

СЛАВУТИЦЬКА МІСЬКА РАДА  
КИЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

**VI Міжнародна конференція**

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

**Sixth International Conference  
on Nuclear Decommissioning  
and Environment Recovery  
INUDECO 21**

(27–29 квітня 2021 року, м. Славутич)

Збірник матеріалів

Чернігів  
НУ «Чернігівська політехніка»  
2021

УДК 621.039

П78

Друкується за Рішенням виконавчого комітету Славутицької міської ради Київської області від 23.03.2021 №109 «Про проведення VI Міжнародної конференції INUDECО 21».

**Проблеми** зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення П78 навколишнього середовища (INUDECО 21) : збірник матеріалів VI Міжнародної конференції (27–29 квітня 2021, м. Славутич). – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – 312 с.

ISBN 978-617-7932-10-8

Збірник матеріалів VI Міжнародної конференції «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища», яка пройшла 27-29 квітня 2021 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 Славутицької 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" Славутицької міської ради Вишгородського району Київської області.

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

#### **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:**

Линкевич Олександр – заступник міського голови м. Славутича з питань діяльності виконавчих органів ради;

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

##### **Члени оргкомітету:**

Сейда Валерій – в.о. генерального директора ДСП «Чорнобильська АЕС»;

Костюк Сергій – Голова агентства України з управління зоною відчуження;

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

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

Удовиченко Володимир – президент ВГО «Клуб мерів»

Лавренов Данило, виконавчий секретар Українського ядерного товариства

Шикун Віталій – директор ВП «Атомремонтсервіс».

УДК 621.039

ISBN 978-617-7932-10-8

## ЗМІСТ

<i>Dr. Andreas Wetzig, Dr. Patrick Herwig, Dr. Achim Mahrle, Daniel Mai, Prof. Dr. Christoph Leyens, Cécile Javelle, Dr. Norbert Molitor, Viktor Krasnov, Maxim Saveliev</i> Preliminary results on dry cutting for segmentation of non-homogeneous FCM at CHNPP unit 4 with advanced laser-technologies .....	8
<i>Bernd Kratz, Florian Wieduwilt, Maxim Saveliev, Cécile Javelle</i> Methods and components to mitigate the radioactive aerosol contamination risks for the Chernobyl NSC .....	10
<i>David Corbett</i> 30 years of EU – Ukraine cooperation in nuclear safety improvement.....	13
<i>Jake Hecla, Kalie Knecht, Kai Vetter, Tenzing Joshi, Andrew Haefner, Ryan Pavlovsky</i> Three-dimensional radiation mapping at chernobyl nuclear power plant.....	15
<i>Peter Martin, Tom Scott, David Megson-Smith, Yannick Verbelen, Maxim Saveliev, Daria Muliar</i> Ukraine-UK research: developing enhanced radiation detection and robotic systems for nuclear security, site decommissioning and post radiological incident response.....	19
<i>Agiyenko M. Yu., Nerush K. Yu., Trunova O.V.</i> Web resource "Department of information technologies and software engineering" Chernihiv polytechnic university .....	28
<i>Беженар Р., Железняк М., Кірєєв С., Веремєнко Д., Насвіт О., Гудков Д., Канівець В., Лантєв Г., Процак В., Sakaguchi A., Nanba K., Wada T., Kanasashi T.</i> Радіоактивне забруднення водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС від моменту аварії до сьогодні: порівняння результатів моделювання з вимірами .....	32
<i>Бєгун В. В., Волошин П. О.</i> Проблеми ліквідації тяжкої аварії у 1986 році та сучасності .....	36
<i>Бойко В., Міскевич І.</i> Концепція гібридної низьковуглецевої енергетики – основа сталого розвитку держави .....	42
<i>Братухін І.</i> Нові технічні рішення модернізації для ТГ типу ТВВ-1000-2УЗ.....	45
<i>Бурмака І. А., Дорош М. С.</i> Оптимізація використання обчислювальних ресурсів розподіленою системою виявлення вторгнень на основі blockchain .....	47
<i>Voytiv M.</i> What is the future of the nuclear sector in Ukraine? .....	51
<i>Габєлков С. В., Долін В. В., Жиганюк І. В., Зубко О. В., Краснов В. О.</i> Лабораторна установка для дослідження фізико-хімічних процесів у поровому просторі лавоподібних паливовмісних матеріалів.....	56
<i>Габєлков С. В., Долін В. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Слівінський В. М., Чиколовець С. О.</i> Лавоподібні паливовмісні матеріали НБК-ОУ. чорна кераміка. електрона мікроскопія.....	61
<i>Габєлков С. В., Жиганюк І. В., Краснов В. О., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Чиколовець С. О.</i> Мікротвердість та тріщиностійкість лавоподібних паливовмісних матеріалів НБК-ОУ .....	66

<b>Габелков С. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Скорбун А. Д., Чиколовець С. О.</b> Методика аналізу даних рентгенівської дифракції для визначення фазового складу лавоподібних паливовмісних матеріалів 4-го блоку чорнобильської атомної електростанції.....	71
<b>Габелков С. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Скорбун А. Д., Чиколовець С. О.</b> Методика кількісного аналізу даних рентгенівської дифракції у застосуванні до ЛПВМ .....	75
<b>Godun R.</b> Assessment of neutron detectors' informativity inside the “Shelter” object .....	79
<b>Городецький Д. В., Деренговський В. В., Кафтанагіна О. А., Меньшенін Є. А., Павловський Л. І., Паскевич С. А., Рудько В. М.</b> Прогнозна оцінка сукупних радіаційних впливів на довкілля радіаційно-небезпечних об'єктів чорнобильської зони відчуження у короткостроковій та середньостроковій (до 2030 року) перспективі.....	80
<b>Грехов М., Хоменко Д.</b> Сховище відпрацьованого ядерного палива -2 .....	83
<b>Гріза В. А.</b> Культурна спадщина як інструмент диверсифікації історії атомограду Славутич .....	84
<b>Дорошенко А. О. Муляр Д. О.</b> Оцінка ефективності систем оперативного контролю підкритичності об'єкта «Укриття».....	87
<b>Єгоров В. В., Павловський Л. І., Хоменко Д. О., Брилка С. Г.</b> Зміни радіаційних умов на промисловому майданчику НБК-ОУ.....	90
<b>Ємельяненко Я., Мирний С.</b> Чорнобильський туризм – необхідна складова системи подолання негативних наслідків аварії на ЧАЕС та відродження Чорнобильської зони, регіону і міста Славутич.....	93
<b>Інюшев В. В., Масько О. М., Боднар О., Боднар І.</b> Аналіз безпеки централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива АЕС України .....	95
<b>Казимиров О. С., Беккер Б. І., Євсєєв В. Р., Ієвлєв С. М., Чорний Є. В.</b> Перспективна система звільнення радіоактивних відходів від регулюючого контролю .....	98
<b>Калиновський О., Краснов В., Філіппов О.</b> Неорганізований викид радіоактивних аерозолів через легку покрівлю об'єкта "Укриття" в 1998 - 2019 рр.....	107
<b>Касперович І., Медінцов В.</b> Централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива.....	109
<b>Коваленко І. О., Панасюк М. І., Сосонна Н. В., Левін Г. В., Люшня П. А., Одінцов О. О., Паламар Л. А., Онищенко І. П.</b> Умови формування радіоактивного та хімічного складу підземних вод на промайданчику Чорнобильської АЕС .....	113
<b>Коваленко А., Сакаль О.</b> Еколого-економічні проблеми розвитку чорнобильських територій .....	117
<b>Ковальчук І. А., Корнілович Б. Ю., Тобілко В. Ю., Спасьонова Л. М., Бащак О. Є.</b> Очищення мінералізованих вод від урану з використанням стабілізованого нанорозмірного нульвалентного заліза.....	120



<b>Кондратенко С, Поплигін С., Свєрчков С.</b> Статус виконання робіт з дослідно-промислової експлуатації НБК, планування раннього демонтажу нестабільних конструкцій .....	121
<b>Корнєва О. А.</b> Екологічна безпека Чорнобильської зони відчуження. проблеми та шляхи їх вирішення .....	127
<b>Краснов В. О., Носовський А. В., Павлюченко М. І</b> Дослідження стану полімерного покриття для пригнічення радіоактивних аерозолів в комплексі НБК-ОУ .....	131
<b>Краснов В. О., Носовський А. В., Павлюченко М. І.</b> Програма моніторингу паливовмісних матеріалів і перспективи її реалізації до початку робіт з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» .....	134
<b>Круковський П., Склярєнко Д., Дядюшко Є., Кондратенко С., Кузьменко В.</b> Аналіз і керування низьким викидом повітря із нового безпечного конфайнмента в оточуюче середовище .....	137
<b>Кряжич О., Коваленко О.</b> Удосконалення способу опису радіоактивно забрудненої території з використанням методу можливих напрямків .....	141
<b>Куба І. Ю., Власенко М. І., Балашєвський О. С., Рибалка В. Б.</b> Успіхи кондиціонування РАВ.....	144
<b>Кузьменко Ю. І., Гавловська Л. В., Лев Т. Д.</b> Моделювання ландшафтних пожеж в Чорнобильській зоні відчуження на основі ГІС-технологій .....	148
<b>Кулик Є.</b> Ремонт ядерного палива в умовах АЕС за допомогою стенду інспекції і ремонту палива (СІРП).....	152
<b>Купріянчук С. В., Безмилов В. М., Михайлов О. В., Шаблій Т. О.</b> Аналіз методів визначення ядерних матеріалів у гетерогенних середовищах з високоактивними відходами .....	153
<b>Кутіна І., Бєртхольд А., Весєлов Є., Кондратьєв С., Кюхлер Л., Склярєнко В.</b> Дослідження факторів, які визначають безпечний стан об'єкта «Укриття» в період експлуатації нового безпечного конфайнмента .....	156
<b>Лев Т. Д., Кузьменко Ю. І., Гавловська Л. В., Піскун В. М.</b> Ідентифікація паливних шарів для рішення задачі розповсюдження фронту лісових пожеж в Чорнобильській зоні відчуження на основі моделі ротермєла .....	159
<b>Македон В. В., Власенко М. І., Балашєвський О. С., Рибалка В. Б.</b> Дослідження ступеню вилуговування зразків осклованих РРВ методом подрібнення .....	168
<b>Мамчич Ю. Р.</b> Обґрунтування консервативного розподілу ізотопного складу в ТВЗ ВВЕР-440 для аналізу ядерної безпеки систем зберігання палива .....	172
<b>Машиністов В., Балакін В. Коверя А.</b> Забезпечення радіаційної безпеки при застосуванні технології рециклінгу радіоактивно забрудненого металу з використанням ефекту самодезактивації.....	189
<b>Новіков А. М.</b> Багаторічна динаміка значень швидкості осадження <sup>90</sup> SR за даними вимірювань в Києві та Чорнобилі після чорнобильської аварії....	198

<b>Носовський А. В., Паскевич С. А., Стельмах Д. А., Кучинський В. К.</b> Новий навчальний курс підвищення кваліфікації фахівців за спеціальністю «Зняття з експлуатації ядерних установок» .....	201
<b>Одінцов О. О., Хан В. Е., Паламар Л. А., Сабенін П. В.</b> Сучасний стан неорганізованих скупчень радіоактивно забрудненої води в підреакторних приміщеннях об'єкта «Укриття» .....	206
<b>Паскевич С. А., Підберезний С. С.</b> Оцінка радіаційного ризику в реальному часі з підтримкою тривимірного моделювання роботи в радіоактивному довкіллі.....	210
<b>Паскевич С., Скітер І., Деренговський В.</b> Моделювання інтегрального коефіцієнту інвестиційного потенціалу регіону .....	219
<b>Пиляк Н. В., Крутякова В. І., Нікіпелова О. М.</b> Застосування мікробних біопрепаратів для відновлення природної рівноваги .....	226
<b>Присяжнюк А. Є., Базика Д. А., Гудзенко Н. А., Фузік М. М., Троцюк Н. К., Федоренко З. П., Гулак Л. О., Рижов А. Ю., Бабкіна Н. Г., Хухрянська О. М., Горох Є. Л., Даневич С. А.</b> Особливості рівня, структури та динаміки захворюваності на злоякісні новоутворення постраждалих внаслідок аварії на ЧАЕС у віддалений післяаварійний період.....	229
<b>Прістер Б. С., Лев Т. Д., Талерко М. М., Піскун В. Н.</b> Радіоекологічне районування території впливу Чорнобильської зони відчуження з оцінкою ступеня потенційної критичності .....	232
<b>Рибалка В. Б.</b> Невивчені уроки Чорнобиля та Фукусими.....	241
<b>Rovnyk O. S., Trunova O. V.</b> Information system for recognition and processing of primary project information.....	245
<b>Розко А. М., Федоренко Ю. Г., Ольховик Ю. О.</b> Особливості застосування геополімерних зв'язуючих для кондиціонування РРВ.....	248
<b>Rudniev D.Ya., Fokin K.M., Trunova O.V.</b> Automated testing system for determination of the UI/UX designers level of competence.....	251
<b>Савельєв М., Скітер І.</b> Аналіз аномалій щільності потоку нейтронів в системі контролю ядерної безпеки паливно-вмісних матеріалів.....	254
<b>Sinenko B. V., Ruban Y. V.</b> Impact of the accident at the Chornobyl NPP on modern computer game industry.....	257
<b>Смірнова Г. Ф., Петелін Г. І., Сербінович В. В., Рибалка В. Б.</b> Дослідження культур мікроорганізмів, що здатні розчиняти відпрацьоване ядерне паливо.....	259
<b>Соловійов Ю.</b> Обстеження опроміненого ядерного палива за допомогою стенду інспекції і ремонту палива (СІРП) .....	263
<b>Старовойтова А.</b> Славутич – місто-коворкінг, відкрите до інновацій.....	265
<b>Sushko V., Bazyka D, Likhtarev Il., Loganovskiy K., Lyashenko L., Berkovskiy V., Nechaev S., Kolosynska O., Shvayko L., Perchuk I., Nezgovorova G., Iliencko I.</b> Program for radiation and health safety of personnel of contractors enterprises, which participated in works for construction new safe confinement of object ``Shelter'' of SSE Chernobyl NPP`` (15 years of experience and inovations) .....	276

<i>Sushchenko K., Godun R.</i> Comprehensive analysis and interpretation of a neutron incident registered at the peripherals of nuclear dangerous fissile materials cluster in june 1990 .....	278
<i>Талерко М. М., Лев Т. Д., Кащур В. О., Яценко Ю. В.</i> Моделювання радіоактивного забруднення атмосфери під час лісових пожеж та пилової бурі у зоні відчуження в 2020 р. ....	280
<i>Тищенко О. Г., Ландін В. П., Цидик Н. М.</i> Ефективність застосування методів супутникового моніторингу для оцінки ушкодження рослинності внаслідок пожежі.....	283
<i>Толмачов М. Г.</i> Утилізація радіоактивно - забрудненої деревини методом газифікації .....	288
<i>Chernysh Ye., Plyatsuk L., Shtepa V., Skydanenko M., Kononenko M., Tsutsumiuchi Kaname</i> Innovative technologies for increasing environmental safety of atomic energy complex .....	291
<i>Shikun V.</i> Separate entity "Atomremontservice" - 20 years of evolution ....	296
<i>Шинкаренко В. К.</i> До питання фіксації паливних часток в зразках мулу з водойми-охолоджувача ЧАЕС.....	297
<i>Шинкаренко В. К., Кащур В. О., Скоряк Г. Г.</i> Об'ємна активність <sup>137</sup> сз в повітрі ближньої зони ЧАЕС в 2019 році.....	301
<i>Ярмілко А., Нікітюк В.</i> Імітаційне моделювання консолідованого руху автономних агентів .....	304
<i>Nanba K., Nacvim O., Igarashi Y., Железняк М., Кірєєв С.</i> Досвід реабілітації зони відселення в префектурі Фукусіма на основі результатів радіоекологічних досліджень та його впровадження для Чорнобильської зони відчуження в рамках японсько – українського проекту SATREPS .....	308

# PRELIMINARY RESULTS ON DRY CUTTING FOR SEGMENTATION OF NON-HOMOGENEOUS FCM AT CHNPP UNIT 4 WITH ADVANCED LASER-TECHNOLOGIES

*Dr. Andreas Wetzig, Dr. Patrick Herwig, Dr. Achim Mahrle, Daniel Mai, Prof. Dr. Christoph Leyens, Fraunhofer IWS Dresden (Germany); Cécile Javelle, Dr. Norbert Molitor, Plejades GmbH – Independent Experts (Germany); Viktor Krasnov, Maxim Saveliev, Institute of Safety Problems of Nuclear Power Plants of NASU (Ukraine)*

**Abstract:** The Chernobyl Nuclear Power Plant (ChNPP) Unit 4 nuclear accident has created an unprecedented amount of radioactive waste that is yet to be handled ultimately for safe disposal. Several hundreds of cubic meters of materials containing nuclear fuel (fuel containing materials - FCM) are mixed with reactor debris under the shelter now covered by the New Safe Confinement (NSC). The FCM must be fragmented for safe conditioning, in a dry environment where human intervention is severely restricted for radiological and industrial safety reasons.

High-power solid state laser technology provides an alternative for a good effective, efficient, and safe remote solution for dry segmentation of FCM. A R&D project was started to develop a practicable tool for the ChNPP Unit 4 FCM inventory.

First cutting trials in Fraunhofer IWS laboratory with massive igneous rocks are described. They show promising results on cutting performance and dust generation. Fragmentation of small pieces from large blocks is in principle possible.

Further trials are planned with massive rock materials and corium simulants. In Ukraine, the ISP NPP is currently studying the container requirements and maximum size of content to avoid criticality. The second axis of development consists in developing the ancillary equipment required to bring the laser tool to its work location in deeper levels of the former ChNPP reactor building.

**Keywords:** Laser-cutting, corium, fuel containing materials, Chernobyl NPP Unit

## **Authors' Information**

**Andreas Wetzig** – PhD, Business unit manager for laser cutting and ablation at the Fraunhofer IWS in Dresden, Germany; e-mail: andreas.wetzig@iws.fraunhofer.de

Major Fields of Scientific Research: Mechanical Engineering, Laser-Cutting processes

**Patrick Herwig** – PhD, Researcher, Team leader of the laser cutting group at Fraunhofer IWS in Dresden, Germany; e-mail: Patrick.Herwig@iws.fraunhofer.de

Major Fields of Scientific Research: Mechanical engineering, Laser-cutting processes

**Achim Mahrle** – PhD, Researcher, team leader of the process design and analysis group at Fraunhofer IWS in Dresden, Germany; e-mail: Achim.Mahrle@iws.fraunhofer.de

Major Fields of Scientific Research: Thermal engineering, Modelling, Process design

**Daniel Mai** – State-certified technician for mechanical engineering, Researcher at Fraunhofer IWS in Dresden, Germany; e-mail: Daniel.Mai@iws.fraunhofer.de

Major Fields of Scientific Research: Laser manufacturing processes

**Christoph Leyens** – PhD, Director of Fraunhofer IWS in Dresden, Germany; e-mail: Christoph.Leyens@iws.fraunhofer.de

Major Fields of Scientific Research: Material Science

**Cécile Javelle** – Dipl. Ing, MSc, Project Manager, Plejades GmbH – Independent Experts in Griesheim, Germany; e-mail: cecilejavelle@pleja.de

Major Fields of Scientific Research: Radiation protection, Radwaste Management

**Norbert Molitor** – PhD, Researcher, Plejades GmbH – Independent Experts in Griesheim, Germany; e-mail: norbertmolitor@pleja.de

Major Fields of Scientific Research: Process engineering, mining engineering

**Viktor Krasnov** – Head of Division for Nuclear and Radiation Safety of Institute of Safety Problems of Nuclear Power Plants of NASU, Ukraine; e-mail: v.krasnov@i.ua

Major Fields of Scientific Research: The Shelter Object, Fuel Containing Materials

**Maxim Saveliev** – PhD, Senior Researcher, Institute of Safety Problems of Nuclear Power Plants of NASU; e-mail: m.saveliev@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: The Shelter Object, IT in Nuclear Decommissioning, Requirements Evolution, System Analysis, System-of-Systems

# METHODS AND COMPONENTS TO MITIGATE THE RADIOACTIVE AEROSOL CONTAMINATION RISKS FOR THE CHERNOBYL NSC

*Bernd Kratz, Florian Wieduwilt, Maxim Saveliev, Cécile Javelle*

**Abstract:** The construction of the New Safe Confinement (NSC) poses many challenges for the future. Working steps on many different scales and scopes must be monitored and secured in order to reliably protect the personnel and the entire operation in the long term. In the context of this conference contribution the procedure of the buildup of an early detection forecast system to mitigate the radioactive aerosol contamination risks for the Chernobyl NSC is described and explained.

