorescence and number of seed at the panicle.

Anatomical and morphometric studies of the one of plant reproduction organs, namely, panicle, of the dominant species of cenoses of aquatic plants of the ChEZ - common reed *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud was done. The studies were carried out on the most polluted water-bodies of the ChEZ - lakes Glyboke, Azbuchyn, Daleke, Yanivskiy backwater of the Pripyat River, as well as on four water residues that were formed within the former water area of the cooling reservoir of the Chernobyl NPP (ChNPP) after the water level decreased. Conditionally, the control water in the ChEZ was Lake Plyutovyshche, located 17 km far from the ChNPP, characterized by relatively low levels of radionuclide contamination.

Measurements of the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in water, bottom sediments and plants were performed using a  $\gamma$ -spectrometric complex Mirion Technologies – Canberra (Japan). Determination of the  $^{90}\text{Sr}$  content was performed using a beta-radiation energy spectrometer SEB-01-70 (AKP Atom Komplex Prylad, Ukraine). The measurement error was 15-25%. The calculated standard deviation fully characterized the sample variations according to [1]. The absorbed dose rate (ADR) of ionizing radiation on plants was determined using the conversion factors recommended [2] based on data on the specific activity of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in water, bottom sediments in thickets of aquatic plants of polygonal reservoirs, as well as in plants in general.

Common reed, a plant with very high adaptive potential and genetic diversity [3, 4], has two reproductive organs: roots, responsible for the vegetative reproduction pathway, and panicle with grains - responsible for the sexual reproduction pathway of the plant and the genetic diversity of individuals within the species. Genetic diversity is represented by the diversity of alleles present within a population. And, if a gene is a fundamental unit of heredity, then alleles are its specific versions. The source of new alleles is mutations, changes in DNA sequences, etc. As a result of sexual reproduction, individuals can have different combinations of alleles for each gene, and this ensures its genetic diversity, which is important for preserving and expanding the adaptive potential of the population to possible environmental changes [5].



L. Azbuchin:  $n = 16$  pcs.;  $L - 27$  cm.;  $W - 5$  cm, 2014 L. Azbuchin:  $n = 14$  pcs.;  $L - 23$  cm.;  $W - 2,4$  cm, 2021

Figure 1. Samples of common reed panicles from different years of vegetations

At modern time, a decrease in panicle size is recorded for common reed in water bodies, where the internal absorbed dose rate per plant is from 15 to 84  $\mu\text{Gy}/\text{day}$ , and the percentage of dose from incorporated  $^{90}\text{Sr}$  significantly exceeds 50%. For example, compared to previous observation periods, namely before the beginning of the decrease in the water level in the Chernobyl NPP reservoir at the end of 2014, the size of the panicle of reed from Lake Azbuchyn (which was subjected to hydrological backflow from the reservoir and the water level in which also decreased) decreased almost 2 times and is on average 15 cm, compared to 32 cm in the period 2008-2014 [6, 7, 8].

Morphometric indicators of reed panicles from other studied reservoirs are almost beyond the minimum limit for linear values inherent in reed panicles under optimal conditions of existence [6], and range from 17-34 cm for length and 2.14-5.84 cm for panicle width.

For plants from majority ChEZ water bodies, we continue to record almost complete panicle sterility. The actual productivity of common reed panicles in 2023 did not exceed 11%, even in plants from Lake Plyutovyschie, where the absorbed dose rate per plant is two orders of magnitude lower than the threshold value for biota.

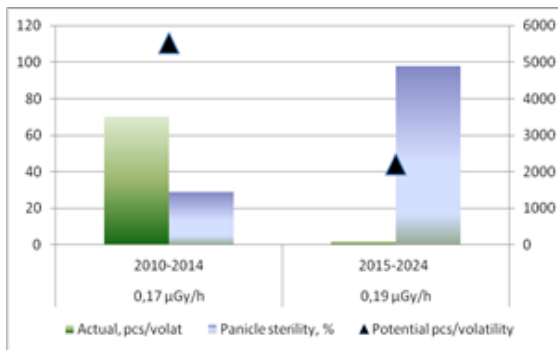


Figure 2. Reproductive indicators of reed panicles from the northwestern part of the Chernobyl NPP cooling reservoir

The seed reproductive potential of common reed in the ChZV reservoirs, where plants receive a dose load in the range of absorbed dose rates of 1.3–84  $\mu\text{Gy/day}$ , is critically low, considering the significant reduction in anatomical and morphometric indicators of one of the reed reproductive organs – the panicle, and it's almost complete sterility.