**Keywords:** A.I based radioactive aerosol forecast.

## **Introduction**

The construction of the NSC is one of the fundamental transformation stages of the 4th reactor of the Chernobyl Nuclear Power Plant towards a safer future. The NSC is designed to prevent the release of contaminated material as well as water intrusions and to protect the reactor from external influences during the dismantling works.

During the construction and run time of a such a complex operation, air-spraying of accumulated radioactive materials and formation of radioactive aerosols are going to take taking place. A large amount of dust will be re-suspended by the dismantling works and release radioactive aerosols in the NSC. The inhalation of such radioactive aerosols is one of the major radiation-damaging factors of the personnel working at the site.

It is a key task to reduce this latent potential danger to the personnel. This can be realized by setting up a versatile early detection forecast system.

## **SETTING UP AN EARLY DETECTION FORECAST SYSTEM**

The risk of a radioactive contamination can be reduced by an accurate early detection forecasts system for the locations and concentrations of radioactive aerosols.

Based on adapted rapid Computational Fluid Dynamic (CFD) models integrated within artificial intelligent algorithms, an information system for early detection, prediction and assessment of the consequences of radioactive aerosol exiting out the old sarcophagus of destroyed Unit 4 of Chernobyl Nuclear Power Plant will be developed. The system will utilize the real-time data flow from a newly designed distributed autonomous rapidly deployable wireless network of detectors and the data of existing control and management systems to deliver an instant response to nuclear accidents and incidents associated with the release of radioactive aerosols.

The system has to meet certain and essential requirements. It consists of several layers of methods and components, that are necessary to build and operate an early detection forecasts system, especially when aiming for a long time period.

It has to be adaptive and updated continuously, because the dismantling works continuously changes the aerosol flow model in the NSC.

A schematic representation of the complex structure for the aspired forecast system is shown in Figure 1.

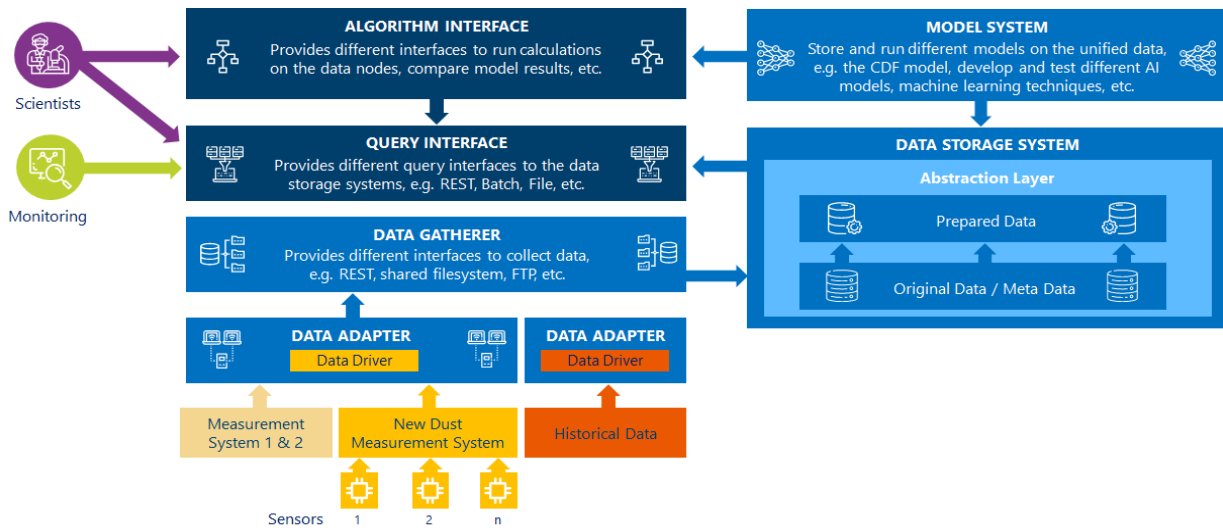


Figure 1. Birds view of the forecast system

In order for this system to produce reliable and accurate results, data maintenance is a key part of the entire process, more specifically the Continuous Quality Assurance (CQA).

This includes scientists developing and updating the aerosol flow model in the NSC and the forecast algorithm according to the dismantle work. The system should provide methods and components to measure and assure the quality of the aerosol flow models and the forecast algorithms in the NSC.

Continuous monitoring of the quality of the model and the forecast algorithms is needed, as shown with an example from the field of weather forecasting in Figure 2. It demonstrates the wind speed (right y-axis) correlating with the respective generation of electricity (left y-axis) over the course of a month from the first of November to the thirtieth of November in 2014 from a wind farm in the North Sea region in Germany. In case of unexpected deviations, discrepancies between the black curve (measurement data) and the green curve (forecast data), a warning is issued by the system.

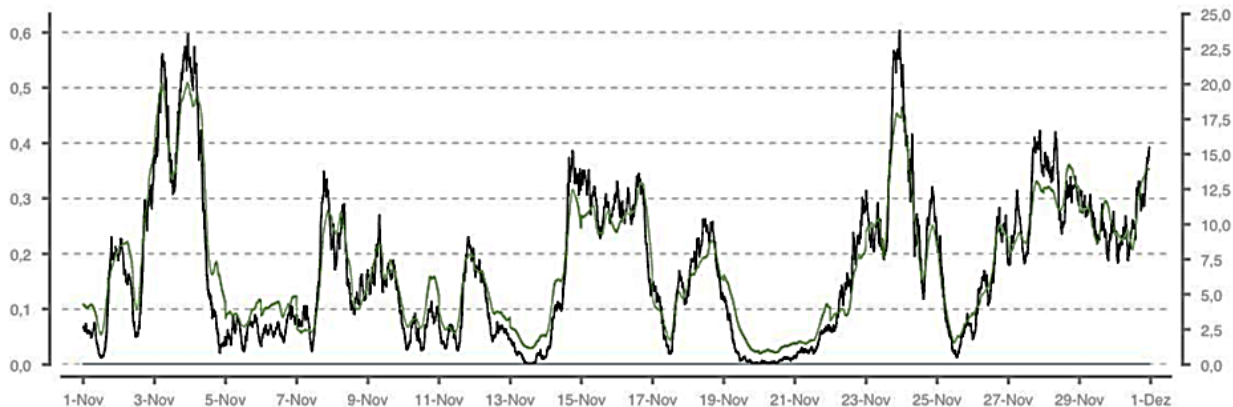


Figure 2. Reconciliation of measured data with predicted data

Further the challenges of long-term support of the forecast system, the abstraction as a design pattern, aspects of how to achieve a long running IT-

landscape through abstraction and the benefits of this solution will be addressed by means of the presentation.

Figure 3 presents an outlook on a possible future-proof IT-landscape constructed from module groups with scalable and interchangeable system units.

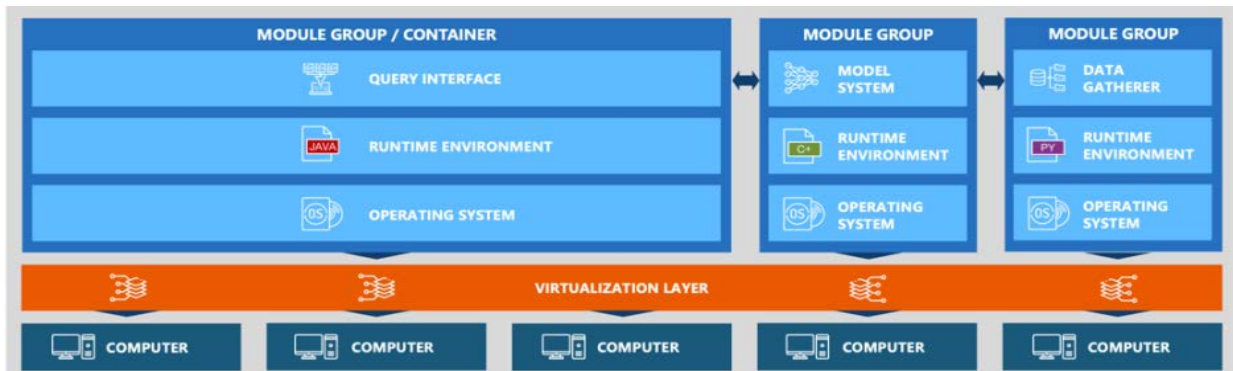


Figure 3. The different virtualization layers

### Conclusion

To protect and support the personnel from the risk of a contamination via radioactive aerosols released out from the "Shelter" Object (SO), also known as "The Sarcophagus" during the construction and run time of the NSC, an accurate and reliable early detection forecasts system of the locations and concentrations of radioactive aerosols needs to be developed.

It will be based on adapted rapid Computational Fluid Dynamic models integrated within artificial intelligent algorithms and will thereby provide opportunities for early detection, prediction and assessment of the consequences of the radioactive aerosol exiting out. To feed the system with a real-time data flow a newly designed distributed autonomous rapidly deployable wireless network of detectors integrated with existing control and management systems will be created.

### Authors' Information

**Bernd Kratz** – Founder and Managing Director of Castalytics GmbH, Germany; e-mail: b.kratz@castalytics.de

Major Fields of Scientific Research: Software Engineering, Artificial Intelligence and Machine Learning Applications, Pattern Recognition in Big Data

**Florian Wieduwilt** – PhD candidate, Research Associate, Institut für Nanophotonik Göttingen e.V., Castalytics GmbH, Germany; e-mail: f.wieduwilt@castalytics.de

Major Fields of Scientific Research: Analytical Chemistry, Optical Spectroscopy Methods, Photonic Sensor Technology, Methodology Development

**Maxim Saveliev** – PhD, Senior Researcher, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of NASU; Institute of Mathematical Machines and Systems Problems, Ukraine; e-mail: m.saveliev@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: The Shelter Object, IT in Nuclear Decommissioning, Software Engineering, Automated System Life Circle Models, Requirements Evolution, System Analysis, System-of-Systems

**Cécile Javelle** – Dipl. Ing, MSc, Project Manager, Plejades GmbH – Independent Experts in Griesheim, Germany; e-mail: cecilejavelle@pleja.de

Major Fields of Scientific Research: Radiation protection, Radwaste Management



## **30 YEARS OF EU – UKRAINE COOPERATION IN NUCLEAR SAFETY IMPROVEMENT**

*David Corbett*

Through the implementation of Technical Assistance to the Commonwealth of Independent States (TACIS) 1991 to 2006, and the Instrument for Nuclear Safety Cooperation (INSC) 2007 to 2020, the European Union has contributed more than EUR 1 billion to supporting Ukraine in the improvement of nuclear safety. In the aftermath of the 1986 Chernobyl accident, priority was given to the safety upgrade of the nuclear power plants and the urgent measures to make the Chernobyl area safe again. Building on the experience of the EU Member States, support was focussed on transferring sustainable capability and knowhow, improved nuclear safety culture and establishing a long-term radioactive waste management strategy.

After 30 years of cooperation, we should reflect on the results achieved and challenges ahead.

### **1. Support to the Nuclear Operator (SE “NNEGC “Energoatom”)**

Support to nuclear power plants at an early stage has been successful and the nuclear safety upgrades recognised at international level. Between 2007 and 2012 cooperation with Ukraine’s Nuclear Operator refocussed from technical assistance to cooperation in the delivery of softer issues in regard to supporting Energoatom in their companywide improvement programme for nuclear safety culture. This involved the implementation of a wide range of INSC projects, from supporting the establishment a Centralised Training Centre for the training and certification of the company’s maintenance personnel and the establishment of a Management Training Academy, through to the development of Severe Accident Management Guidelines and Human Factors improvement. The results of a joint Energoatom/EC/IAEA Safety Review, which was implemented in 2010, found the level of safe operation of Ukrainian NPPs to be comparable with those in Europe, thus support to Energoatom was Phased out in 2012. The currently ongoing comprehensive safety upgrade programme of Energoatom’s fleet of reactors is co-financed by a joint loan from EURATOM and EBRD, totalling EUR 600 million.

### **2. Contribution to Chernobyl funds**

The European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) has managed international contributions to support extensive safety improvement within the Chernobyl Exclusion Zone, through two dedicated funds: the Chernobyl Shelter Fund (CSF) and the Nuclear Safety Account (NSA). After the EBRD, the EU has been the biggest contributor to those funds. The New Safe Confinement (NSC) has been financed by the CSF (some EUR 1.5 billion), whilst the NSA has financed waste treatment and storage facilities, e.g., the Liquid Radwaste Treatment Plant and ISF2. The NSC was handed over to Ukraine in July 2019, whilst the ISF-2 is scheduled to be handed over to Ukraine in April 2021. This important milestone will mark the completion of the G7 commitment in addressing the Chernobyl legacy.

### **3. Support to regulatory authority**

EU support to the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine (SNRIU), has been and remains of primary importance to guarantee that nuclear facilities are operated safely under the control of an independent and competent body. The independence of the regulator was challenged in 2015 following Ukraine’s adoption of a wide-ranging law focused against corruption. Regulatory independence was

reinstated in 2020 by the adoption of a dedicated law. The EC consider continued EU support to the Regulatory to be of high importance through the new European Instrument for Nuclear Safety cooperation (2021 to 2027). New projects for 2021 are currently under consideration.

#### 4. Support to radioactive waste management

In the area of Radioactive waste management future support to Ukraine will aim to continue its focus on supporting the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine and the State Agency for Exclusion Zone Management in the implementation of the country’s radioactive waste management strategy, in line with EU standards. In 2018, the State Agency secured access to Ukraine’s Radioactive Waste Management fund for the financing of projects to strengthen the countries radioactive waste management infrastructure. The fund, which is financed by the Radioactive waste producers, will secure the much-needed resources to further develop an appropriate infrastructure for the safe management, storage and in the longer term, disposal of the countries radioactive waste and spent nuclear fuel.

Ukraine’s nuclear operator currently generates over 50% of the county’s electricity demand, which is of key importance to Ukraine’s economy, but is also makes a significant contribution to reducing Europe’s carbon emissions. As we are all aware, carbon reduction is key to the mitigation of global warming and protection to the environment as a whole. Nuclear Energy will be a key player in achieving goals set out by the Paris accord, but the benefits of nuclear energy can only be achieved if the industry is properly managed. This means that in parallel with ensuring sustainable energy, we ensure that safety to people and the environment is maintained to the highest standards. We have to recognise that safe management of radioactive waste and spent nuclear fuel is requires the same levels of consideration and commitment as safe generation.

Recognising there remain a number of projects to be implemented in preparation for ChNPP decommissioning, the potential need to shut down and decommission the countries older VVER Units within the next 10 to 20 years and not forgetting the significant volumes of radioactive waste within the Chornobyl Exclusion Zone, it is time to focus on much needed priorities.

Since 1991, EU financial contributions to Ukraine’s nuclear safety improvement programme includes by Sector

Operator	€248M
Design Safety	€44 M
Radioactive Waste Management	€166 M
Regulatory Authority	€68 M
Chornobyl (Contributions to EBRD Accounts)	€487 M
Global Partnership	€2 M
Horizontal Issues	€36 M

It is hoped that financial resources available within Ukraine’s Radioactive Waste Management Fund, combined with extended financial support of the international donor community, those much needed priorities can be achieved and set in place, such that the ever increasing demands of Ukraine’s nuclear industry can be met.

#### **Authors' Information**

**David Corbett** - Joint Support Office, European Commission, Nuclear Safety Programme in Ukraine, Kyiv, d.corbett@jso.kiev.ua

# THREE-DIMENSIONAL RADIATION MAPPING AT CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT

*Jake Hecla<sup>1</sup>, Kalie Knecht<sup>1</sup>, Kai Vetter<sup>1,2</sup>, Tenzing Joshi<sup>2</sup>, Andrew Haefner<sup>2</sup>, Ryan Pavlovsky<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Department of Nuclear Engineering, University of California Berkeley, Berkeley, CA 94720, USA*

*<sup>2</sup>Applied Nuclear Physics, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA*

**Abstract:** A 3D radiation mapping technique known as “scene data fusion” (SDF) developed at Lawrence Berkeley National Lab (LBNL) may be used to provide detailed information on the distribution of radioactive material present in a given environment. To demonstrate this capability and explore its utility to assess radiological contamination and to guide cleanup activities, the compact localization and mapping platform (LAMP) in combination with CsI-based gamma-ray spectrometers and CdZnTe-based Polaris gamma-ray imaging system has been used in a hand-portable configuration to create 3D reconstructions of distributed source material in the Chernobyl Exclusion Zone and on the premises of the Chernobyl Nuclear Power Plant (ChNPP). These advanced radiation sensing platforms employ sensor fusion methods which integrate LIDAR, camera and radiation interaction data to develop rich, three-dimensional maps of radiological environments which are easily interpreted and provide information of value for work planning and dose minimization. In this series of measurements, multiple detection and imaging modalities are employed to localize photon emitters from 60keV-1MeV, demonstrating sensitivity to the vast majority of gamma emitters of concern which are present in the post-accident environment. We present a number of data products that demonstrate the capabilities of these systems and we discuss the potential impact of adopting such measurement systems for work in the zone.

**Keywords:** Scene-data-fusion, cadmium zinc telluride, LIDAR, sensor fusion, gamma ray spectroscopy, gamma-ray imaging

## **Background**

In areas with significant radioactive contamination, measurements mapping and quantifying the radiation environment are critical to minimizing the dose to personnel, understanding transport of radionuclides, and guiding decontamination and remediation. Traditional methods of contamination mapping using non-imaging radiation detectors requires long survey times, are often inaccurate, and can incur significant personnel dose.

Systems which can provide radiation data with context (“scene information”) offer significant advantages in improving understanding of a given radiation environment. Research at Lawrence Berkeley National Lab has developed the technique of “scene data fusion”, a methodology which fuses contextual sensor data with radiation interaction information to develop easily interpreted radiation maps for this purpose [1].

Handheld, highly portable systems which can generate such data products include the CsI-LAMP and Polaris-LAMP platforms, both of which have been used for mapping at ChNPP. The Polaris-LAMP system uses a commercially-available Polaris-H cadmium-zinc telluride (CZT) detector consisting of four clustered 20x20x10mm CZT crystals [2]. This detector platform is coupled to a LBNL-developed contextual sensor suite, the Localization and Mapping Platform (LAMP), which consists of a Velodyne Puck LIDAR module, GPS and onboard computer. These inputs are used by a simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithm based on Google Cartographer [3] which creates a map of the environment while recording detector position and orientation at approximately 10Hz .



Figure 1: [Left] The Polaris-LAMP platform with LIDAR system (top), camera, coded aperture mask (grey) and detector module (blue).

In the CsI-LAMP system, the contextual sensor package is instead coupled to a cluster of Cs(I) detectors which enable operation in higher dose-rate environments. However, this detector is capable of proximity mapping only, while the segmented CZT system can perform Compton and coded-aperture imaging (the latter using a MURA-type mask)[4]. In all modes, reconstructions are performed using iterative methods such as maximum-likelihood expectation maximization (MLEM).

### **Measurements**

A measurement campaign at Chernobyl Nuclear Power Plant (ChNPP) was undertaken to demonstrate the ability of the CsI-LAMP and Polaris-LAMP platforms to map a variety of complex radiation environments. Measurements

inside the reactor buildings were conducted with the assistance of the ChNPP staff and include areas such as the control room of reactor four, the main circulating pump areas, and the operating hall of reactor two. These locations were selected for their accessibility and importance to minimizing worker and visitor dose.

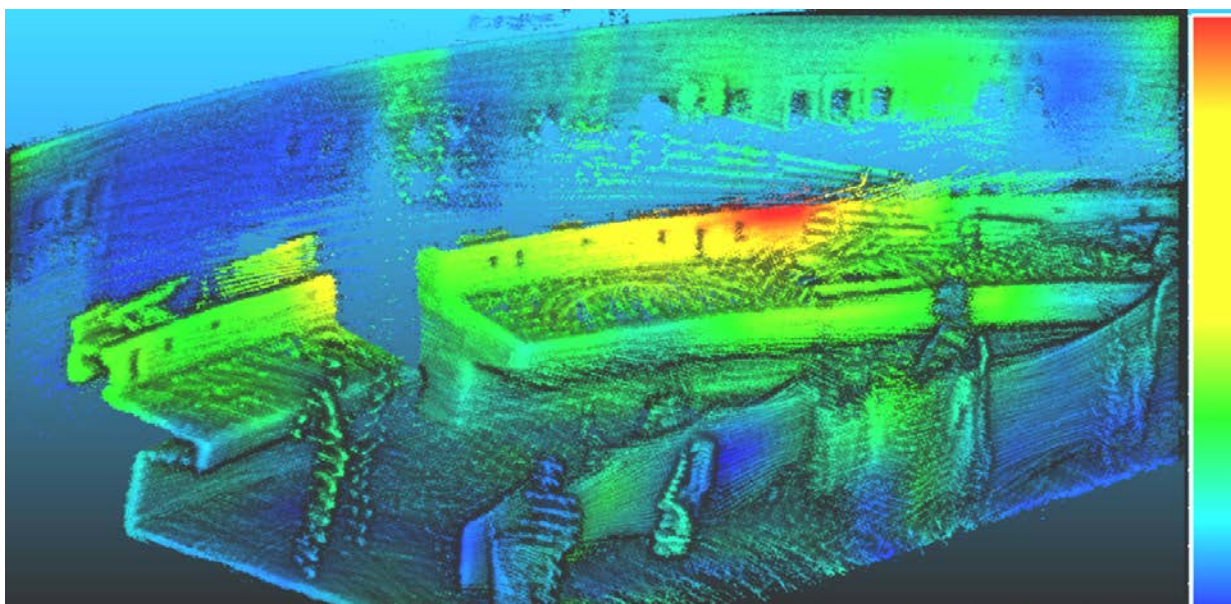


Figure 2: Oblique-angle coded aperture reconstruction of the control room of reactor four taken using the Polaris-LAMP detector. Note the hotspot at right, likely due to water infiltration carrying contamination, present on the rightmost control panel. A 90-100keV (scatter) window was used with 5 iterations of MLEM. Relative color scale indicates reconstructed intensity on a 0-1 scale. Motion artifacts from moving personnel are visible in front of the control panels.

Reconstructions were performed using Compton, coded aperture and proximity modalities using data derived primarily from LIDAR returns. The majority of the gammas detected during all portions of the measurement campaign were due to the 662keV emission line of  $^{137}\text{Cs}$ , which is optimally mapped using Compton imaging. Coded aperture reconstructions at the reactor and in the surrounding areas were primarily performed using down-scattered  $^{137}\text{Cs}$  gammas in the range of 70-120keV. All detectors experienced some degree of saturation in proximity to hotspots but were able to reconstruct maps useful for source localization and work planning. Fig. 2 shows a fused 3D map of the control room of reactor 4 which was obtained within a few minutes, clearly indicating contamination in a on a control panel. Fig. 3 illustrate a top-down view of the extended 3D fused radiation map of the reactor 2 operating floor.

Outdoor mapping efforts were likewise successful, but suffered more often from SLAM drift issues and loop-closure errors. This may be due to the lack of well-defined reflective surfaces found indoors. Dose-rates encountered outdoors were generally lower than dose-rates encountered in ChNPP facilities, and hotspots were typically spread over larger areas. However, due to the size of the LIDAR maps gathered, these measurements typically had to be subdivided to remain computationally tractable.



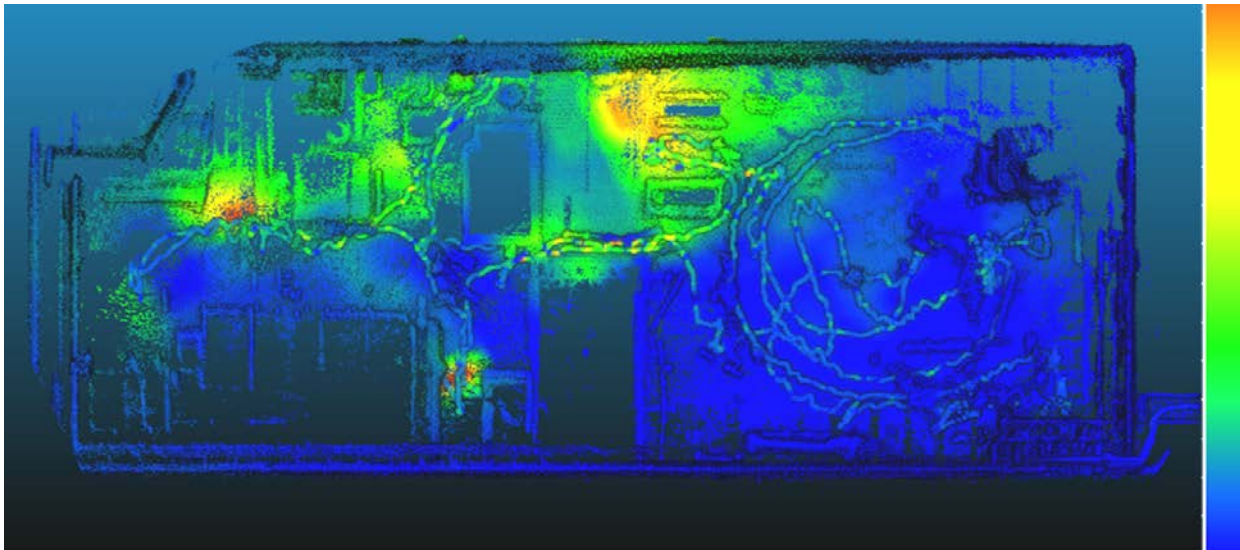


Figure 3: Coded aperture reconstruction of the ChNPP reactor 2 operating floor. This reconstruction uses 1m voxels with 5 iterations of MLEM, with a spectrum window focused on downscatter (90-100keV). The detector path is shown and colored by count-rate. Hotspots shown are likely due to activated or mildly contaminated equipment in the process of being removed.

### Conclusion

The Polaris-LAMP and CsI-LAMP platforms offer a rapid means of localizing and mapping gamma emitter contamination in the environment. As a tool for work planning and dose minimization, SDF systems offer significant reduction in the time needed to localize contamination and may therefore offer significant advantages over current methods. At ChNPP, SDF systems may be of use in characterizing the constantly changing radiation environments associated with ongoing disassembly of the reactor, limiting personnel dose and informing cleanup activities. Future work on all LAMP systems will address rate limitation issues that may impact the detector systems' utility in high radiation areas. For example, a compact CLLBC-scintillator based gamma-ray imaging has been built which allows to operate at  $>1\text{mSv/hr}$  environments and provides 3D mapping capabilities for neutrons as well. In addition, all LAMP-based SDF systems have been deployed remotely on unmanned systems such as ground robots or small drones.

### Bibliography

1. Barnowski, Ross, Andrew Haefner, Lucian Mihailescu, and Kai Vetter. "Scene data fusion: Real-time standoff volumetric gamma-ray imaging." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 800 (2015): 65-69.
2. Wahl, Christopher G., Willy R. Kaye, Weiyi Wang, Feng Zhang, Jason M. Jaworski, Alexis King, Y. Andy Boucher, and Zhong He. "The Polaris-H imaging spectrometer." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 784 (2015): 377-381.
3. Hess, Wolfgang, Damon Kohler, Holger Rapp, and Daniel Andor. "Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM." In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1271-1278. IEEE, 2016.
4. Fenimore, Edward E., and Thomas M. Cannon. "Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays." *Applied optics* 17, no. 3 (1978): 337-347.

# UKRAINE-UK RESEARCH: DEVELOPING ENHANCED RADIATION DETECTION AND ROBOTIC SYSTEMS FOR NUCLEAR SECURITY, SITE DECOMMISSIONING AND POST RADIOLOGICAL INCIDENT RESPONSE

*Peter Martin, Tom Scott, David Megson-Smith, Yannick Verbelen, Maxim Saveliev, Daria Muliar*

**Abstract:** The amount and distribution of nuclear and radioactive materials worldwide is growing – from new reactors and the decommissioning of legacy infrastructure. This safe management of harmful radiation sources is set within a landscape of ever-increasing global insecurity and volatility, with terrorist and state-sponsored groups seeking to utilise radiological dispersion devices against countries, populations and infrastructure. To manage this growing threat; protect populations, borders and assets; as well as enable expedited decommissioning of nuclear sites (such as ChNPP), this joint Ukraine-UK collaborative project (the outline of which is discussed in this article) will work to enhance the current detection, monitoring and response provision for radiation and radioactive materials.

**Keywords:** radiation, security, detection, robotics, threat-reduction, gamma-scanning.

## Introduction

Threat assessments continue to conclude that extremist and state-sponsored groups have the ambition and means to acquire and use unconventional weapons, including improvised nuclear explosive devices. Recent attacks on individuals and public events/spaces have highlighted such global vulnerability and the need for the next generation of radiological monitoring systems to rapidly and non-intrusively screen people and vehicles for nuclear and radioactive material which could lead to malicious and damaging consequences. Despite advancements in the fields of detector physics, ‘Big Data’ and ‘cloud computing’ globally, the radiation detection network provision to protect infrastructure and populations from the catastrophic effects of an intentional (or accidental) dispersion of radioactive materials has yet to catch-up. This vulnerability and capability ‘gap’ presently exists not just in the UK and Ukraine, but also world-wide. If such illicit radioactive material outside of regulatory control avoided detection and was intentionally released into; (i) a population center, (ii) a key infrastructure site or (iii) a strategic asset; where the current response monitoring provision is outdated, national responses currently rely near-entirely on aged static infrastructure or manual measurements (undertaken by persons deployed on the ground) to inform, respond, protect and recover.

This joint Ukraine-UK project, with international funding, will be underpinned by developing, optimizing and implementing advanced radiation detection modules, vital for international nuclear security, using the next-generation of scintillator detector materials. Alongside geometrically favorable fixed-position (static) array designs, the project will yield refined electronics and processing algorithms (using artificial intelligence (AI) and machine learning (ML)) to interpret time-resolved spectra and invoke essential source situational and provenance information to capture the

maximum, formerly unused, data from the incident gamma-ray spectra. In addition to delivering innovations in AI and ML for radiological detection applied to radiological material security, border/asset protection and nuclear threat reduction (which has seen very little ‘computational intelligence’ applied to it), the project will also deploy these ‘Big Data’ analytics systems to post-event response. Through subsequently combining these novel scintillator materials, advanced read-out/signal processing electronics and geometrically favorable detector systems with autonomously deployable platforms (including both ground and aerial robotic systems), a dynamic and comprehensive radiological contamination detection, monitoring and response provision will be developed – thereby negating the need for humans to be exposed to potentially hazardous conditions.

The exciting collaborative program of work will seek to deliver combined software and hardware platforms to enhance static (fixed position) and mobile (‘dynamic’) radiation detection, monitoring and response capabilities that are readily exploitable to improve nuclear site safety, port, perimeter, border and key asset security, as well as post-incident emergency radiological response. The successful proof-of-concept work in the UK and more recently alongside various Ukrainian organisations in the Chernobyl Exclusion Zone (ChEZ) - some of the results of which are detailed below, are of direct benefit and application to SAUEZM, CEMRW and ChNPP, who are partnering organisations with the University of Bristol (UoB), UK, and Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants (ISP NPP), Ukraine.

There are four primary project objectives and deliverable outcomes:

1. Single pixel detection system with scalable outputs: develop a suite of miniaturised and deployable radiation detection modules featuring advanced ‘next generation’/novel scintillator-type materials with interchangeable back-end electronics for enhanced signal processing and gamma-ray spectral analysis. Delivery of low-power, secure transmission and streamlined readout architectures.

2. Multi-detector array interfaced with AI/ML signal processing: combine small footprint, yet high sensitivity, multiple ‘pixel’ detectors developed during [1] into a compound array and employ signal processing, AI and ML for enhanced source detection, localisation and provenancing.

3. Deployable embedded static radiation monitoring devices and “Smart Network”: deployment of static (multi)detector systems within embedded applications, alongside their fusion into a ‘Smart Network’ (including AI and ML) for real-time monitoring and event response.

4. Dynamic (response) detection system translation and output/autonomous platform control integration: implementation of radiation and other monitoring technologies (x-ray fluorescence elemental characterisation of contamination) onto deployable autonomous robotic platforms (ground and aerial), with result assimilation into ‘Smart Network’ (as part of [3]), for real-time event monitoring.

### **The problem**

The current problems with existing nuclear security detection and monitoring, the provision of an appropriately scaled post incident response (if required), as well as efficient site decommissioning and assurance can be summarized as follows:



1. The existing static radiation detection provision utilises outdated detector materials, which lack spectral resolution, are large/obtrusive and do not permit for isotopic identification of the contributing radionuclides.

2. With enhanced shielding materials, it is possible for small quantities of radioactive materials (below existing detection limits) to be presently smuggled through existing low-sensitivity border and static monitoring systems; over time contributing to a significant material inventory. Unlike other security and threat areas, a technological evolution to match the threat advancement has not occurred.

3. In order to obtain sufficient detection/counting statistics (signal vs. noise ratio), sensitivity and radiation stopping power/attenuation; existing static detectors comprise large volumes of materials such as CsI(Na) and NaI(Tl), which derive large power requirements and are resultantly space-constrained as well as unsuitable for covert/embedded applications.

4. The significant measurement times required by such large volume detector systems (to derive adequate counting statistics) means that only a subset of targets (e.g. shipping containers) can be screened without dramatically inhibiting operations. Such measurement times (resulting from the spectral resolution/output of the detector material) combined with the slow light pulse decay and associated electronic processing further contributes to a high detector 'dead time' and the inability to undertake low-latency measurements.

5. Scintillator materials are directly associated with their signal processing and 'back-end electronics', therefore resulting in the need for specific electronics to be designed for each type, composition, shape, dopant chemistry and geometry of 'front-end' scintillator material. This not only increases device and production costs, but also necessitates extensive (continual) modifications to electronics, slow development and the inability to 'hot-swap' between materials for a common, software configurable, back-end.

6. Current fixed position radiation detection systems constitute a single detector crystal which can afford no information on the provenance and environment in which a radioactive source resides or its locational history over time. Combined with the poor spectral resolution of such scintillators, this results in most systems only deriving 'yes/no' radiation measurements.

7. Following such 'yes/no' detection events (typically above a defined threshold), it is necessary to conduct time and resource intensive secondary assessments, which require additional expertise and monitoring equipment (to identify natural/permissible radioactive sources, such as nuts, low-Na salt and patients having received medical treatment, from illicit materials). This results in large numbers of false-positive events requiring assessment, which could be eliminated if better spectral data was obtained as part of screening operations.

8. Present radiation detection and incident response provisions fail to incorporate AI and ML to enhance data processing, analysis and situational context.

9. Post-release/incident response provisions are currently dependent upon surveys undertaken by response personnel to assess the distribution, composition and magnitude of a dispersion event – with no adoption of autonomous or unmanned platforms.

10. An assessment of contamination species following a release is again undertaken using response personnel obtaining physical samples for subsequent laboratory/field-lab analysis – rather than implementing stand-off, remote and autonomously deployed characterisation platforms within such hazardous environments.

11. No consolidated network exists through which ‘Big Data’ derived from sensors and networks can be assimilated and interrogated to inform subsequent decision making; rather relying on multiple interconnected networks should a response be required.

12. Despite step-change advancements in connected ‘swarm’ technologies over the past decade, such methodologies and platforms have not been translated into autonomous radiation detection and mapping post-incident, incorporating robotic (ground and aerial) technologies, acting as a collective. Hence, if a collective of robotic technologies were to be used within an incident response, each would have to be individually managed – collecting and acting upon the results obtained in isolation of those sourced from other surveying platforms.

It is, therefore, the objective of this international project comprising experts in radiation detection, robotic systems, software and hardware design and AI/ML to develop advanced detector modules, multi-pixel gamma-ray measurement systems, AI and ML algorithms, monitoring networks, as well as deployable (ground and aerial) monitoring platforms to (i) establish capabilities in countries where they formerly did not exist, and (ii) supersede outdated presently deployed capabilities. The outputs from this project will directly benefit organisations not just in the UK and Ukraine – but countries, ports, borders and facilities around the world.

### The project team

The project team is comprised of researchers from the University of Bristol (UoB), UK, and Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants (ISP NPP), Ukraine – with support from institutions and organisations in both countries, as shown in Figure 1.

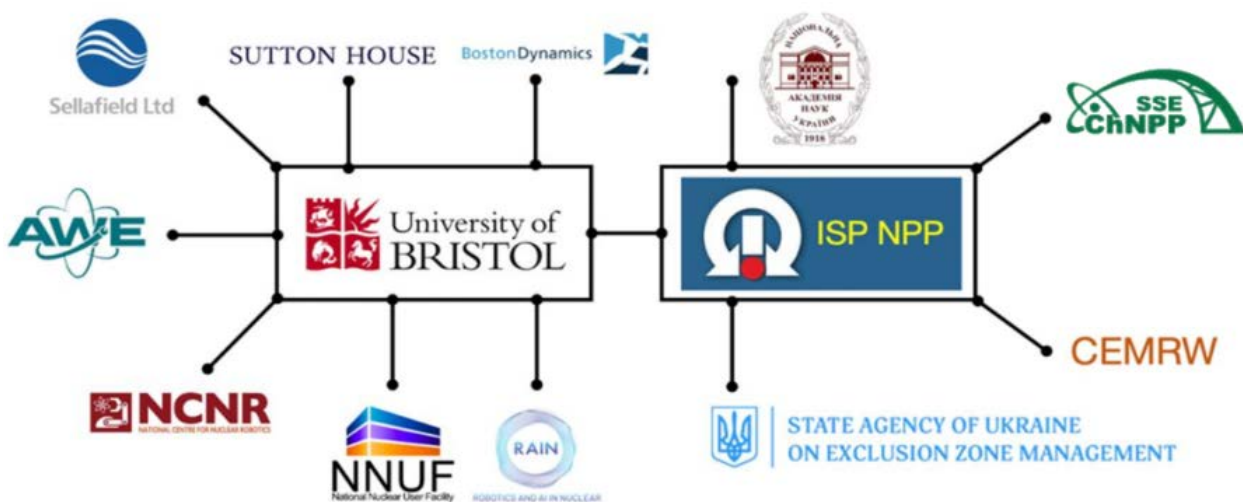


Figure 1. The research and supporting organization involved in this joint Ukraine-UK project.

## **The solution**

To address the aforementioned fundamental problems with existing nuclear security detection, decommissioning, radiological screening and monitoring as well as the provision of an appropriately scaled and sufficient post incident response, the following science and technology developments are proposed as part of this collaborative and multi-year project.

1. Both recently advanced and the ‘next-generation’ of detector materials will be incorporated into more readily deployable system architectures, utilizing the enhanced properties of these crystal materials – such as their supreme spectral resolutions, greater light quality/yield and better optical coupling/matching to downstream detector electronics. Whereas current systems rely upon their large volumes to obtain suitable detection characteristics, materials with superior properties remove this requirement and allow for radiation monitoring devices to be installed more covertly across a large number of locations. This project will use new types of commercially available crystals that are presently arriving on the market, as well as advancing novel method of low-cost scintillator manufacture by combining scintillator powders with optically matched resins.