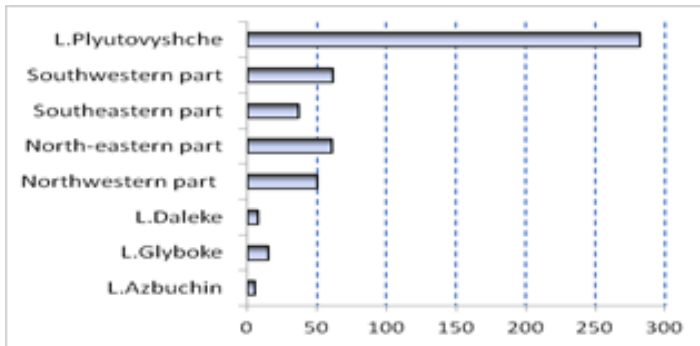


Figure 3. Average number of grains in a reed panicle in the water bodies of the Chernobyl Exclusion Zone, 2023

In practice, the exclusion of the sexual pathway from the reed reproduction stage can lead to an imbalance in maintaining the genetic diversity of reed populations in the ChZV reservoirs and reduces the possibility of exchanging genetic material between individual plant coenoses and, if this situation persists in the future, can lead to a weakening of their adaptive capabilities and a narrowing of the plant's adaptive potential.

The loss of genetic diversity in individual populations of reeds in the ChZV reservoirs makes them particularly vulnerable to other stress factors for the plant and can lead to a decrease in the ability to adapt to new conditions of existence (changes in temperature, chemical composition, hydrological regime, etc.), the appearance of pests new to the species, or the occurrence of atypical diseases. In this regard, the study of changes in the reproductive organs of reeds responsible for their sexual reproduction is another link in the study of genetic changes in plants exposed to long-term low-dose radiation.

1. Statistical Methods in Biology Design and Analysis of Experiments and Regression By S.J. Welham, S.A. Gezan, S.J. Clark, A. Mead, (2014), [doi.org/10.1201/b17336](https://doi.org/10.1201/b17336)

2. ICRP, 2017. Dose coefficients for non human biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136. Ann. ICRP 46(2).

3. Fundamentals Of Ecology, Eugene P Odum. 1971 ( Third Edition ): W. B. Saunders, Comp.

4. З. Гейни, К.М. Ситник (відп. ред.) Макрофіти – індикатори змін природного середовища (Київ, Наук. думка, 1993) 434 с.

5. Д.М. Гродзінський Адаптивна стратегія фізіологічних процесів рослин (Київ, Наук. Думка, 2013) 302 с.

6. J. Barescut et al. Radioprotection, 44, Issue 5: ECORAD 2008 - Radioecology and Environmental Radioactivity, 2009, pp. 941 – 944, doi.org/10.1051/radiopro/20095168

7. C. Mothersill, V. Korogodina, C. Seymour (eds), D. Gudkov. et al., (2012). Radiobiology and Environmental Security. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. , pp. 233-244

8. Yavniuk, A.A. Shevtsova N.L., Gudkov D.I. Disorders of the initial ontogenesis of seed progeny of the common reed (*Phragmites australis*) from water bodies within the Chernobyl Exclusion Zone (2020), J. of Environmental Radioactivity, V.218. 106256. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106256.

## РАДІОАЕРОЗОЛЬНА СИТУАЦІЯ ПІД УКРИТТЯМ «АРКА» ПІСЛЯ АТАКИ БПЛА 14.02.2025

*В. К. Шинкаренко, М. М. Талерко, А. М. Новіков, В. О. Краснов, В. О. Кашир, О. А. Свирид, В. В. Августов.*

Інститут проблем безпеки АЕС НАН Україна, вул. Лисогірська, 12, 03028, Київ,  
e-mail: [shynkarenko.viktor@gmail.com](mailto:shynkarenko.viktor@gmail.com)

**Abstract:** On February 14, 2025, at 1:54 a.m., a Russian explosive-laden drone struck the New Safe Confinement (NSC) over Chornobyl Unit 4, damaging both layers of its protective shell. Although the main air volume of the NSC remained sealed, a fire broke out, followed by prolonged smoldering of the insulation layer that lasted until March 7. This led to depressurization and a temporary increase in airborne radionuclide activity beneath the NSC.