2. Resulting from the efficiencies of existing NaI(Tl) and CsI(Na) type scintillator materials, lower activities of radioactive material can be presently undetected by static screening systems for vehicles, humans and goods. Within this project, scintillator materials such as CeBr<sub>3</sub>, LaBr<sub>3</sub>, LYSO, GAGG, CLLB and GLO (sourced in their ‘as-manufactured’ crystal form or produced by the project team from precursor materials) will be used to reduce the required counting times necessary to obtain suitable counting statistics for a gamma-ray spectrum peak identification. Rather than demanding 30-seconds of acquisition time to derive a broad and largely indeterminate spectral peak (comprising >1,000 characteristic gamma-ray photons) which could represent/bound any number of radioisotopes, due to their favorable properties, these advanced materials need only a fraction of this measurement time. Alongside their superior collection rate (arising from their enhanced photon attenuation/absorption) needing only circa. 50 photons to define a peak, better fingerprinting of the exact radionuclide(s) will occur due to the greater spectral resolution (light quality) of the aforementioned materials – therefore enabling vital nuclide (and therefore threat-specific) radiation identification (e.g. <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>214</sup>Bi/<sup>214</sup>Pb) rather than the current “radiation present” output of systems.

3. Brought about by step-changes in micro-controller technology and programmable circuitry, this SPS project will advance the current work on developing application-specific integrated circuit (ASIC) electronics. Through their development it will be possible to ‘engineer-out’ the current requirement to design highly-specific signal processing circuitry for each detector configuration – rather having a common ‘plug-and-play’ electronics back-end that serves any scintillator front-end following only minor software configuration changes. This will not only enable the expedited advancement/development of new crystal materials, geometries and configurations – but will also permit for unique and specialised detection systems be deployed as part of embedded radiation/nuclear security,

monitoring and screening applications, where time-consuming and costly iterative developments were required.

4. Through combining a number of the aforementioned enhanced miniaturised scintillator-type detectors into an array, source provenance and situational information can be elucidated – alongside purely the radioisotope composition of the emitter. By installing such laptop-sized devices within congested pedestrian environments (including ports, borders and other high-value terrorist targets), greater radiation detection and threat reduction provision will result. This will, again, elevate the current ‘radiation = yes or no’ provision typical of existing detection systems and networks to (i) better screen for/locate/isotopically identify nuclear and radioactive materials, (ii) enhance detection sensitivity, and also (iii) reduce the significant false-positive incident rate from natural or permissible activities.

5. Following considerable advancements in cloud computing, the ‘internet of things’ (IoT) and increasingly powerful computing technologies, both Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) have become fundamental in many aspects of our daily lives. However, such enormous computational potential has not been applied to radiometric data derived as part of either routine nuclear/radiological security detection and monitoring, or as a component of a robust post-incident response provision. Consequently, this project will work to deploy established AI and ML technologies from experienced collaborators at Amazon Web Services (AWS) to both such radiation detection scenarios. This will include:

- Application of automated peak fitting and analysis algorithms to identify signatures and alarm events across gamma-ray spectra sources from a variety of different detection materials, systems and scenarios.

- Real-time source tracking and provenancing following multiple radioactive detection event ‘triggers’ – including examining minor variations in characteristic detector responses contained within spectral fingerprints in order to additionally elucidate a sources local environment/context (i.e. how it may be concealed based on attributes such as the photopeak vs. low-energy scattering ratios and emission peak asymmetry/shape/background).

- Contextualization and forecasting of data/events – for example, variations in radioactivity levels associated with seasonal and weather events, routine transport activities and natural process – all of which would otherwise require human investigation and intervention following such a detection event/episode.

- ‘Big Data’ processing, validation, representation and analysis after combining numerous converging data-streams with differing resolution (spatial, spectral, temporal), quality and type/format.

- Direction and control of autonomous/swarm robotic systems (both aerial and ground) to efficiently undertake incident/release response monitoring and characterisation.

6. Initiated largely by events at Japan’s Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in 2011, autonomous technologies have become increasingly mainstream for radiological monitoring, however, manned surveys (by humans on the ground) still remain the primary mapping/characterisation methodology. To enhance the present

operational efficiency of existing semi-autonomous surveys (ground and aerial) which presently rely on one operator controlling one platform, this project will utilise and translate the growing capabilities (and algorithms) of ‘swarm theory’ to multi-platform autonomous detection and mapping of radioactivity, as shown in Figure 2. This will facilitate a more comprehensive and accelerated post-event response in the aftermath of an intentional radiological release event – requiring less human supervision; with data directly parsed into a results analysis and visualisation system to inform response activities (via data networks, AI and ML also developed as part of this UK-Ukraine research and development project).

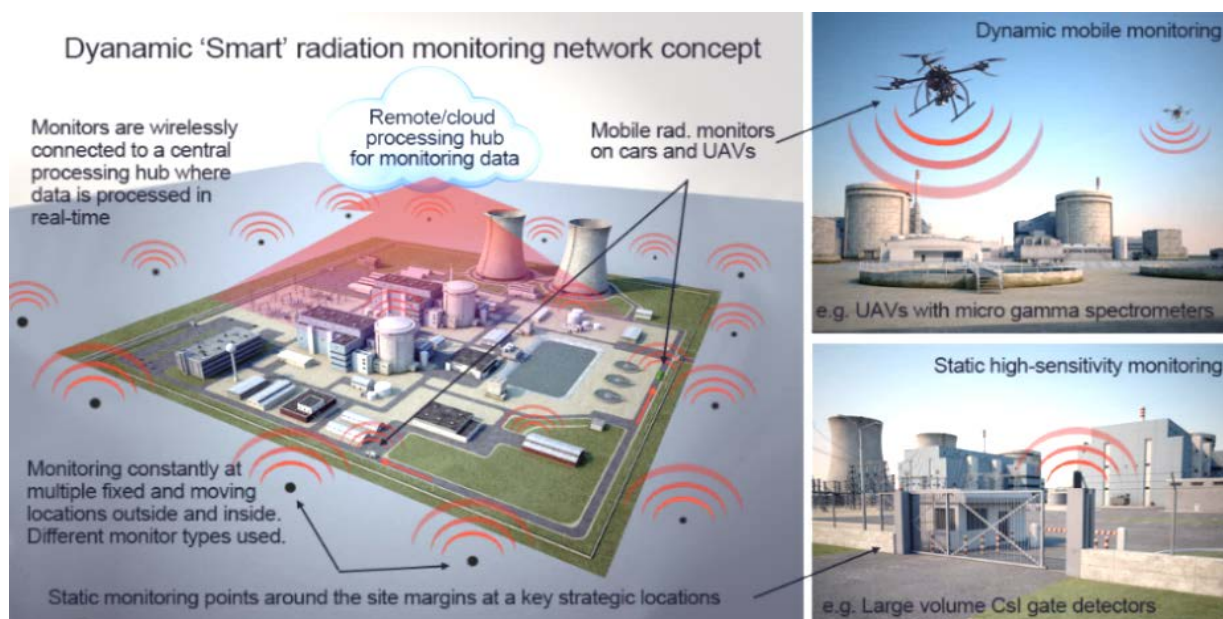


Figure 2. Schematic of the multi-sensory systems contributing data into the singular ‘Smart Network’ for real-time routine (security) and incident response radiological monitoring via both static (fixed-position) and dynamic (mobile) platforms.

7. With advancements in ‘stand-off’ (at distance) non-destructive analysis techniques, there now exists the ability to accurately assay the chemical and physical characteristics of contaminant species without the requirement to obtain samples (using response personnel) for subsequent in-field laboratory analysis. Using semi-autonomous ground-based platforms with payload transport and deployment capabilities (i.e. those with mobile manipulation arms and/or proximity sensors), this project use X-ray Fluorescence (XRF) systems to rapidly (in less than 90-secs) assess environments and hazards – with results reported in real-time back to operators placed away from danger, allowing for containment and potential decontamination measures to be invoked and deployed.

8. To consolidate the vast volumes of ‘Big Data’ derived as part of routine security monitoring and, more significantly, during post-release detection and incident response – suitable infrastructure is required. Alongside advancements made in AI and ML, this SPS project will also develop ‘elastic networking’ through which (cloud) computing power can be used on-demand to facilitate the processing and manipulation of converging data-streams. By deploying a scalable digital network configured with ‘bolt-on’ AI, ML and visualisation modules, such systems

are no longer dependent upon traditional network infrastructure. Here data is to be consolidated on a single system (with inherent in-built back-ups and redundancy) thus removing the present need for the push-pull of data from/across interlinked networks and data reservoirs – with considerable interfacing and translation issues.

### **Conclusion**

This joint project with researchers and organisations from both Ukraine and the UK will develop, optimize and implement the next-generation of embedded radiation detection modules, vital for international national security, using the next-generation of scintillator-type detector materials. Alongside geometrically favorable array designs, the project will yield refined electronics and processing algorithms (using artificial intelligence (AI) and machine learning (ML)) to interpret time-resolved spectra and invoke essential source situational and provenance information to capture the maximum, formerly unused, data from the incident gamma-ray spectra. In addition to delivering step-changes in AI and ML for radiological detection applied to nuclear security and threat reduction (which has hitherto seen no ‘computational intelligence’ applied to it), the project will also deploy these ‘Big Data’ systems to post-event response, alongside enhancing autonomous deployable sensing and contamination monitoring platforms – including both ground and aerial robotic systems.

This multi-faceted and highly timely project will develop a step-change in radiation detection capabilities directly applicable not only to global nuclear/radiological security at ports, borders and other key assets - fundamental in the growing terrorist threat, but also as part of a coordinated and timely response, should a radiological release event occur. The UK-Ukraine project will develop eminently deployable sensor systems that will surpass the functionality of the thousands of aged devices that are embedded at sites globally. Such universally exploitable systems will also reduce the incidents of false-positive results which require timely, intrusive and costly interventions/escalations - with the projects utilization of AI and ML delivering vast cost savings, situational awareness and self-learning functionality to remove the previous human dependency. Alongside the innovations of this project, the technologies are also widely exploitable across other priority areas - reducing costs, improving responses and efficiencies in addition to protecting humans.

Alongside the direct impact to nuclear/radiological detection, monitoring, screening and post-incident response in UK, Ukraine and other NATO member countries, the technologies, deployment platforms, response capabilities and ‘Big Data’ processing/analytical tools developed as part of this NATO SPS project are eminently translatable to the detection, decontamination, destruction, disposal and containment of CBRN agents as well as other illicit activities/materials which present ever-increasing security and terrorist threats.

### **Authors' Information**

**Peter Martin** – Research Fellow, University of Bristol, School of Physics, Tyndall Avenue, Bristol, BS8 1TL, UK; e-mail: peter.martin@bristol.ac.uk

Major Fields of Scientific Research: Radiation Detection, Nuclear Threat Reduction, Sensor Development, Nuclear Forensics, Materials Analysis.

**Tom Scott** – Professor of Materials, University of Bristol, School of Physics, Tyndall Avenue, Bristol, BS8 1TL, UK; e-mail: t.b.scott@bristol.ac.uk

Major Fields of Scientific Research: Radiation Detection, Actinide Materials Research, Robotic Systems, Materials Science, Nuclear Fuel Cycle.

**David Megson-Smith** – Research Associate, University of Bristol, School of Physics, Tyndall Avenue, Bristol, BS8 1TL, UK; e-mail: david.megson-smith@bristol.ac.uk

Major Fields of Scientific Research: Optical Systems, Light Spectroscopy, Raman Imaging, System Development, Robotic and Software Engineering.

**Yannick Verbelen** – Research Associate, University of Bristol, School of Physics, Tyndall Avenue, Bristol, BS8 1TL, UK; e-mail: yannick.verbelen@bristol.ac.uk

Major Fields of Scientific Research: Micro-Electronics, Radiation Detection, System Development, Software Engineering, Low-Power Electronics, Hardware Development.

**Maxim Saveliev** – Research Fellow, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, Nation Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl, Ukraine; e-mail: m.saveliev@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: Computerised Systems for Nuclear Industry, Nuclear Threat Reduction, Nuclear and Radiation Safety, System-of-Systems.

**Daria Muliar** – Research Assistant, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, Nation Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl, Ukraine; e-mail: muliar@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: Radiation Environment, Methods and Technologies of Radiation Protection, Nuclear and Radiation safety.



**WEB RESOURCE "DEPARTMENT OF INFORMATION  
TECHNOLOGIES AND SOFTWARE ENGINEERING"  
CHERNIHIV POLYTECHNIC UNIVERSITY**

*Agiyenko M. Yu.<sup>1</sup>, Nerush K. Yu.<sup>2</sup>, Trunova O.V.<sup>3</sup>  
Chernihiv Polytechnic National University,  
street Shevchenko, 95, Chernihiv, 14035, Ukraine  
<sup>1</sup> mykahienko@gmail.com,  
<sup>2</sup> nerush17karolina@gmail.com,  
<sup>3</sup> e.trunova@gmail.com.*

**Abstract.** The work considers the concept of website and types of educational sites. The concept of the site of the department as a platform for Internet communication of higher education applicants (HEA), parents, research and teaching staff and stakeholders, its purpose and main tasks. These main stages of creating a website. The website was implemented according to the Agile and Kanban methodologies.

The site allows users to quickly receive fresh information from the department seven days a week. Using hypertext, interactivity, it is possible to achieve an effective impact on the entrants of the department, who get a general idea of learning. Students are given access to detailed and carefully structured teaching materials, which helps to choose an acceptable educational strategy. For teachers of the department the site provides information exchange with students, by providing the necessary educational information. The website successfully solves such important tasks as the promotion of educational services, maintaining the image of the department, communication with the professional and scientific community, support and comfort of the educational process, developing relationships with participants in the market of educational services and labor market, attracting sponsors and partners.

The main tasks of the new paradigm of education in modern information conditions are the development and implementation of holistic and integrative approaches and ways of exploring the world, as well as providing access to education and continuous improvement of cultural, educational and professional level without restrictions. The educational institution is an open system and needs to create a special information environment to ensure effective interaction of all participants in the educational process. A similar platform for online communication of higher education applicants (HEA), parents, research and teaching staff (TS) and stakeholders can be a website [1].

A website is a set of software and hardware with a unique address on the Internet, together with information resources that are available to a particular entity, provide access to legal entities, individuals to these information resources and provide other information services over the Internet.

Educational sites are divided into the following types: sites of educational institutions, sites of scientific research, sites of reference character, sites of information Internet projects, sites of distance education, sites with educational



press, sites such as virtual methodical associations and sites of consultative purpose.

The site of the department is an information, scientific, educational and communication basis for the modernization of pedagogical activities of the university department, which contributes to the creation of a new model of education in terms of informatization of the education system of society.

The purpose of creation is reflected in the main tasks of the site of the department:

- ensuring timely access to free and up-to-date information on pedagogical activities of the department and the university;
- ensuring free access to free educational institutions, parents, teaching staff (TS) and stakeholders to regulatory legal documents regulating educational;
- acquaintance with the process, forms and methods of teaching, as well as scientific and research activities, providing HEA and TS access to all scientific, methodological materials and computer tools of higher education;
- creation of conditions for introduction of innovative technologies of training in pedagogical activity of department;
- concentration on the site of the department of links to thematic educational sites and portals of other universities;
- providing photo materials about the activities of the department, HEA, works of the Free Economic Zone and graduates of the department, conducting current information and advertising work;
- ensuring continuous monitoring of scientific and pedagogical activities of the department.

The basis for the creation of the web resource was information provided by the Department of "Information Technology and Software Engineering" NU "Chernihiv Polytechnic", which included text and illustrative material.

The main stages of creating a website are: the purpose of creation; terms of reference; design; structure; navigation; contents; administration; promotion.

The website was implemented according to the methodologies of Agile and Kanban [2].

When creating the structure of a web resource, which is divided into internal and external, a list of pages and the relationship between them is formed, taking into account the convenience of orientation and information retrieval. The developed internal structure of the web resource includes all the content divided into main topics (sections), which takes into account the well-thought-out logical connections between them (Fig. 1).

An external structure of the web resource has been developed, which is responsible for the location of the main important elements on the page, which includes the logo, menu, search, information blocks, contact information, etc. (Fig. 2).

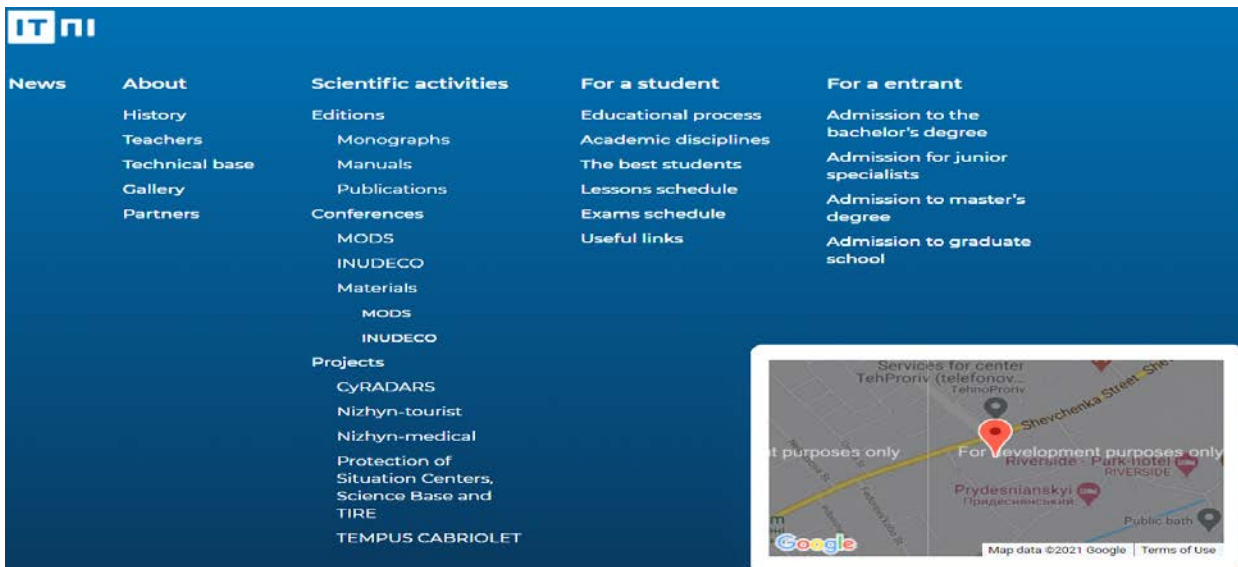


Fig. 1. Internal structure of the web resource "Department of ITandSE"



Fig. 2. External structure of the web resource "Department of ITandSE"

The site allows users to quickly receive fresh information from the department constantly seven days a week. Using hypertext, interactivity it is possible to achieve an effective impact on the entrants of the department, who get a general idea of learning. Students are given access to detailed and carefully structured teaching materials, which helps to choose an acceptable educational strategy. For teachers of the department the site provides information exchange with students, by providing the necessary educational information.

Practical experience shows that an active educational website allows you to successfully solve such important tasks as promoting educational services, maintaining the image of the department, communication with the professional and scientific community, support and comfort of the educational process, developing relationships with market participants and educational services. labor, involvement of sponsors and partners. The creation of educational sites at each department of the

university, in our opinion, will change the attitude to the learning process, promote the introduction of computer and distance learning technologies

### **References**

1. Berezko O. L., Peleshchyshyn A. M., Zhezhnich P. I. The concept of creating a website of the National University "Lviv Polytechnic" / O. L. Berezko, A. M. Peleshchyshyn, R. I. Zhezhnych [Electronic resource]. – Access mode: <http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/3146/12-berezko-57-65.pdf> (Access date 19.12.2020).
2. Anderson, D. Kanban alternative way in Agile [Electronic resource] / D. Anderson. – Access mode: <http://flibusta.is/b/479765/read> (Access date 19.12.2020).

# РАДІОАКТИВНЕ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДОЙМИ-ОХОЛОДЖУВАЧА ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС ВІД МОМЕНТУ АВАРІЇ ДО СЬОГОДНІ: ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ З ВИМІРАМИ

Беженар<sup>1</sup> Р., Железняк<sup>2</sup> М., Кіреєв<sup>3</sup> С., Веремєнко<sup>3</sup> Д., Насвіт О., Гудков<sup>4</sup> Д.,  
Канівець<sup>5</sup> В., Лантев<sup>5</sup> Г., Процак<sup>5</sup> В., Sakaguchi<sup>6</sup> А., Nanba<sup>2</sup> К., Wada<sup>2</sup> Т.,  
Kanasashi<sup>2</sup> Т.

<sup>1</sup>*Інститут проблем математичних машин і систем  
НАН України, Київ*

<sup>2</sup>*Institute of Environmental Radioactivity at Fukushima  
University, Fukushima, Japan*

<sup>3</sup>*Державне спеціалізоване підприємство «Екоцентр», Чорнобиль*

<sup>4</sup>*Інститут гідробіології НАН України, Київ*

<sup>5</sup>*Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України і НАН України,  
Київ*

<sup>6</sup>*Center for Research in Isotopes and Environmental Dynamics, University of  
Tsukuba, Tsukuba, Japan*

**Abstract.** During the accident in April 1986, the Cooling Pond (CP) of Chernobyl NPP was heavy contaminated by the radionuclides. Starting from the end of 2014 a gradual decrease of water level began that leads to transformation of the whole reservoir into several “lakes”. Our objectives are to calibrate models, using data for the whole post-accident period by the joint efforts of Ukrainian and Japanese researchers. Samples of water, suspended and bottom sediments and biota were taken in new water bodies formed after drawdown of the CP water level. The modeling system that consists of the 3D model THREEETOX and the box model POSEIDON-R was customized for CP. THREEETOX model simulates 3D currents in the CP for each type of hydrological conditions. The POSEIDON-R model was applied for the long-term simulations of the changes of activity concentration in the water, bottom sediments and biota starting from the 1986. Seasonal changes in distribution coefficient  $K_d$  describing the partition of  $^{137}\text{Cs}$  concentration between water and sediments were also taken into account. Calculated concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in water and freshwater fish occupying different levels the food chain agree well with measurements for all boxes.

В період активної фази аварії на станції радіонукліди потрапляли у водойму-охолоджувач Чорнобильської АЕС (ВО ЧАЕС) внаслідок атмосферного випадіння на його поверхню, а також через прямі скиди високоактивної води у ВО з майданчика ЧАЕС. За роки після аварії певна частина радіонуклідів розпалася, також відбувся перерозподіл забруднення під дією гідродинамічних факторів. За цей час для ВО були характерними абсолютно різні гідродинамічні умови. Спочатку течії головним чином визначалися роботою системи охолодження АЕС, що спричиняло постійний круговий рух води. Після зупинки роботи станції у 2000 році течії у ВО виникали лише під дією вітру і змінювалися з кожною зміною його напрямку

і швидкості. Починаючи з кінця 2014 року, після зупинки насосів, які безперервно підживлювали ВО ЧАЕС водою з р. Прип'ять, почалося поступове зниження рівня води у ВО. На даний момент рівень води знизився приблизно на 6.5 м, що призвело до перетворення цілісної водойми на кілька частин. При цьому з'явилися значні осушені ділянки. Варто відмітити, що протягом всього часу у ВО ЧАЕС існує велика кількість гідробіонтів (водних організмів), які характеризуються високими рівнями радіоактивного забруднення.

Для моделювання довгострокових змін радіоактивного забруднення у воді, донних відкладах і гідробіонтах ВО використовувалась камерна модель POSEIDON-R. При цьому характерні течії у ВО, необхідні для моделювання переносу радіоактивності, розраховувалися тривимірною моделлю термогідродинаміки THREETOX. Таким чином, для кожного типу гідродинамічних умов розраховувались тривимірні течії у ВО, які після усереднення використовувались камерною моделлю в якості вхідних даних. Отримані результати порівнювалися з існуючими даними вимірювань, здійсненими в попередні періоди часу, а також з новими даними, отриманими в ході виконання українсько-японської програми SATREPS, проєкту Національного фонду досліджень і НТ програм ДАЗВ.

Для проведення розрахунків моделлю THREETOX була побудована криволінійна ортогональна розрахункова сітка із загальною кількістю 3900 вузлів. У кожному вузлі розглядається 15 вертикальних рівнів. Роздільна здатність розрахункової сітки по горизонталі змінюється від 40 м до 100 м. Глибина у кожному вузлі знаходилася методом інтерполяції даних топографії дна [1]. Система камер ВО моделі POSEIDON-R характеризується структурою, яка здатна відтворювати циркуляцію у водоймі та враховувати її особливості в початковому стані та після осушення. Вона включає мілководні і глибоководні камери і має таку структуру, що для сценаріїв після осушення водойми система складається лише з глибоких камер. Середня глибина і об'єм кожної камери розраховувалися на основі даних про розподіл глибин у ВО ЧАЕС.

В моделі POSEIDON-R [2] перенос радіонуклідів між камерами відбувається за рахунок потоків води. В межах кожної камери враховуються процеси переходу радіонуклідів у донні відклади в результаті їхньої сорбції зваженими у воді частинками, які з часом осідають на дно, та в результаті молекулярної дифузії між водою і дном. У донних відкладах забруднення поступово переходить у глибші шари. Співвідношення між концентраціями радіонукліда, адсорбованого твердими частинками та розчиненого у воді, в рівноважних умовах визначається коефіцієнтом розподілу  $K_d$ . Оскільки основна частина  $^{137}\text{Cs}$  знаходиться в донних відкладах ВО, навіть невеликі зміни  $K_d$  можуть призвести до суттєвих змін концентрації даного радіонукліду у воді. Для відтворення сезонних коливань концентрації  $^{137}\text{Cs}$  у ВО в моделі була введена залежність  $K_d$  від вмісту іонів калію  $[K]$  і амонію  $[NH_4]$ , для яких характерні саме сезонні коливання, та параметру чутливості  $RIP$

$$K_d = \frac{RIP}{[K] + 5[NH_4]} \quad (1)$$

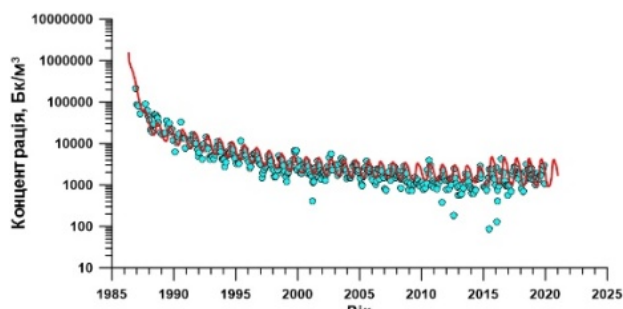
В моделі враховується, що радіонукліди засвоюються гідробіонтами безпосередньо з води, а також у результаті споживання забрудненої їжі в ланцюжку живлення. При цьому розглядаються групи організмів в залежності від біологічного типу та положення в ланцюжку живлення. В моделі виділений пелагічний і придонний ланцюжки живлення. Початковою ланкою пелагічного ланцюжка живлення вважається фітопланктон. Через швидкий метаболізм фітопланктону концентрація радіонуклідів у ньому розраховується з використанням концентраційного фактору  $CF$ , що передбачає моментальне засвоєння радіонукліда фітопланктоном і встановлення рівноважної концентрації відносно води. Для ВО величина  $CF$  була визначена як середнє відношення виміряних концентрацій радіонуклідів у найпростіших рослинах до відповідних концентрацій у воді. Донний ланцюжок живлення для ВО є важливим через значне забруднення донних відкладів. Початковою ланкою донного ланцюжка живлення є органічна фракція, до складу якої відносяться рештки відмерлих організмів, що осіли на дно, а також бактерії та інші мікроорганізми в донних відкладах. Вважається, що органічна фракція знаходиться в рівновазі з неорганічною. Концентрація активності в інших організмах  $C_{org}$  описується диференціальними рівняннями, в яких враховується засвоєння радіонуклідів з води і з їжі, а також їхнє виведення з організму у результаті метаболічних процесів

$$\frac{dC_{org}}{dt} = aK_f C_f + bK_w C_w - \frac{\ln 2}{T_{0.5}} C_{org} \quad (2)$$

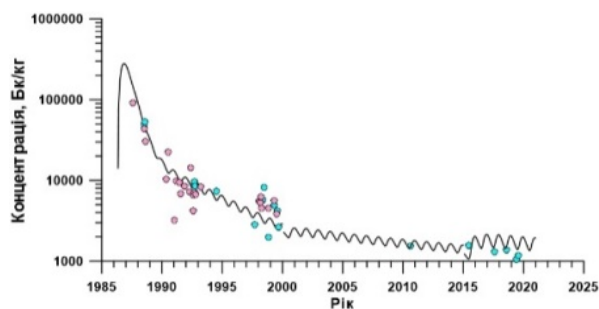
де  $C_f$  і  $C_w$  – концентрації активності в їжі і у воді,  $K_f$  і  $K_w$  – щоденна величина споживання їжі і фільтрування води,  $a$  і  $b$  – ефективності засвоєння забруднення з їжі і з води,  $T_{0.5}$  – період біологічного напіввиведення забруднення з організму.

Джерелом забруднення ВО ЧАЕС вважалось атмосферне випадання радіонуклідів у 1986 році, густина якого була неоднорідною і відповідала картам наземного забруднення. В моделі сумарна активність, що випала на ВО, склала 180 ТБк  $^{137}\text{Cs}$  і 35 ТБк  $^{90}\text{Sr}$ . Отримані в результаті моделювання концентрації радіонуклідів узгоджуються з відповідними вимірами для води і різних видів риби за весь час розрахунку. Приклад такого порівняння для  $^{137}\text{Cs}$  показаний на рисунку. Видно, що після зниження рівня води можна очікувати збільшення амплітуди сезонних коливань концентрації  $^{137}\text{Cs}$  на фоні її незначного загального підвищення. Для  $^{90}\text{Sr}$  підвищення концентрації, яке згідно з вимірами відбувається нерівномірно у різних секторах ВО після зниження рівня води, може бути пов'язане як з впливом нерівномірно забрудненого дна, так і зі змивом виділеного з паливних частинок  $^{90}\text{Sr}$  на осушених ділянках ВО в процесі вилуговування. Дане питання потребує

подальшого дослідження. Подальші розрахунки на основі верифікованої моделі і нових даних вимірів дозволять прогнозувати динаміку  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  в системі водойм, на які розділилось ВО ЧАЕС.



Концентрація  $^{137}\text{Cs}$  у воді



Концентрація  $^{137}\text{Cs}$  у нехижій рибі  
(карась, товстолоб)

### Список використаних джерел:

1. Kanivets V., Laptev G., Konoplev A., et al. Distribution and Dynamics of Radionuclides in the Chernobyl Cooling Pond. In: Konoplev A., et al. (eds) Behavior of Radionuclides in the Environment II. Springer, Singapore. 2020. P. 349–405.
2. Maderich V., Bezhenar R., Tateda Y., Aoyama M., Tsumune D., Jung K. T., de With G. The POSEIDON-R compartment model for the prediction of transport and fate of radionuclides in the marine environment. MethodsX. 2018. Vol. 5. P. 1251–1266.

# ПРОБЛЕМИ ЛІКВІДАЦІ ТЯЖКОЇ АВАРІЇ У 1986 РОЦІ ТА СУЧАСНОСТІ

Безун В.В. \*, Волошин П.О. \*\*

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

\*\*Приватне підприємство ФОП, м. Київ, Україна

**Анотація.** Розглянуто залежності ймовірності помилки людини оператора від факторів та обставин виконання аварійних дій під час аварії на ЧАЕС у 1986 р, та проведені порівняння їх з теперішнім станом.

**Ключові слова:** людський чинник, організаційні фактори, аварія, аспекти впливу.

V.V. BEGUN\*, P.O. VOLOSHYN\*\*

ORGANIZATIONAL PROBLEMS OF SEVERE ACCIDENT CONSEQUENCES ELIMINATION AT 1986 AND NOWADAYS

\* Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the NASU, Kyiv, Ukraine

\*\*Private Enterprise, Individual Entrepreneur, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The investigation of operator`s human error dependence on factors and consequences during emergency response actions at the Chernobyl Accident at the 1986 with the comparative study at the qualitative level to nowadays situation is carried out.

**Key Words:** human factor, organizational factors, accident, impact factors.

Загальновизнано, що безпосередніми причинами аварії 1986 року на ЧАЕС були помилки операторів. Але, як доведено у багатьох наукових працях, помилки висококваліфікованих операторів здійснені під впливом несприятливих факторів і обставин.

Так, помилки людини-оператора залежать не тільки від його кваліфікації (особистої компетентності), а й від зовнішніх факторів та обставин під час виконання аварійних дій. Ця істина доведена не тільки теоретично вченими [1-4], але й багаторічною світовою практикою ліквідації малих і великих аварій [5-8], спогадах персоналу тощо. Та справа не тільки в тому, що людина може розгубитися під впливом стресу, небезпечних умов, - проблема значно складніша. Ймовірність помилки залежить від цілого ряду факторів та обставин, які формуються у людини під впливом всіх життєвих обставин та отримали загальну назву «організаційні причини».

Цей феномен досліджувався міжнародною групою вчених, яка була створена під егідою міжнародних структур наприкінці минулого століття, а остаточний звіт [10] надрукувала у 1999 році. У перекладі російською найбільш детально матеріали цього звіту викладені у роботі вчених з Обнінського центру психологічних досліджень «Организационная психология, организационная культура и культура безопасности в атомной энергетике» [11], яка вийшла у 2009 році, та стисло у статті [12].

До організаційних причин віднесені наступні 12 організаційних факторів (ОФ):

1. Зовнішні фактори впливу.



2. Цілі та стратегії.
3. Функції управління та надзору.
4. Розподіл ресурсів.
5. Управління людськими ресурсами.
6. Професійне навчання персоналу.
7. Координація робіт.
8. Організаційне знання.
9. Визначення та впровадження процедур.
10. Організаційна культура.
11. Організаційне навчання.
12. Комунікації.

Звісно, кожен з цих факторів (ОФ) впливає на роботу підприємства взагалі, безпеку та поведінку персоналу в аварійних ситуаціях тощо. Кожен з цих факторів на кожному об'єкті приймає значення, властиве саме цьому об'єкту, тобто, ці фактори індивідуальні. Саме тому їх дослідження для АЕС має велике значення.

Слід зазначити, що грані між факторами можуть бути розмитими, тому що виділення окремих факторів досить умовне: фактори взаємозалежні та є ефект їх взаємного впливу, коли наявність одного з них спричиняє появу й прояв інших. Так само, як поняття "організація", організаційні фактори можуть мати характер процесу, представляючи динамічний аспект організації, або характер результату процесу.

Зрозуміло, що визначити чітко де закінчуються дія одного фактору та розпочинається дія іншого не завжди можливо, простіше та більш правильно спробувати відобразити схему їх взаємного зв'язку, що відображено на рис.1 [11].

Отже, проаналізуємо ретроспективно, відповідно до сучасних міжнародних визначень [10] стан та оцінку кожного фактору під час ліквідації аварії на ЧАЕС у 1986 році та ймовірний його стан під час запроектої аварії, яка може статися зараз. Розрахунки ймовірності таких аварій – частота плавлення активної зони (ЧПАЗ) – на сучасному етапі розвитку атомної енергетики є важливою складовою управління безпекою. Значення цього параметру нормується міжнародним законодавством, розраховується під час імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) кожного атомного блоку. Визначення ймовірних помилок персоналу (ЙПП) при цьому складає значну частину звіту ІАБ й, відповідно, помилки операторів (людський чинник - ЛЧ) вносять значний вклад у величину значення ЧПАЗ. Але по цей час такі розрахунки проводяться на основі методик без врахування ОФ, точніше, існуючі методики розроблені раніше, тому не всі ОФ враховуються.

Отже, на якісному рівні зробимо порівняльну оцінку значень ОФ 1986 р., та в цей час з метою визначення відносних змін їх впливу.

Відмінності можливої поведінки операторів тоді й зараз, на наш погляд, найбільше відрізняються для фактору «Зовнішні фактори впливу».

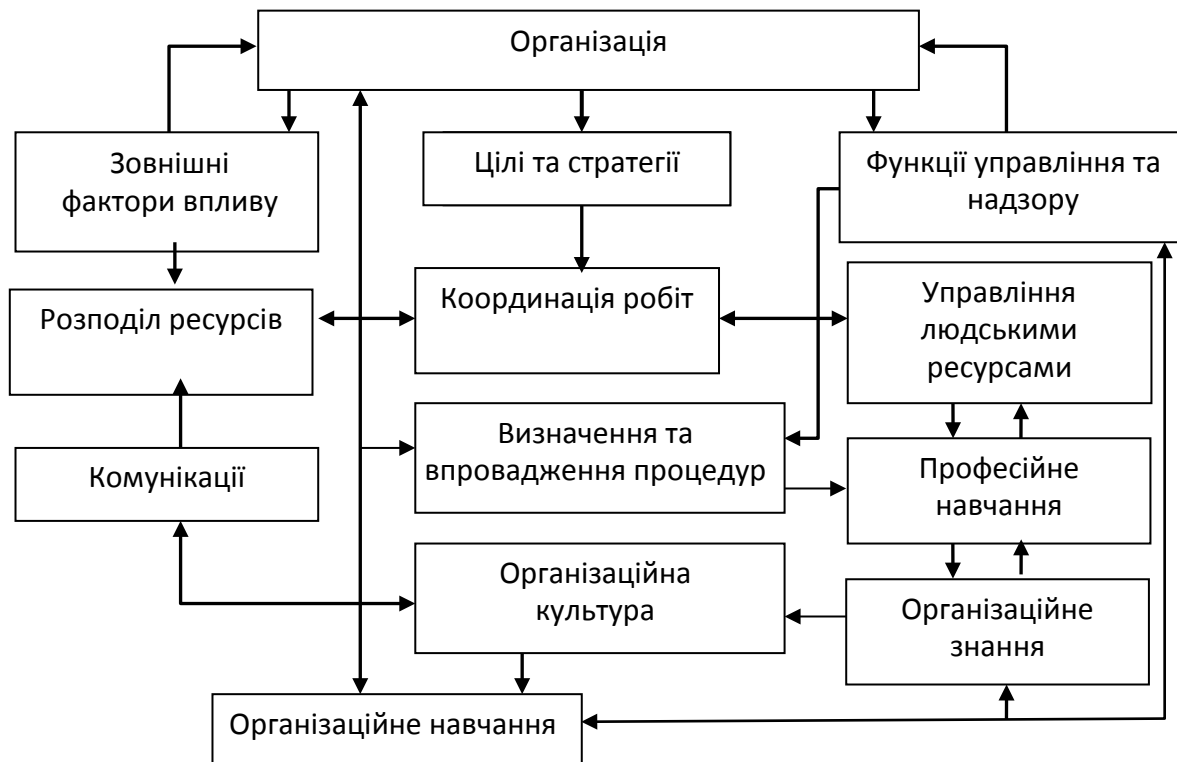


Рис. 1. Зв'язок організаційних факторів виробництва

Зовнішні фактори впливу є факторами зовнішнього середовища, виникають за межами границь корпорацій, підприємств та експлуатуючих організацій, можуть вплинути на організаційну культуру й діяльність [10].

Аспектами впливу ОФ «зовнішні фактори впливу» є 10 обставин (у тексті підкреслено), що стануть предметом дослідження. Ще раз зазначимо, що всі аспекти визначено міжнародною групою фахівців з безпеки [10]. Отже, аналіз аспектів впливу даного фактору:

– Політична ситуація – під час аварії 1986 р. вона була відносно стабільною. Головне те, що суспільство не було розколото, кожна людина сподівалася (не сумнівалася) на захист від держави. Більш того, люди обурювалися, якщо не отримували чогось з причин бюрократичних негараздів, які, звісно, були. Як безпосередній учасник ліквідації наслідків аварії (ЛНА) впевнено можу сказати, що політична ситуація 1986 р. була сприятливою та, відповідно, зменшувала ЙПП. Бажаючих прийняти участь було забагато, добровольці з'їжджалися з усіх АЕС, та не тільки АЕС. Я особисто відробив одну вахту (15 діб по 12годин) з доцентом МІФІ. Для порівняння, зараз у всіх людей, персоналу теж, немає почуття захисту з боку держави, відповідно й поведінка буде адекватною. Не варто очікувати великого бажання працювати в умовах смертельного ризику. Тому, як висновок, сучасна політична ситуація не сприяє участі в ліквідації тяжкої аварії, людина якщо й буде працювати, то або під страхом покарання, або за великі гроші. За таких умов, вочевидь, ЙПП збільшується.