Aerosol samples were collected using stationary impactors and filter ventilation systems, and were subsequently analyzed via gamma spectroscopy and autoradiography. The highest recorded volumetric activity of  $^{137}\text{Cs}$  reached  $1.8 \text{ Bq/m}^3$ . Autoradiographic analysis of the collected particles revealed soot contaminated with radionuclides; however, no fuel-containing particles with activity levels exceeding 10 Bq were detected. The observed  $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$  activity ratios (ranging from 30 to 70) suggest a mixed origin of the radionuclide contamination.

No direct damage to radioactive materials was confirmed, indicating that the elevated airborne activity likely resulted from secondary resuspension of previously deposited contamination. This incident underscores the vulnerability of post-accident confinement systems to external kinetic impacts and highlights the need for enhanced radiological monitoring capabilities.

**Keywords:** radioaerosols, Chornobyl Exclusion Zone, New Safe Confinement,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , resuspension, monitoring, impactor, autoradiography, hot particle.

### Вхідні дані та методи дослідження

Згідно штатної програми контролю відбір аерозольних проб під Аркою НБК проводився за допомогою стаціонарної фільтр-вентиляційної установки /ФВУ/ Град-1,8 розташованої в південно-східному кутку неподалік від західної стіни Арки НБК та імпаکتора ІБФ-VTE розташованого в північно-західній її частині. Каскади цього імпаکتора збирають та сортують частки за їхніми аеродинамічними діаметрами: 17,0 - 8,5; 8,5 - 3,7; 3,7 - 1,2; 1,2 - 0,5 та менше 0,5 мкм. Періодичність зміни колекторних пластин імпаکتора – 14 діб.

Поза НБК поблизу його східної стіни знаходилась ФВУ Град 1.5. ФВУ VENT була розташована приблизно за 500 м на захід - південний захід від НБК. Схема розташування пробовідбірників наведена на рис. 1. Основні характеристики ФВУ наведені в табл. 1. Матеріал повітряних фільтрів – тканина Петрянова ФПП-15-1,5. Періодичність зміни фільтрів – 7 діб.

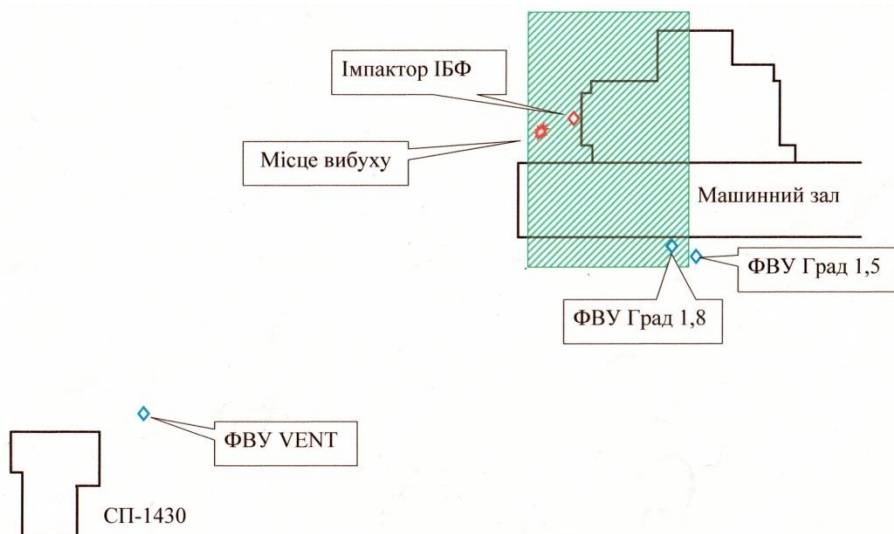


Рис. 1. Схема розташування пробовідбірників

Таблиця 1. Основні технічні характеристики пробовідбірників аерозолу

Характеристики пробовідбірників	ФВУ	ФВУ	ФВУ	Імпаکتор
	Vent	Град-1,5	Град-1.8	ІБФ
Місцезнаходження:				
Широта	51°23'13.0"	51°23'17.9"	51°23'17.9"	51°23'21.6"
Довгота	30°05'31.4"	30°05'53.4"	30°05'52.4"	30°05'48.5"
Висота відбирання проби, м	1,0	1,5	1,8	1,5
Продуктивність, м <sup>3</sup> /год.	300	450	450	3
Площа фільтра, м <sup>2</sup>	0,36	0,56	0,56	3.85·10 <sup>-3</sup>

Вимірювання активностей  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{241}\text{Am}$  на повітряних фільтрах проводили за допомогою напівпровідникового  $\gamma$ -спектрометра з охолоджуванним детектором із надчистого германію.

Авторадіографічні дослідження проводили згідно з [3] із використанням медичної рентгенівської плівки. Цифрові денситограми авторадіографічних плям отримували за допомогою сканування у режимі відбивання, роздільна здатність 600 точок на дюйм. Визначення параметрів радіографічних плям проводили за допомогою пакета обробки зображень Image-Pro Plus 6.0. Для визначення  $\beta$ -активності часток за параметрами їхніх радіографічних зображень будували калібрувальну залежність, отриману за даними авторадіографії лінійки часток з відомою активністю. Свого часу (2002–2003 рр.) ці частки були ізолювані з повітряних фільтрів, експонованих поблизу об'єкта «Укриття»;  $\beta$ -активності відібраних часток були визначені за допомогою низькофонового пропорційного лічильника LB-720 (Bekman).



Рис. 2. Фрагменти експонованих повітряних фільтрів від:

*a* - 28.01-06.02.2025,  $Q = 30\,000\text{ м}^3$   
*б* - 12-18.02.2025,  $Q = 14\,000\text{ м}^3$ ,  
де  $Q$  – прокачаний об'єм повітря.

фрагментів двох повітряних фільтрів, експонованих до і під час удару.

На рис. 3 наведені авторадіограми цих фрагментів. Відмітимо, що верхній шар тканини Петрянова залишався липким тривалий час після експозиції, що призвело до часткового злипання шарів складеного фільтра, світлі ділянки на авторадіограмі рис. 3 *б* утворилися внаслідок часткового видалення волокнистого шару, темна ділянка вгорі відповідає шару подвійної товщини. Активності гарячих часток на обох фрагментах не перевищують 5-10 Бк. Виходячи з середньої на сьогодні питомої бета-активності опроміненого палива<sup>1</sup> порядку  $1,31 \cdot 10^9$  Бк/г  $\text{UO}_2$  та густини палива  $\approx 10\text{ г/см}^3$ , маємо оцінку аеродинамічних діаметрів часток з активністю 5 Бк порядку 28,5 та  $\approx 36$  мкм для часток з активністю 10 Бк. Тобто, ФВУ Град - 1,8 переважно досягли частки з аеродинамічними діаметрами менше 30 - 40 мкм. Аналогічна ситуація спостерігалась в 2019 році під час обвалу в к. 402/3, коли на повітряних фільтрах цієї установки теж були відсутні частки з більшими

### Результати та обговорення

Повітряний фільтр ФВУ Град-1,8, що був експонований в період 12.02 - 18.02 й продовжував працювати після удару БПЛА мав інтенсивне темне забарвлення і залишався липким внаслідок відкладання великої кількості часток кіптяви. На рис. 2 для порівняння наведені зображення

<sup>1</sup> Розраховано виходячи з даних наведених в [5]. Бета випромінювання  $^{241}\text{Pu}$  не брали до уваги, оскільки енергії ( $\leq 20\text{ кеВ}$ ) цих частинок замалі для досягнення робочого шару фотоемульсії рентгенівської плівки.

активностями. Видається ймовірним, що цьому сприяло як віддалене розташування установки від місця обвалу, так і наявність залишку стіни машинного залу поряд з установкою. В результаті більш крупні частки, або не утворилися в просторі під Аркою, або не змогли долетіти до установки [4].

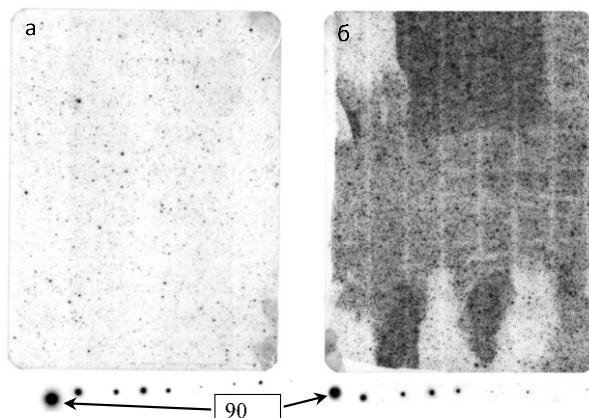


Рис. 3. Авторадіографічні зображення фрагментів повітряних фільтрів. а - 28.01-06.02.2025, радіографічна експозиція 14 діб. б - 12-18.02.2025, експозиція 7 діб.