– Законодавча й правова система – у 1986 році відповідала цілям соціалістичної економіки, захищала державну власність та права людини, забезпечувала компенсації майна та шкоди здоров'ю, що стримувало мародерство домівок евакуйованих, надавало впевненості за себе та близьких

людей і т. і. Далі, кожен член колективу вважав своїм обов'язком приймати участь у ліквідації аварії, ідеологічна складова того часу відповідала законодавчій системі. Наприклад, засуджувалися «втікачі» - були й такі. Зараз, дуже сумніваюсь, що з боку операторів буде таке відношення – персонал наймався на роботу в нормальних умовах, ліквідувати повинні ліквідатори. Обов'язкова участь у ліквідації аварії навіть не передбачено законом, прикладом можуть бути випадки великих пожеж: нафтобази Глеваха (2018 р), пожежі ТРЦ та інше [13,14]. Як висновок, законодавча та правова система потребує суттєвої доробки для забезпечення мінімально можливого виконання аварійних процедур. ЙПП збільшується.

– Економічна система – загальнодержавна форма власності у той час надавала великі можливості, реально були майже необмежені ресурси – потрібен свинець – беріть, потрібні вертольоти – зустрічайте. Сучасна приватна форма власності потребує попередньої оплати, а ці процедури неможливо виконати у режимі реального часу в аварійних умовах. ... Приклад – знеструмлення штату Техас – ціна електроенергії стрибнула в десятки разів. Як висновок, потрібно заздалегідь подбати про кошти, які можна отримати на базі страхування, але суми мають бути адекватними, тобто, великими, яких реально немає. ЙПП збільшується.

– Аспекти загальнолюдської й національної культури – у 1986 р. була радянська культура, яка була заснована на патріотизмі та героїчних епосах всіх культур (усього світу), навпроти, сучасна поп-культура - це влада грошей, що не сприяє участі у ліквідації ... ЙПП збільшується .

– Соціальний, освітній, психологічний і фізіологічний стан працездатного населення в країні, регіоні – отже, по черзі соціальний стан більш сприятливим був тоді – ми бачили серед ліквідаторів усі верстви населення, не було розподілу на класи, зараз – раздрай суспільства, ті хто їздять у відпустки на острова – не прийдуть на допомогу потерпілим, хоча б тому, що вони не ототожнюють себе навіть з громадянами країни, вони, як правило, мають ще й інше громадянство. Далі за освітнім станом – теж дуже велика різниця, наша країна з великої промислової держави опинилася серед країн, що розвиваються (за класифікацією ООН), тобто освітній стан значно погіршився. Фізіологічний стан працездатного населення – зараз більша частина населення старе – молодь та розумні люди, нажаль, покинули державу, тобто ця обставина теж не сприяє участі у ліквідації ... ЙПП збільшується.

– Інші (зовнішні) установи та організації – якщо не буде загроз іншим – не варто очікувати допомоги – приклад - ситуація з щепленням проти коронавірусу (обіцяли – не маємо) - не сприяє участі у ліквідації ... ЙПП збільшується.

– Регулюючі владні структури та органи нагляду – 1986 р. – були професіонали, зараз при владі артисти, або діти багатіїв, які не тільки не зможуть оцінити аварійну ситуацію, вони навіть не уявляють, не знають нормальних умов роботи ... - не сприяє участі у ліквідації. ЙПП збільшується.

– Суспільна думка та сприйняття – тоді були загальний біль і відчуття біди кожним громадянином, усі переживали не тільки за себе особисто, а й за сусіда, товариша, кожен працівник відчував відповідальність за свої дії як член великого об'єднання людей, пов'язаних багатьма узами. Людина не могла вчинити поступки, які сприймалися суспільством негативно, всі мали якусь внутрішню мотивацію до благородних вчинків. Зараз суспільство роз'єднано, нас не турбує сусід, частіше ми не знаємо навіть ім'я сусіда, тому суспільна думка та сприйняття, можна так сказати, нікого не турбує. А це означає, що така субстанція як совість, не має значення ... що, безумовно, не сприяє участі у ліквідації ... ЙПП збільшується.

– Повідомлення засобів масової інформації – має дуже велике значення. Згадаємо першотравневу демонстрацію 1986 року в Києві – люди вірили державним ЗМІ, зараз довіра до ЗМІ дуже мала, ЗМІ привчили нас до фейків, тому будь-які повідомлення не сприймаються, кожен приймає рішення про свою поведінку, засновуючись тільки на власному досвіді. Тому цей фактор також не сприяє участі у ліквідації досвідчених фахівців. ЙПП збільшується.

– Сприйняття найнятими службовцями їхнього робочого статусу – теоретично [1] й практично має великий вплив на ймовірність не тільки помилки, але й навмисних дій. Всім добре відомі відносини «хазяїв» і «слуг» під час історичних змін – революцій тощо, та відношення «слуг» до майна «хазяїв». Отже у 1986 р. взагалі такої проблеми не існувало, тому для сучасних ймовірних аварій на АЕС мають бути передбачені дії контролю, що виключають, принаймні, навмисні дії. Тобто, у сучасних умовах потрібно враховувати можливість не тільки звичайної помилки діяльності, але й можливі навмисні дії. З цього слідує, що цей фактор не сприяє участі у ліквідації та збільшує ЙПП.

**Висновки.** Отже підсумок невтішний – з 10 розглянутих аспектів впливу одного з організаційних факторів, що впливає на поведінку людини-оператора, всі 10 не сприяють участі в ліквідації аварій висококваліфікованих фахівців у порівнянні з 1986 р. А з цього слідує: 1) ймовірність ЧПАЗ у сучасних умовах збільшується за рахунок збільшення ЙПП у більшості випадків; 2) потрібно створювати методику аналізу (розрахунку) ЛЧ для ІАБ АЕС з можливістю врахування індивідуальних ОФ для кожної АЕС; 3) потрібно зробити перерахунки ЧПАЗ для всіх блоків АЕС, щоб отримати реальні значення ЙПП; 4) оператори ЧАЕС 1986 року, які були засуджені радянським судом – не злочинці, їх дії на той час були такими під впливом негативних факторів та обставин, вони стали на той час заручниками цих організаційних факторів. Дії операторів під час ліквідації наслідків тяжкої аварії були у своїй основі адекватними ситуації, оціночні висновки дії, у порівнянні з можливими на цей час, показують кращі значення ЙПП, тобто очікуване значення ЙПП у сучасних умовах набагато більше. Саме тому рекомендуємо розпочати процедуру реабілітації засуджених у 1986 році операторів ЧАЕС та зробити перерахунки ІАБ енергоблоків АЕС з врахуванням сучасних значень організаційних факторів.

### Список використаних джерел:

1. Gertman D. I., Blakman H. S. Human Reliability And Safety Analysis Data Handbook. New-York: John Wiley & Sons, 1994. 457 p.
2. Swain A. D., Guttman H. E. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. Final Report. NUREG/CR-1278. Washington: United States Nuclear Regulatory Commission, 1983. 728 p.
3. Бегун В. В., Горбунов О. В., и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций: учеб. пособ. Киев: НТТУ КПИ, 2000. 568 с.
4. Sehgal V. R. Light Water Reactor (LWR) Safety. Nuclear Engineering And Technology, Vol.38 No.8 December 2006, p. 697 - 732.
5. Бегун В. В. Анализ и учет человеческого фактора Чернобыльской аварии 26 апреля 1986 года современными методами. *Ядерная и радиационная безопасность*, 2003. № 1.
6. Дятлов А. С. Чернобыль. Как это было. М., 2000 г.
7. Бегун В. В., Бегун С. В., Скалецкий Ю. Н. «Избыточные» силы и средства при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: актуальная проблема. *Моделювання та інформаційні технології*: зб. наук. праць ПІМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України. К., 2009. Вип. 53. С. 37 – 48.
8. Гречанинов В. Ф., Бегун В. В., Литвинов В. В. Анализ влияния организационных факторов на безопасность. *Управляющие системы и машины*. 2014. № 1. С. 83 – 92.
9. Бегун В. В., Гречанинов В. Ф. Человеческий фактор в авариях и его зависимость от ментальности. *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища*: зб. матеріалів III міжнар. конф. (Славутич, 25–27 квітня 2018 р.). Чернігів, 2018. С. 24 – 30.
10. SNI/R9817. Identification und Assessment of Organizational Factors Influence on the safety of NPPs State of the Art Report (SOAR) / Principal Working Group No. 1, Expanded Task Force on Human Factors. IAEA-OECD NEA PWG1 and ETF Members SOAR-reports, 1999
11. В. Н. Абрамова. Организационная психология, организационная культура и культура безопасности в атомной энергетике. Часть I. Психология и методы оценки организационной культуры и культуры безопасности на атомных станциях. - Москва • Обнинск, - 2009, с. 260.
12. Begun V., Begun S. Happenstance and the Pattern: The Historical Reenactment of the Chernobyl Disaster Causes (MESE20200510-1), Modern Environmental Science and Engineering (MESE) ISSN 2333-2581, USA
13. Пожежа в Кемерово у ТЦ "Зимова вишня": причини, жертви та факти трагедії. URL: [https://24tv.ua/pozhezha\\_kemerovo\\_2018\\_prichini\\_pozhezhi\\_zhertvi\\_fakti\\_tragediyi\\_v\\_kemerovo\\_n94362](https://24tv.ua/pozhezha_kemerovo_2018_prichini_pozhezhi_zhertvi_fakti_tragediyi_v_kemerovo_n94362)
14. Почему загорелась нефтебаза в Василькове: журналистское расследование. URL: <https://uainfo.org/blognews/1435077117-pochemu-zagorelas-neftebaza-v-vasilkove-zhurnalistское.html>

## **КОНЦЕПЦІЯ ГІБРИДНОЇ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ – ОСНОВА СТАЛОГО РОЗВИТКУ ДЕРЖАВИ**

*Бойко Володимир,  
Міскевич Ірина*

*Державна установа «Інститут економіки природокористування та сталого  
розвитку Національної академії наук України», Київ*

*volodymyr.boiko@ukr.net*

*miskevich94@gmail.com*

Загальновідомо, що традиційна вуглецева енергетика вже вичерпала свій ресурс як джерело енергозабезпечення суспільства, а кінець епохи вуглеводнів стає все виразнішим. Це пояснюється низкою факторів: вичерпністю природного викопного палива, постійним здороощанням енергоресурсів, значним забрудненням довкілля внаслідок неможливості трансформації викопного палива у енергію без здійснення антропогенного тиску, створенням соціальних проблем, зокрема погіршення здоров'я населення тощо. Таким чином людство ще з кінця ХХ ст. серйозно замислилося про перехід від вуглеводневої енергетики до енергогенерації, що базується на відновлювальних джерелах енергії, насамперед вітру, сонця і води.

Проте такий перехід ставить перед суспільством низку викликів, адже відновлювальна енергетика, попри свій бурхливий розвиток та технічне удосконалення, має низку, наразі непереборних недоліків, що не у повній мірі дозволяють суспільству перейти на забезпеченість виключно відновлювальними джерелами енергії. Насамперед це стосується значної залежності від природних умов (кліматичних, метеорологічних та геоморфологічних), низької ефективності при використанні встановленої потужності (низький КВВП), дороговартісності по відношенню до кількості виробленої енергії, переформатування господарського комплексу внаслідок вилучення значної кількості територіальних ресурсів для використання відновлювальною енергетикою. Окрім цього, «зелена» генерація також здійснює опосередкований негативний тиск на довкілля, адже для її функціонування і розвитку необхідний значний видобуток корисних копалин, перш за все металів, таких як літій. В перспективі виникне проблема утилізації і переробки відпрацьованих акумуляторних батарей і сонячних панелей, адже вони зосереджують у собі значну кількість токсичних речовин – свинець, кадмій, арсен (миш'як) тощо. А зважаючи на необхідну значну кількість вищезазначених засобів генерації для задоволення зростаючих потреб людства в електроенергії (лише майнінг одної криптовалюти Bitcoin споживає електроенергії більше ніж така країна як Аргентина [1]) то негативні екологічні наслідки від здавалося б екологічно безпечної відновлювальної енергетики можуть набути глобальних масштабів.

В цьому контексті на допомогу суспільству у декарбонізації економіки може прийти атомна енергетика, як найбільш ефективно і дешево джерело електроенергії. Попри велику кількість викликів, які постали перед атомною енергетикою, зокрема катастрофи на ЧАЕС та Фукусіма-1, проблема

переробки та утилізації відпрацьованого ядерного палива, негативні стереотипи в суспільстві щодо її екологічності і загроз яких вона несе суспільству, даний вид енергогенерації має значний потенціал для розвитку і може стати основою низьковуглецевої економіки суспільства.

Концепція гібридної енергетики полягає у одночасному використанні атомної та відновлювальної енергетики без широкого застосування вуглецевої. В перспективі цьому сприятиме як поступове підвищення ефективності відновлювальної енергетики, так і суттєві здобутки у сфері використання ядерної енергії.

Проблема існування об'єднаної енергетичної системи країни виключно на атомній і відновлювальній енергетиці полягає у низькій маневровій здатності сонячних і вітрових електростанцій та класичних АЕС, які було збудовано 30 і більше років тому, реакторні установки яких не здатні у постійному режимі динамічно змінювати свою потужність покриваючи піки споживання електроенергії.

Дану проблему може вирішити застосування новітніх малих модульних реакторів малої потужності, які здатні виступати в якості маневрового джерела електроенергії. Таким чином в енергосистемі України достатньо буде 3-4 потужних АЕС з «реакторами-мільйонниками» покоління «3+», достатньої кількості електростанцій, які працюють на відновлювальній енергії і розташування яких не призводить до вилучення територіальних ресурсів та стагнації в інших галузях господарства, певної кількості АЕС, що працюють на базі малих модульних реакторів і незначної частки звичайних ТЕС, які б задовольняли специфічні місцеві потреби. Таким чином концепцію гібридної енергетики можна представити у вигляді піраміди (рис. 1).



Рис. 1. Концепція гібридної низьковуглецевої енергетики (авторська розробка)

Україна має значний науково-технічний потенціал для реалізації такої концепції. Наша держава здатна забезпечити розвиток відповідної інфраструктури не лише за допомогою західних партнерів, а й на базі виробництва власних підприємств, таких як Турбоатом. При цьому необхідною є розширена співпраця з передовими державами світу в напрямку удосконалення технологій енергогенерації. Певні кроки у цьому напрямі уже зроблені. Так НАК «Енергоатом» і американська компанія Holtec International у 2019 р. підписали угоду про створення міжнародного консорціуму, метою якого є сприяння діяльності щодо впровадження в Україні технології малих модульних реакторів (ММР) SMR-160 [2].

Наша держава потребує перейняття досвіду й стосовно розвитку відновлювальної енергетики, насамперед підвищення використання КВВП і одночасного застосування територіальних ресурсів не лише під відновлювальну енергетику, а й до прикладу у сільському господарстві.

#### **Список використаних джерел:**

1. Bitcoin consumes 'more electricity than Argentina' [Електронний ресурс] // BBC. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.bbc.com/news/technology-56012952>.

2. Енергоатом, ДНТЦ ЯРБ та Holtec International підписали Угоду про створення міжнародного консорціуму [Електронний ресурс] // ДП «НАЕК «Енергоатом». – 2019. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.energoatom.com.ua/ua/press\\_centra-19/novini\\_kompanii-20/p/energoatom\\_dntc\\_arb\\_ta\\_holtec\\_international\\_pidpisali\\_ugodu\\_pro\\_partnerstvo\\_aka\\_peredbacae\\_stvorennia\\_miznarodnogo\\_konsorciumu-45069](http://www.energoatom.com.ua/ua/press_centra-19/novini_kompanii-20/p/energoatom_dntc_arb_ta_holtec_international_pidpisali_ugodu_pro_partnerstvo_aka_peredbacae_stvorennia_miznarodnogo_konsorciumu-45069).



## НОВІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ДЛЯ ТГ ТИПУ ТВВ-1000-2УЗ

*Іван Братухін, начальник дільниці цеху з ремонту електротехнічного обладнання*

*ВП «Атомремонтсервіс» ДП «НАЕК «Енергоатом»*

*м. Славутич*

*bratuhin@ars.atom.gov.ua*

**Анотація** Метою дослідницької роботи є дослідження конструкторсько-технологічних рішень та порівняльний аналіз технологій модернізації турбогенераторів типу ТВВ-1000-2УЗ, запропонованих ВАТ "Електросила" (Росія) та концерном "ALSTOM" (Франція).

На основі дослідження історії дефектів машин вказаного типу протягом останнього п'ятнадцятиріччя на АЕС України обґрунтовується напрямок та необхідність модернізації певних вузлів кінцевих частин статора ТГ, розглядаються запропоновані конструкції, обґрунтовується їх доцільність та відповідність основним засадам будівництва ТГ великої потужності.

**Annotation** The purpose of the research work is to investigate into the design and engineering solutions and carry out a comparative analysis of the technologies for upgrading turbine generators of the type "ТВВ-1000-2УЗ" proposed by the OJSC "Electrosila" (Russia) and the company "ALSTOM" (France).

Based on the study of the history of defects of machines of the referenced type observed over the period of the last fifteen years at the nuclear power plants of Ukraine this research effort provides a substantiation for the direction and need for upgrading certain components of the end parts of the turbine generator stators, considers the proposed designs of structural elements, justifies the appropriateness and compliance with the fundamental principles of high capacity turbine generator design and construction.

Аналіз конструкторсько-технологічних рішень щодо кріплення лобових частин обмотки статора ТГ типу ТВВ-1000-2УЗ показує, що основним недоліком конструкції є надмірна жорсткість – відсутність свободи переміщення обмотки в аксіальному напрямку.

Знакозмінні електродинамічні сили є причиною механічних напруг та навантажень на деталі статора ТГ, що поступово призводить до послаблення кріплення текстолітових деталей, розтріскування клейових з'єднань, і, як наслідок, до втрати їх механічної міцності: випадання клинів, шпильок; послабленню розклинювання, витирання основної ізоляції та пробою стрижнів, а вібрації жорсткої конструкції кріплення водяних колекторів є причиною їх подальших ушкоджень.

Для вирішення вищезазначених проблем необхідно міняти конструкцію кінцевих частин з повними їх перерахунками. Було запропоновано наступні рішення:

1. «Мала» і «велика» модернізації ВАТ «Електросила»;
2. Модернізація концерну «ALSTOM».

Жодна з технологій не вирішує в повному обсязі комплексу вищезгаданих конструкційних проблем. Технології ВАТ «Електросила» спрямовані на ліквідацію наслідків дефектів ТГ у випадку їх виявлення, без належного моніторингу протягом експлуатації і без проведення базового теплового і електромагнітного перерахунку кінцевих частин модернізованого ТГ.

Технологія концерну «ALSTOM» базується на вдано і багаторазово апробованій конструкції ТГ великої потужності французького виробника, але також без перерахунків та випробувань на натурних зразках ТГ типу ТБВ-1000-2У3.

### **NEW ENGINEERING SOLUTIONS FOR UPGRADING TURBINE GENERATORS OF THE TYPE “TBB-1000-2У3”**

The analysis of design and engineering solutions for mounting the front parts of the stator coil insulation of turbine generator of the type “TBB-1000-2У3” shows that the main disadvantage of the design is the excessive rigidity, and namely the lack of axial movement freedom of the insulation.

The alternating electrodynamic forces are the cause of mechanical stresses and loads on the stator parts of the turbine generator, which gradually leads to a weakening of the fastening of textolite parts, cracking of adhesive joints, and, as a consequence, to the loss of their mechanical strength: loss of wedges and studbolts, weakening of wedging, rubbing wear of the main insulation and stator insulation faults; and vibrations of rigid fastening joints for water collectors are the reason of their further damages.

It appears to be necessary to change the design of the end parts with their complete recalculations in order to solve the above problems. For this purpose the following solutions were proposed:

1. “Small” and “big” upgrade by the OJSC “Electrosila”;
2. Upgrade by the company “ALSTOM”.

None of the proposed technologies is fully capable of solving the entirety of the above-mentioned design problems. The technologies proposed by the OJSC "Electrosila" aim to eliminate the consequences of the turbine generator defects in case of their detection, without proper monitoring during operation and without basic thermal and electromagnetic recalculation of the end parts of the upgraded turbine generator.