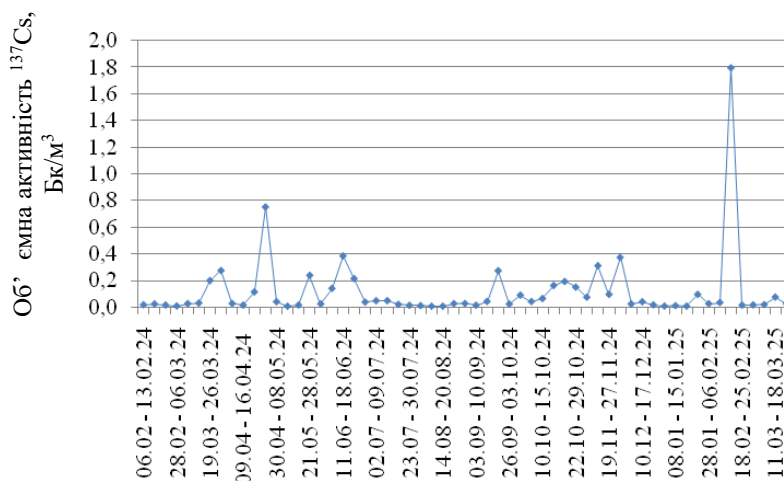


Рис. 4. Динаміка об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі поблизу ФВУ Град-1,8.

Динаміка об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі поблизу точки розташування ФВУ Град-1,8 наведена на рис. 4. В період з 12.02 по 18.02 спостерігається

підвищення об'ємної активності, але потрібно пам'ятати, що це значення усереднене за тиждень, тому пікова активність могла бути на 1 – 2 порядки більшою.

На рис. 5 наведені значення об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі поблизу розташування імпактора ІБФ-ВТЕ. Дані за період 6.02 – 18.02 частково відкориговані – враховано, що надходження радіонуклідів відбувалося з моменту удару, тобто з 14.02. Спостерігається двогорбий розподіл аерозольних часток за аеродинамічними діаметрами: дрібні частки в з розмірами порядку 1 мкм і більш крупні з діаметрами порядку 10-15 мкм. Відмітимо, що паливним часткам таких розмірів відповідають  $\beta$ -активності  $4 \cdot 10^{-5}$  –  $4 \cdot 10^{-4}$  Бк для більш дрібних часток і 0.15 – 1.73 Бк для більш крупних. Для фільтрів спостерігається співвідношення  $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$  порядку 30-70, що дещо вище розрахованих виходячи з даних [5]  $\approx 20$  для теперішнього стану опроміненого палива на ЧАЕС. Це може бути пояснено, як було показано в роботі [6], наявністю додаткової цезієвої компоненти забруднення окрім забруднення паливними частками.

Відмітимо також, що величина скоригованої сумарної по ступеням імпактора об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  1,36 Бк/м<sup>3</sup> близька до зареєстрованої ФВУ Град 1.8 активності – 1,8 Бк/м<sup>3</sup>. Невелике розходження може бути пов'язано з тим, що імпактор відсікає частки з аеродинамічними діаметрами більше 17 мкм, а на повітряному фільтрі ФВУ присутні поодинокі частки порядку 27,3 - 34 мкм.

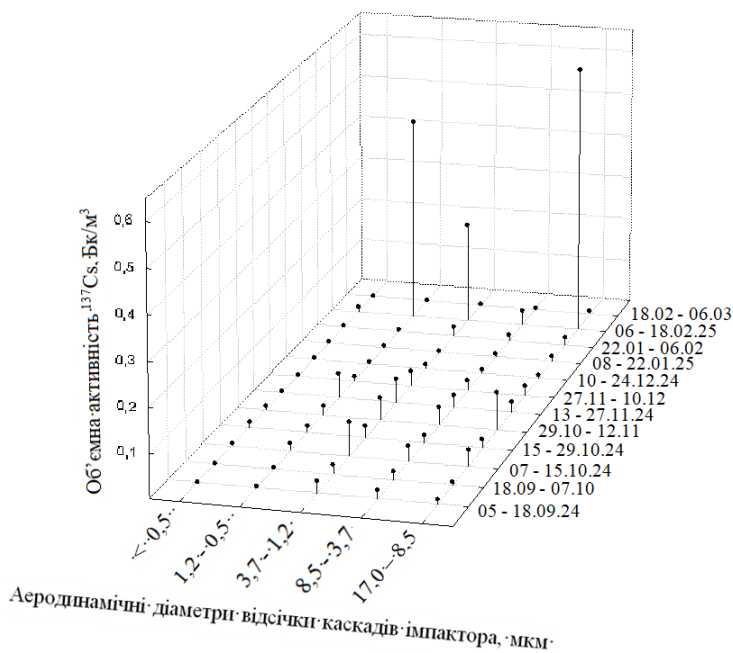


Рис. 5. Динаміка об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі на місці розташування імпактора ІБФ

## Висновки

Атака БПЛА 14.02.2024 спричинила тимчасове, але помітне підвищення рівнів  $^{137}\text{Cs}$  та інших нуклідів у повітрі під Аркою НБК. Оскільки після вибуху БПЛА не було зареєстровано пошкоджень об'єктів, що містили б паливні матеріали чи інші радіоактивні речовини, можна вважати, що сплеск активності під укриттям НБК відбувся внаслідок вторинної ресуспензії аерозольних часток із поверхонь усередині об'єктів Арка та «Укриття». Варіант з викидом паливних часток під час тління герметизуючої оболонки виглядає малоімовірним, оскільки по-перше малоімовірним є накопичення паливних часток на цій оболонці, по-друге ще більш неймовірним виглядає вивільнення паливних часток в процесі тління.

## Перелік посилань

1. <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3959875-rosijskij-dron-vluciv-vnoci-v-ukritta-nad-cetvertim-energoblokom-caes-zelenskij.html>
2. <https://rayon.in.ua/news/788470-ryatuvalniki-likvidovali-tlinnya-pislya-udaru-rosiyskogo-drona-po-sarkofagu-chornobilskoj-aes>
3. Шинкаренко В.К. Методичні рекомендації до визначення бета-активності “гарячих” часток та розподілу їх за активностями. // Київ. – 2021. – Інститут проблем безпеки АЕС НАНУ. – 43с.
4. Шинкаренко В. К. До сплеску активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі під об'єктом «Арка» 17 жовтня 2019 р. /В. К. Шинкаренко, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, П. В. Сабенін // *Ядерна енергетика та довкілля*, 2021.- (2), 107-115.
5. Бегічов С.М. Паливо реактора 4-го блоку ЧАЕС: (Короткий довідник). / Бегічов С.М., Боровий А.А., Бурляков Є.В. та ін. // М., 1990. – 22 с. - (Препр./ІАЕ; 5268/3).
6. Гаргер Є.К. Оцінка ступеня розчинення радіоактивних аерозольних частинок з об'єкта "Укриття". / Є.К. Гаргер; А.А. Одинцов, В.К. Шинкаренко // *Проблеми безпеки атомних електростанцій та Чорнобіля*. – 2009. – Вип. 12. – С. 125-136.

## РАДІАЦІЙНА РОЗВІДКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ В ЧОРНОБИЛЬСЬКОМУ САРКОФАЗІ

*Штефан В.М.<sup>1\*</sup>, Савельєв М.В.<sup>2</sup>, Гречанинов В.Ф.<sup>1</sup> Скотт Т.Б.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Інститут проблем математичних машин та систем  
Національної академії наук України, Київ;

<sup>2</sup> Інститут проблем безпеки атомних електростанцій  
Національної академії наук України, Київ.

<sup>3</sup> Університет Бристоля, Бристоль, Велика Британія.  
\*shtefan0110@gmail.com

**Abstract:** The transformation of the “Shelter” object into an environmentally safe system requires the conditioning of fuel-containing materials. Working within the “Shelter” presents significant challenges, including lethal radiation levels, hazardous environmental conditions, difficult physical access, and degradation of the structures. Developing safe work plans necessitates the modeling of the interiors of the Chornobyl Nuclear Power Plant. This paper presents the results of modelling of level 0 under the former Unit 4. Photos and plans of the object “Shelter” were analysed and transformed into 3D environmental model. Additionally, a radiation contamination map was generated using the Kriging method of spatial interpolation. Created virtual model allows us to effectively use robotics by supplementing the robot’s navigational sensor data with a 3D model of the environment. In turn, the robot updates radiation contamination data by conducting reconnaissance in hazardous areas. The results of the 3D modelling and radiation mapping can already be used as a training simulator for personnel. Despite the challenges posed by the ongoing war, development of this system is actively continued.