The technology proposed by the company “ALSTOM” is based on the successfully and repeatedly tried and tested design of a high capacity turbine generator used by the French manufacturer, but it does not suggest making any recalculations or carrying out tests of any full-scale specimens of a turbine generator of the type “TBB-1000-2У3” either.

# ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ РОЗПОДІЛЕНОЮ СИСТЕМОЮ ВИЯВЛЕННЯ ВТОРГНЕНЬ НА ОСНОВІ BLOCKCHAIN

*Бурмака Іван Анатолійович*  
*Національний Університет “Чернігівська Політехніка”,*  
*Ivan.Bourmaka@stu.cn.ua*  
*Дорош Марія Сергіївна*  
*Національний Університет “Чернігівська Політехніка”,*  
*mariyaya5536@gmail.com*

**Abstract:** Blockchain technology can help to build a secure and distributed intrusion detecting system which can work without central node. This makes IDS more robust to node failure. But usually blockchain algorithms are not energy efficient. Firstly it's because most of blockchain algorithms came from cryptocurrencies, where waste of computational resources and energy is covered by reward which users get from mining. But in case of intrusion detecting waste of computational resources is unacceptable because IDS nodes are not so powerful as mining equipment and have other main purpose - most of computational resources must be used for monitoring network traffic and detecting network intrusions. And the second reason to optimize a blockchain algorithm for intrusion detecting system is that some intrusion detecting nodes don't have powerful hardware so high resource usage can cause dropping of some network packages and unstable work of such nodes.

So in this work we are looking at ways to optimize blockchain algorithm for intrusion detecting system and evaluating optimization benefit.

**Keywords:** Intrusion detecting system, blockchain, optimization, proof-of-stake, computation resource usage.

**Анотація:** Розглянуто шляхи оптимізації blockchain алгоритмів для розподіленої системи виявлення вторгнень, які б дозволили знизити витрати обчислювальних ресурсів та зробити систему більш енергоефективною. Також проведені теоретичні розрахунки підвищення ефективності при застосуванні такої оптимізації.

**Ключові слова:** Система виявлення вторгнень, blockchain, оптимізація, proof-of-stake, використання обчислювальних ресурсів.

## **Вступ**

Використання blockchain технологій в системах захисту дозволяє створювати децентралізовані розподілені системи виявлення вторгнень. Така архітектура дозволяє збільшити надійність системи за рахунок відмови від центральних керуючих вузлів.

Але, зазвичай, алгоритми роботи blockchain підсистеми мають низьку енергоефективність. Через це для застосування blockchain технології треба

використовувати достатньо потужне апаратне забезпечення, що робить систему виявлення на основі blockchain економічно не вигідною [1].

Основна мета даної роботи - розглянути один із способів оптимізації blockchain підсистеми для підвищення її енергоефективності.

### **Проблема blockchain компонента системи виявлення вторгнень**

Blockchain компонент складається з трьох основних модулів: ланцюжок блоків, обробник даних з протоколом консенсусу, та модуль створення нових блоків.

При цьому одним з важливих елементів blockchain підсистеми є протокол консенсусу. Запропонований для поставленої мети протокол консенсусу, - модифікація протоколу POS, де замість накопичення певного об'єму криптовалюти використовується "накопичення" часу. Такий протокол консенсусу є значно ефективніший в плані використання обчислювальних ресурсів [2]. Він дозволяє підтримувати роботу розподіленої мережевої системи виявлення вторгнень, не створюючи при цьому значних навантажень на обчислювальні ресурси системи, у порівнянні з POW протоколом [3].

Але не зважаючи на те, що протокол консенсусу достатньо невибагливий до обчислювальних ресурсів, в описаному алгоритмі створення блоків все ж можна помітити неоптимальне використання обчислювальних ресурсів (так само як і в класичному варіанті протоколу Proof-of-Stake [4]). Ця неоптимальність полягає у тому, що вузли які претендують на створення нових блоків виконують спроби створити новий блок увесь час, не зважаючи на те, що вірогідність створення нового блоку при певних умовах для конкретного вузла може бути достатньо малою. А, отже, така витрата обчислювальних ресурсів у нашому випадку не має сенсу (оскільки в нашому випадку вузли не конкурують за нагороду за створення блоку, тоді як у контексті криптовалют за протоколом Proof-of-Stake, такі спроби мають певний сенс, оскільки рано чи пізно спроби призведуть до створення нового блоку, а отже і отримання нагороди за блок [5]). Оскільки, в нашому випадку, вузли не отримують нагороди за створення блоків, а оптимальне використання ресурсів для системи виявлення вторгнень є важливим, можна зменшити навантаження на центральний процесор за рахунок пропуску спроб створення нового блоку, у випадку коли вірогідність його створення дуже низька.

### **Оцінка оптимальності алгоритму та спосіб його оптимізації**

Для оцінки вірогідності вдалого створення блоку, спочатку впевнімося що ланцюжок хеш функцій дає нам рівномірний розподіл, для цього для 8000 випадкових наборів даних порахуємо значення  $sha256(sha256(data))$  та побудуємо графік розподілу, щоб впевнитися що результат близький до рівномірного розподілу. Як бачимо на графіку (рис.1), результати подвійної функції sha256 на випадкових даних розподілені достатньо рівномірно, отже, для оцінки вірогідності створення блоку будемо вважати що розподіл рівномірний. У випадку рівномірного розподілу, математичне сподівання

складає  $M(X) = (n+1)/2$ . При цьому імовірність появи будь якого із значень однакова і дорівнює  $P_k = P(X=k) = 1/n$ , де  $n$  кількість значень у множині  $X$ .

Виходячи з умови рівномірності розподілу можемо оцінювати вірогідність створення блоку при поточній складності як відношення складності до максимального значення результату хеш-функції. Sha256 видає результат розміром 256 біт, а отже максимальне числове представлення результату  $2^{256}$ .

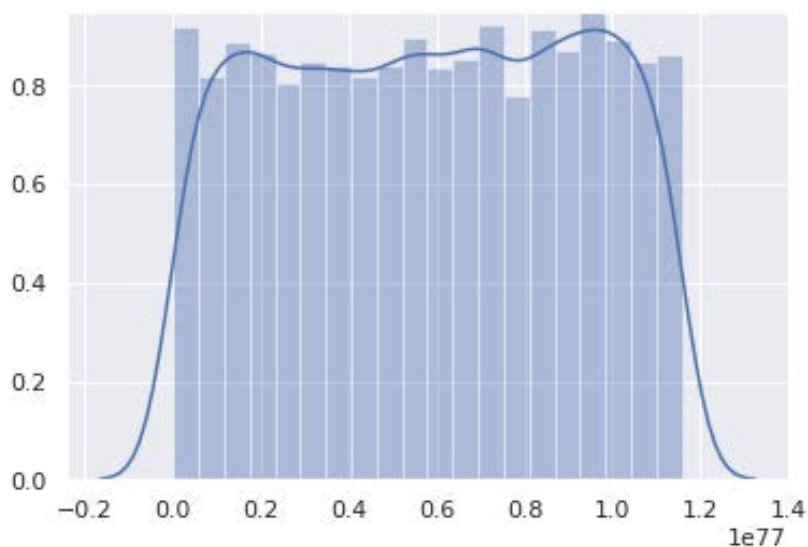


Рис.1: Розподіл подвійної sha256 на випадкових даних

Спираючись на запропонований алгоритм розрахунку складності здобування блоку (залежно від того скільки часу вузол працював і не видобував нових блоків, та сумарної швидкості видобування блоків в мережі) проведемо оцінку вірогідності створення нового блоку усього діапазону можливих значень складності (рис.2).

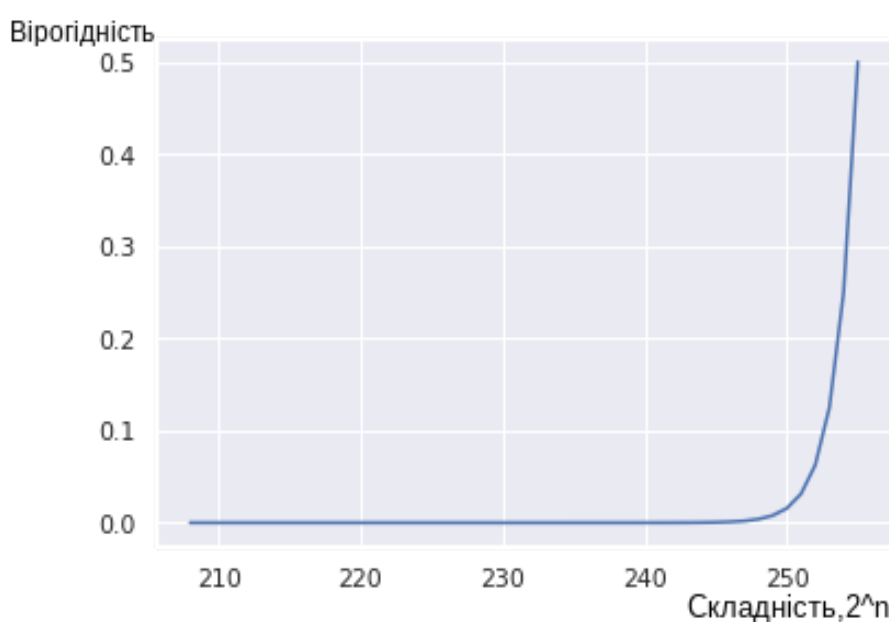


Рис.2: Залежність вірогідності створення нового блоку від поточного значення складності (складність задана у вигляді ступеня числа 2).

Проаналізувавши графік бачимо, що при пороговому значенні складності меншому за  $2^{245}$ , вірогідність створення нового блоку близька до нуля, це означає, що навіть значно більша кількість спроб, скоріш за все, не призведе до створення нового блоку. А отже спроби створити блок при таких значення складності це частіше за все марна витрата обчислювальних ресурсів.

Виходячи з того, що діапазон ефективного створення нових блоків займає близько п'ятої частини загального діапазону значень складності, можна вважати що така оптимізація дозволить зекономити близько 80% процесорного часу, що особливо важливо для малопотужних вузлів, тоді як для більш потужних вузлів цей діапазон можна розширити, що дасть можливість частіше створювати нові блоки за рахунок менш ефективного використання обчислювальних ресурсів.

### **Висновки**

Таким чином, оптимізований алгоритм видобування нових блоків, дозволить знизити середнє навантаження на центральний процесор на майже 80%, за рахунок відмови від виконання тих операцій, позитивний результат яких маловірогідний. Така оптимізація особливо актуальна для мобільних та малопотужних вузлів, для яких надмірні енерговитрати недопустимі.

### **Список використаних джерел:**

1. Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G., & Keller, R. (2020). The energy consumption of blockchain technology: beyond myth. *Business & Information Systems Engineering*, 62(6), 599-608.
2. Burmaka, I., Stoianov, N., Lytvynov, V., Dorosh, M., & Lytvyn, S. (2020, June). Proof of Stake for Blockchain Based Distributed Intrusion Detecting System. In *International scientific-practical conference* (pp. 237-247). Springer, Cham.
3. Burmaka, I. A., Lytvynov, V. V., Skiter, I. S., & Lytvyn, S. V. (2020). Evaluating a blockchain-based network performance for the intrusion detection system. *Математические машины и системы*, (1).
4. Zhang, S., & Lee, J. H. (2020). Analysis of the main consensus protocols of blockchain. *ICT express*, 6(2), 93-97.
5. Nguyen, C. T., Hoang, D. T., Nguyen, D. N., Niyato, D., Nguyen, H. T., & Dutkiewicz, E. (2019). Proof-of-stake consensus mechanisms for future blockchain networks: fundamentals, applications and opportunities. *IEEE Access*, 7, 85727-85745.

## WHAT IS THE FUTURE OF THE NUCLEAR SECTOR IN UKRAINE?

*Mykola Voytiv*

*Position: head of energy projects at the non-governmental organization*

*“New Generation Management”, Kyiv*

*e-mail: mykola.ngm@gmail.com*

The article leads to overview of the Ukrainian nuclear sector. It stresses on the issues of European context of nuclear sector, modernization and new technologies (small modular reactors), fuel diversification and underlining with the topic of corporatization and transparency in the sector. All those issues may encourage a reader to make a general evaluation and forecast of the nuclear industry.

The levelized cost of energy of nuclear sector rose by approximately 32% during 2015-2019. However, if we talk about electricity generation, nuclear generation is not the cheapest anymore – it is most expensive type of generation and the development and maintenance of the entire infrastructure of nuclear generation still need millions of US dollars.

Ukraine is the eighth country in the world in terms of nuclear power plant capacity. The country is now in the process of repairing, modernising and finding new technologies to meet the electricity demand. However, a focus on management and transparency is still necessary in order to have a safe, effective and publically profitable nuclear power sector.

Nuclear energy began to develop actively and significantly in the second half of the 20th century. This boom was primarily due to the dynamism felt in all sectors of industry which was based on large numbers of labour and massive electricity demands. Yet, the beginning of the 21st century began to see a decline in this sector. Today competition in the energy sector contributes to the fact that energy markets are developing very rapidly and energy resources are becoming more affordable. According to the *World Nuclear Industry Status Report 2020*, for the first time in history (in 2019), non-hydro renewables such as solar, wind and biomass generated more electricity than nuclear power plants – 2.4 gigawatts of new nuclear plants installed compared to 98 gigawatts of solar and 59.2 gigawatts of wind. The world’s operational nuclear power capacity has declined by 2.1 per cent by the middle of 2020. The stagnation of the sector continues.

The share of nuclear energy in global electricity production has fallen from 17 per cent in 2000 to 10 per cent in 2020. It cannot, therefore, be viewed with optimism. The International Energy Agency (IEA) foresees a huge decline of energy investments globally due to coronavirus pandemic. The IEA forecasts a decrease of 20 per cent (nearly \$400 billion) in 2020. While some of the world’s leading economies (the United States, France, Japan, and Canada) are actively using nuclear generation, others like Germany, Italy, Switzerland are beginning to abandon it by developing and investing in renewable sources. Even in Australia, which ranks first in the world with uranium reserves (the main material for nuclear

fuel production) and possesses around 30 per cent of the world's known reserves with tremendous potential for nuclear power generation, with public support of almost 50 per cent, the government is still postponing the construction of the first nuclear power plant.

In Europe, France has the biggest nuclear energy sector, around 70-73 per cent of its electricity is generated by nuclear power. Yet, Électricité de France S.A. (EDF) announced a reduction of its 2020 nuclear outlook to 300 terawatt hours due to a disruption of the maintenance schedules caused by the COVID-19 pandemic and the reduced power demand. The EDF estimated that for 2021 and 2022, the range of usage will be between 330 TWhs and 360 TWhs annually. In its quarterly financial report published in March 2020, the EDF noted a “slowdown of projects under construction” due to the pandemic.

Poland has announced intentions to start building its first nuclear plant. According to Stefan Taczanowski, a leading energy expert from Kraków's University of Science and Technology: “The plan to build six power plants/reactors with a total capacity of six gigawatts can be considered. In addition, it must not be forgotten that the consequences of this choice will last for at least 80 years and, given the construction and decommissioning time of power plants, may exceed the mid-22nd century.”

In the United Kingdom, the issue of building new nuclear plants is periodically raised as a counterbalance, first of all, to the significant reduction in pollution and smog reduction. However, according to their experts, the nuclear infrastructure, in the process of operation and utilisation of spent nuclear fuel, can still have a negative impact on the environment.

In Ukraine, meanwhile, the forecast balance of electricity of the United Energy System of Ukraine (UES) for 2021 was presented at the ministry of energy. The president of the state enterprise National Nuclear Energy Generating Company Energoatom (Energoatom) confirmed that the expected production will be on the level of 75.233 billion kilowatt hours. This is exactly 50 per cent of all electricity generation of which is planned for 2021. The directed an optimisation of the schedules of the 2020-2021 repair campaign may increase the expected volume of electricity production by Ukraine's nuclear power plants by 2.9 billion kilowatt hours (from 72.3 to 75.2 billion kWh). This will improve the financial condition of the state energy generating enterprise and will help ensure a sustainable operation during the heating season.

Energoatom is in fact the most important player on the electricity generation market, though legally it is not. The main problems of the market in Ukraine have been accumulated over the past 25 years: cross-subsidisation, growth of debt, low investment attractiveness, high regulation, and a monopoly in generation and supply markets. However, Ukraine has recently adopted a new law on the electricity market (in 2017), which changed the market formation mechanism and introduced new mechanisms. In particular, it makes Energoatom an independent player in the electricity generation and trading sector. Energoatom operates four nuclear power plants: Zaporizhzhya, Rivne, South-Ukraine, Khmelnytsky with 15 power units (as of March 26th, eleven units are operating and four are under



reconstruction). All reactors are Russian VVER types. The total installed capacity is 13,835 megawatts.

Ukraine is the eighth country in the world in terms of nuclear power plant capacity. Energoatom provides about an average of 55 per cent of Ukraine's need for electricity, and during the autumn-winter periods this figure reaches up to 70 per cent. In the first half of 2020, the installed capacity utilisation rate of the plants was 65.2 per cent, which is 5.8 per cent less than the same time period in 2019. At the same time, the coefficient of readiness to carry a nominal electric load of Ukrainian nuclear plants in the first half of 2020 amounted to 74.6 per cent – 9.4 points higher than the installed capacity utilization rate. In other words, the nuclear power plants' capacity was not limited administratively and electricity production in the first half of 2020 could have increased by 5.3 billion kWhs.

In August 2019, Energoatom embarked on a significant modernisation programme for all 15 reactors to be completed over the years 2020-2024. The programme involves the replacement of turbine capacitors as well as turbine upgrade work. As the managing director of Westinghouse Electric Sweden AB recently stated in Kyiv: "We are convinced that nuclear generation should continue to be an important component of the global energy industry in general and the Ukrainian energy mix in particular in the future." At the same time, he noted that the power units of Ukraine's plants "are gradually aging, and the time will come when they will have to be decommissioned."

Small modular reactors (SMRs), which generate nuclear power on a smaller scale, are gaining popularity today. However, to construct small modular reactors, a detailed analysis and time is needed. In June 2019, the Ukrainian Module Consortium – a consortium between the American company Holtec, Energoatom, and the State Scientific and Technical Centre for Nuclear and Radiation Safety (SSTC NRS) – announced intentions to build six small modular reactors at the Rivne nuclear power station site. Energoatom has considered deploying such units more widely to complement intermittent renewables. In February 2020, SSTC NRS and NuScale Power, an American private company that designs and markets SMRs, signed a memorandum of understanding regarding collaboration on the regulatory and design gaps between the US and Ukrainian processes for the licensing, construction and operation of a NuScale power plant in Ukraine.

However, as of November no SMR with a capacity of 100 MWs or more has been commissioned in the world. Most of them are still in the planning, development or study stages, in the US, Canada, Japan, South Korea, Denmark, France, the Czech Republic and the UK. The exceptions are the Chinese SMR ACP100 with a capacity of 125MWs (the construction of which began in 2019) and the Canadian SMR ARC-100 with a capacity of 100MWs, the previous phase of construction of which was approved in December 2019.

Nevertheless, the advantages of small modular reactors are that they require less investment and the probability of an accident is several times less, and they have a smaller impact on the environment. The disadvantage is that they can meet only the needs of small individual settlements and the operation of a small production infrastructure.

Ukrainian nuclear power units operate fuel from two different manufacturers: Westinghouse (Sweden) and the Russian-based TVEL. The process of diversifying sources of nuclear fuel supply for Ukrainian plants has been taking place over 20 years now, but very slowly. Although Russia's aggression in Ukraine has been going on for almost seven years, the real diversification has only started a few years ago. The procedure of "validation", which does not allow Ukraine to switch from Russian nuclear fuel immediately, has been the biggest barrier. It should be gradually replaced. As representatives of Energoatom reported: "In the next five to seven years, TVEL can be completely replaced by Westinghouse fuel."

Generally speaking, Ukrainian uranium concentrate is sent to the Russian Federation to produce nuclear fuel. The Russian company undertakes a procedure of fabrication, conversion and enrichment of this concentrate, and after this cycle, nuclear fuel is imported to Ukraine as Russian produced. In 2019, Ukraine purchased nuclear fuel for a total of 396 million US dollars, which is 24.1 per cent more than in 2018. Russian-made fuel was bought for \$240 million (60.7 per cent) and Swedish fuel for \$156 million (39.3 per cent). In January 2018, Energoatom extended its contract with Westinghouse to 2025. The company stated that seven of the country's 15 nuclear reactors will use Westinghouse fuel by 2025.