**Keywords:** Chornobyl NPP, Object “Shelter”, dose rate, radiation survey, radiation mapping, robotic systems, UGV.

**Ключові слова:** Чорнобильська АЕС, об’єкт «Укриття», потужність експозиційної дози, радіаційна розвідка, радіаційне картографування, роботизовані системи, БНТЗ.

Перетворення об’єкту «Укриття» на екологічно безпечну систему вимагає проведення робіт по приведенню паливовмісних матеріалів (ПВМ) в контрольований стан. Планування робіт в об’єкті «Укриття» ставить виклики у вигляді небезпечного середовища, смертельно високих радіаційних полів, складності фізичного доступу та деградації конструкцій.

Задля розробки планів безпечного виконання робіт необхідно виконати моделювання приміщень «Укриття».

У роботі було виконано аналіз картограм та фотографій зроблених ліквідаторами в ході ліквідації наслідків запроектої аварії на 4 енергоблоці Чорнобильської АЕС. На основі проаналізованих даних та за допомогою методу

просторової інтерполяції Крігінг було побудовано карту забруднення нульової відмітки.

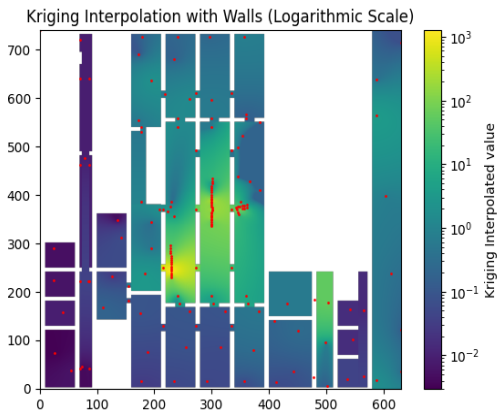


Рис. 1. Карта радіаційного забруднення нульової відмітки об'єкту «Укриття»

Також на основі проаналізованих даних побудовано детальну 3D реконструкцію приміщень нульової відмітки об'єкту «Укриття». Точне візуальне відтворення середовища дає можливість ознайомити персонал з ним при плануванні робіт. Ознайомленість працівників з середовищем призводить до швидшого прийняття рішень, що є необхідністю під час роботи в умовах підвищеного ризику.

Створена віртуальна модель приміщень об'єкту «Укриття», дозволяє ефективно використовувати робототехніку шляхом доповнення даних навігаційних сенсорів робота 3D моделлю оточення. В свою чергу робот, виконуючи розвідку в небезпечному середовищі доповнює та оновлює дані про радіоактивне забруднення.

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України в кооперації з Інститутом проблем математичних машин та систем НАН України та Університетом Брістоля працює над роботизованою системою радіаційної розвідки на основі чотириногих роботів. Маневреність таких роботів, а саме їх здатність долати сходи, пороги та нерівні поверхні, робить їх унікально пристосованим для задач розвідки на промислових об'єктах. Моделі чотириногих роботів «Unitree GO1» та «Boston Dynamics SPOT» споряджені різними системами вимірювання радіації, були успішно випробувані в умовах ЧАЕС.

У поєднанні з даними радіаційного картографування, створена 3D модель може вже бути використана у якості тренажеру для персоналу, що виконує роботи в цих приміщеннях. Незважаючи на виклики зумовлені війною, розробка системи продовжується, поступово моделюються наступні відмітки об'єкту укриття та ведуться роботи з інтеграції в систему робототехніки за допомогою Robot operating system (ROS).

**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**

**X Міжнародна конференція**

**ПРОБЛЕМИ ЗНЯТТЯ  
З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ  
ТА ВІДНОВЛЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**Tenth International Conference  
on Nuclear Decommissioning  
and Environment Recovery  
INUDECO 25**

**(25–26, 29-30 квітня 2025 року, м. Славутич)**

**Збірник матеріалів**

Комп'ютерна верстка і макетування

О. П. Журко

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. – 8,5.

Тираж 100 пр. Замовлення № 21/25.

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського національного технологічного університету  
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Свідцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,  
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції  
серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.