Ukraine still spends about \$200 million each year to its aggressive neighbour for the storage of spent nuclear fuel service as the Central Spent Fuel Storage Facility (CSFSF) for Ukrainian NPPs is still under construction. In his investigation on the construction of this extremely important facility, Ukrainian journalist Oleksandr Chornovalov found that "the CSFSF, which has already cost Energoatom almost \$53 million, needs more money to complete its construction. Energoatom has announced a new tender for the completion of construction for \$23.5".

Energoatom has attracted financing from European institutions including the European Reconstruction Bank and Development (EBRD) and Euroatom. According to agreements signed back in 2013, the EBRD has provided a 300 million-euro loan to Energoatom. Another loan agreement for 300 million euro was signed with Euroatom (also in 2013). All the agreements were ratified by the relevant laws of Ukraine.

The goal of the financing consists of two pillars: First, the implementation of the complex (consolidated) safety upgrade programme with the purpose of the further improvement of nuclear safety, ensuring efficient and reliable performance in the energy branch, bringing safety of Ukrainian nuclear power plants to the level that meets international standards; and second, the corporatisation of Energoatom in compliance with the roadmap developed by the corporatisation consultant in compliance with best international practice.

According to the agreements, corporatisation is defined as "the transformation of the Borrower [*Energoatom*] into a fully state-owned joint-stock company, including the creation of a management structure that is suitable for such a company. For the avoidance of doubt, the term 'corporatisation' does not mean the privatisation of the borrower." It was important to stress the definition as the issue of Energoatom's corporatisation in political and professional environment is very sensitive.

Despite the fact that the Energoatom's corporatisation is still being discussed in Ukrainian society, such a process should take place as soon and as transparently as possible. Messages that corporatisation will contribute to the privatisation of Energoatom are weak as counter-arguments, as the Ukrainian people, represented by the Cabinet of Ministers of Ukraine, will be the sole owners of the newly created state joint-stock company (probable as public joint-stock company).

As for transparency, the supervisory board of Energoatom should be created with the most meticulous approach to its members, as it involves an army of 34,000 professional and highly skilled workers who need to be protected and always motivated by market wages, it is also one of the pillars of energy independence and security in Ukraine and one of the main budget-forming enterprises of the domestic economy.

The criterion of many years of experience in the nuclear energy sector should not be the main one when selecting candidates. First, it is necessary to pay attention to which private or state-owned companies, and in what countries, potential candidates have worked in. Under no circumstances should people be allowed to covertly lobby the interests of influential owners of private companies or countries that are in open, or hidden, unfriendly relations with Ukraine. This should be the basis for selection.

A preference should be given to Ukrainian citizens (with detailed verification of the person, place of birth, acquisition of citizenship and jobs), who will be able to justify the importance of their mission to the supervisory board. All this will help to form an appropriate controlling collegial body that will contribute to the sustainable development of the nuclear sector of Ukraine and will clearly comply with the legislation and specific the interests of Ukraine.

#### **Sources used in the article:**

- 1 [https://ec.europa.eu/euratom/docs/2020\\_2nd\\_ESA\\_QR.pdf](https://ec.europa.eu/euratom/docs/2020_2nd_ESA_QR.pdf)
- 2 <https://biznesalert.pl/atom-polska-pwr-energetyka/>
- 3 <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/ukraine.aspx>
- 4 [https://en.wikipedia.org/wiki/Small\\_modular\\_reactor](https://en.wikipedia.org/wiki/Small_modular_reactor)
- 5 <https://www.radiosvoboda.org/a/schemes/30842558.html>
- 6 <https://www.worldnuclearreport.org/>
- 7 <https://www.pv-magazine-australia.com/2020/09/25/nuclear-power-is-now-the-most-expensive-form-of-generation-except-for-gas-peaking-plants/>

# ЛАБОРАТОРНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПОРОВОМУ ПРОСТОРИ ЛАВОПОДІБНИХ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Габелков С. В., Долін В. В., Жиганюк І. В.  
Зубко О. В., Краснов В. О.*

**Резюме:** Розроблено та виготовлено лабораторну установку для дослідження фізико-хімічних процесів в лавоподібних паливовмісних матеріалах (ЛПВМ) при перерозподілі урану, продуктів поділу та активації з мікрровключень  $UO_2$  по поровому простору ЛПВМ. Основним вузлом лабораторного пристрою дозованої подачі розчинників та реагентів для селективного вилуговування речовин з мінеральних об'єктів є електрохімічна комірка, в якій відбувається генерування кислоти, кисню та лугу, що забезпечує внутрішньопорове вилуговування урану, продуктів поділу та трансуранових радіонуклідів. Для повного розкриття «глухих» пор застосовується ультразвукова активація.

**Ключові слова:** паливовмісні матеріали, чорна кераміка, вилуговування, поровий простір, оксиди урану, електрохімічна комірка, ультразвукова активація.

## **Вступ**

Сучасний стан ядерної та радіаційної безпеки Об'єкта «Укриття» визначається станом опроміненого ядерного палива, яке унаслідок мелтдауну трансформувалося у лавоподібні паливовмісні матеріали (ЛПВМ), обсяг яких становить близько 1200 т. Протягом 35 років, що минули після Чорнобильської катастрофи, під дією природних, техногенних та радіаційних чинників відбулася деструкція, зміна фазового складу ЛПВМ, утворення нових кристалічних фаз, що супроводжувалося перерозподілом та зміною рухомості високорадіоактивних сполук. Зміна фазової структури ЛПВМ вимагає розроблення методів штучного перерозподілу осередків радіоактивності, які існують у вигляді мікрровключень паливних матеріалів на основі  $UO_2$ , з метою запобігання радіаційно стимульованого руйнування ЛПВМ. Для виконання таких робіт було розроблено та виготовлено лабораторну модель пристрою для електрохімічного вилуговування ЛПВМ.

## **Технічні вимоги до пристрою**

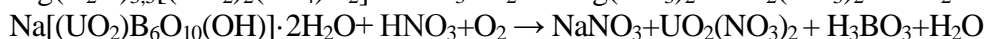
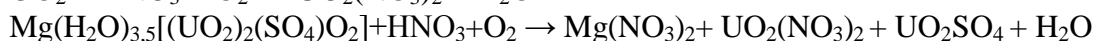
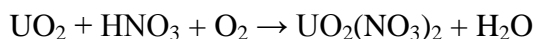
Перед розробниками було поставлено наступні завдання:

- установка має забезпечувати розчинення включень  $UO_2$  хімічними реагентами з наступним перерозподілом радіонуклідів та їх осадженням у мікропорах;
- установка має забезпечувати підвищення стійкості оброблених ЛПВМ щодо зовнішніх чинників природного та техногенного впливу;
- установка має забезпечувати непоширення радіоактивних матеріалів за межі твердої фази ЛПВМ, запобігати збільшенню їх об'єму та мобільності радіонуклідів;

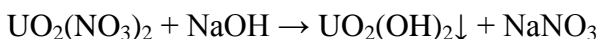
- установка повинна функціонувати в умовах мінімального співвідношення рідкої та твердої фаз;
- установка повинна забезпечувати безперебійну роботу в умовах високих радіаційних полів.

### Технічне рішення та принцип дії установки

Дослідження ЛПВМ показали, що у складі «чорної кераміки» ідентифікуються кристалічні фази на основі оксиду урану  $UO_2$  та інших уранвмісних сполук:  $Mg(H_2O)_{3,5}[(UO_2)_2(SO_4)O_2]$  (до 5,5 %),  $CaNaFe_2H(UO_2)_2(PO_4)_4(OH)_2(H_2O)_8$  (< 1 %),  $Na[(UO_2)B_6O_{10}(OH)] \cdot 2H_2O$  (< 0,5 %) [1]. Ці сполуки розчиняються в азотній кислоті в присутності кисню за реакціями:



В усіх реакціях утворюються розчинні ураніл нітрат або ураніл сульфат, які осаджуються в порах шляхом оброблення лугом:



Малорозчинні сполуки ураніл гідроксиду при взаємодії зі склоподібними силікатами, фосфатами або боратами утворюють нерозчинні сполуки, які осаджуються в порах склоподібних ЛПВМ.

На етапі проектування лабораторної установки дозованої подачі розчинників та реагентів для селективного вилуговування речовин з мінеральних об'єктів виробником було враховано спеціальні вимоги, які сформульовано для дослідження процесів в ЛПВМ. Пристрій спроектовано для реалізації проточно-інжекційного активаційного методу розчинення і аналізу включень оксиду урану зі зразків ЛПВМ. Матеріал для виготовлення електрохімічних комірок – політетрафторетилен (ПТФЕ) – стійкий по відношенню до більшості кислот та лугів. Матеріал трубок – силіоксан. При випробуваннях установки силіоксанові трубки витримали дію концентрованої азотної кислоти протягом тижня.

Установка складається з блоку живлення, який забезпечує та регулює подачу електроенергії на електродвигун; електродвигун через редуктор приводить до руху двоканальний перистальтичний насос, який окремими каналами здійснює циркуляцію аноліту і католіту та забезпечує подачу вилуговуючих розчинів до проточної кювети, у якій здійснюється вилуговування зразків ЛПВМ. Завдяки перемикачеві забезпечується подача одного та/або двох розчинів у проточну кювету. В кюветі відбувається вилуговування зразків ЛПВМ (рис. 1).

Через мікротрубопроводи розчини подаються до адсорбенту, призначеного для сорбції відповідних радіонуклідів. Далі завдяки системі мікротрубок розчини повертаються до насосу.

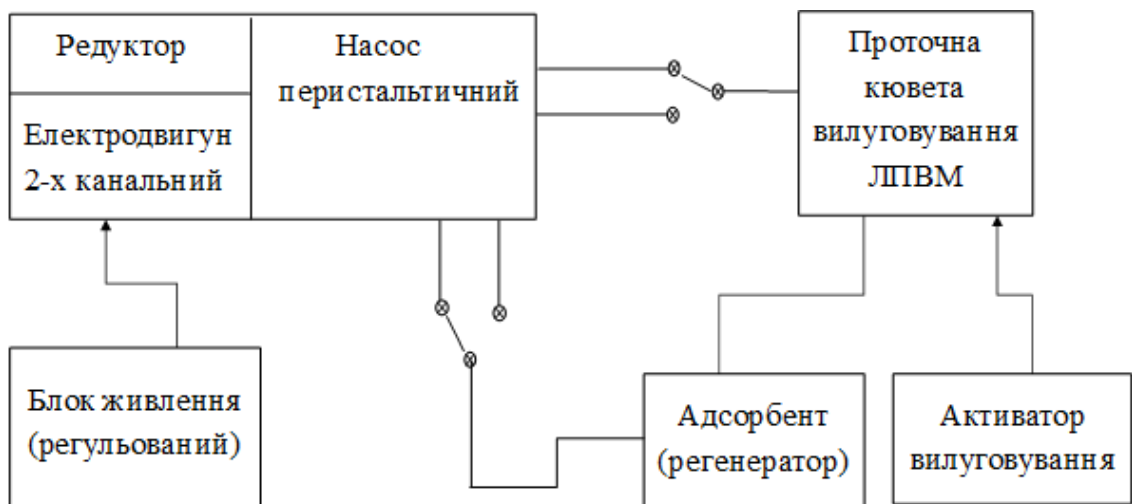


Рис. 1. Блок-схема установки для вилуговування ЛПВМ

Технічне рішення щодо послідовного кислотно-лужного оброблення зразків ЛПВМ досягається конструкцією активатора вилуговування (див. рис. 1), роль якого виконує електрохімічна комірка (рис. 2). На основі, покритій плівкою ПТФЕ, розміщено коаксіально циліндричні сегменти комірки, виготовлені з ПТФЕ. Між ними введено композитні графітові електроди. На плівці ПТФЕ розміщено з'єднувальну мембрану. На ній розміщено зразок ЛПВМ, який притиснуто циліндричним графітовим електродом, обладнаним каналом для подачі електроліту. У нижній частині комірки розміщено активаційний стріктор ультразвукового генератора.

У комірку заливають розчин нітрату натрію. Під дією електричного струму в анодному просторі з розчину електроліту утворюється азотна кислота та кисень, у катодному - генерується гідроксид натрію. З метою розкриття глухих пор «чорної кераміки» та забезпечення доступу розчинів всередину пор застосовується ультразвукова активація. Таким чином забезпечується проходження хімічних реакцій розчинення-осадження в поровому просторі ЛПВМ без винесення розчинених радіоактивних матеріалів за межі твердої фази.

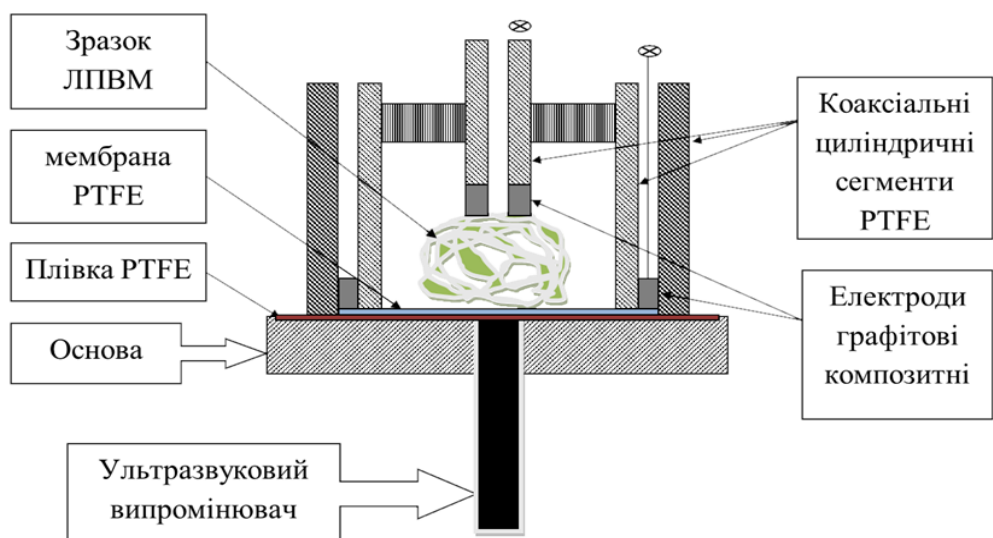


Рис. 2. Схема електрохімічної комірки з ультразвуковим активатором

## **Висновки**

Розроблено та виготовлено лабораторну установку для дослідження фізико-хімічних процесів в лапоподібних паливовмісних матеріалах. Основним вузлом лабораторного пристрою дозованої подачі розчинників та реагентів для селективного вилуговування речовин з мінеральних об'єктів є електрохімічна комірка, в якій відбувається генерування кислоти, кисню та лугу, що забезпечує внутрішньопорове вилуговування урану, продуктів поділу та трансуранових радіонуклідів з включень на основі урану та перерозподіл радіонуклідів в поровому просторі. Для повного розкриття «глухих» пор застосовується ультразвукова активація.

## **Список використаних джерел:**

1. Gabelkov S. V., Zhyganiuk I. V., Kudlai V. G. et al. (2019)// NUCLEAR PHYSICS AND ATOMIC ENERGY: 20, No. 4: 388 - 396: <https://doi.org/10.15407/jnpae2019.04.388>.

## **Інформація про авторів**

**С. В. Габєлков** – завідувач відділу РМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: [s.gabelkov@isnpp.kiev.ua](mailto:s.gabelkov@isnpp.kiev.ua)

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, їхня деградація, прогнозування, радіоактивні відходи, нанорозмірні порошки та матеріали

**О. В. Зубко** – науковий співробітник, ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України НАН України; e-mail: [g200709g@yahoo.com](mailto:g200709g@yahoo.com)

Області наукових інтересів: ядерна геохімія, електрохімія, радіогеохімія, екологічна безпека

**В. В. Долін** – заступник директора, ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України НАН України; e-mail: [vdolin@ukr.net](mailto:vdolin@ukr.net)

Області наукових інтересів: ядерна геохімія, радіобіогеохімія, екологічна безпека

**І. В. Жиганюк** – завідувач сектору РМ ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: [i.zhyganiuk@isnpp.kiev.ua](mailto:i.zhyganiuk@isnpp.kiev.ua)

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи, гідратація іонів актинідів у водних та важководних розчинах, магнітний ізотопний ефект в хімічних реакціях, потенціали міжмолекулярної та іон-молекулярної

взаємодії, процеси кристалізації, молекулярна динаміка

**В. О. Краснов** – завідувач відділення, Інститут проблем безпеки атомних електро-станцій, НАН України; e-mail: [v.krasnov@isnpp.kiev.ua](mailto:v.krasnov@isnpp.kiev.ua)

Області наукових інтересів: атомна енергія, ядерна та радіаційна безпека

# LABORATORY INSTALLATION FOR RESEARCH OF PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES IN THE PORE SPACE OF LAVA-LIKE FUEL-CONTAINING MATERIALS

*Gabeilkov S. V., Zubko O. V., Dolin V. V.,  
Zhyganiuk I. V., Krasnov V. O.*

## **Abstract:**

A laboratory installation for the study of physicochemical processes in lava-like fuel-containing materials (LFCM) during the redistribution of uranium, fission products, and activation from UO<sub>2</sub> microinclusions in the pore space of LFCM has been developed and manufactured. The main unit of the device is an electrochemical cell designed for the metered supply of solvents and reagents for selective leaching of substances from mineral objects. The acid, oxygen, and alkali generate in an electrochemical cell provide intraporous leaching of uranium, fission products, and transuranic radionuclides. Ultrasonic activation is used to fully open the "deaf" pores.

**Keywords:** fuel-containing materials, black ceramics, leaching, pore space, uranium oxides, electrochemical cell, ultrasonic activation.

## **Authors' Information**

**S. V. Gabeilkov** – Head of Department of Radiation Materials Science and Radiation Instrumentation, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: s.gabelkov@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, degradation of fuel-containing materials, radioactive waste, nano powders and materials

**O. V. Zubko** – Research Associate, SI 'Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine', e-mail: g200709g@yahoo.com

Major Fields of Scientific Research: nuclear geochemistry, electrochemistry, environmental security

**V. V. Dolin** – Deputy Director (Science), SI 'Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine', e-mail: vdolin@ukr.net.

Major Fields of Scientific Research: nuclear geochemistry, radiobiogeochemistry, environmental security

**I. V. Zhyganiuk** – Head of Sector of Radiation Materials Science, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: i.zhyganiuk@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste, hydration of actinides ions in aqueous and heavy water solutions, magnetic isotope effect in chemical reactions, potentials of the intermolecular and ion-molecular interaction, crystallization processes, molecular dynamics

**V. O. Krasnov** - Head of the Division, Institute of Nuclear Power Plant Safety, National Academy of Sciences of Ukraine; e-mail: v.krasnov@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: atomic energy, nuclear and radiation safety



# ЛАВОПОДІБНІ ПАЛИВОВМІСНІ МАТЕРІАЛИ НБК-ОУ. ЧОРНА КЕРАМІКА. ЕЛЕКТРОНА МІКРОСКОПІЯ

*Габелков С. В., Долін В. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Слівінський В. М., Чиколовець С. О.*

**Резюме:** Лавоподібні паливовмісні матеріали (ЛПВМ) досліджено методом скануючої електронної мікроскопії. Показано, за елементним складом до 80 - 90 % ЛПВМ відповідають силікатному склу. На рівні декількох відсотків ЛПВМ містять оксиди урану, «чорнобиліт»  $(Zr_{0,95}U_{0,05})SiO_4$  та металеве залізо (або оксиди заліза). Також ЛПВМ мають фази, які окрім урану, містять також і по декілька відсотків кремнію, алюмінію, калію та кальцію. Припущено, що ці частинки є мінералоподібними фазами на основі урану. Отримані результати буде використано для прогнозування поведінки і напрацювання методів поводження з ЛПВМ, які сформувались під час аварій на АЕС у Чорнобилі та Фукусімі.

**Ключові слова:** паливовмісні матеріали, чорна кераміка, електронна мікроскопія, фазовий склад, оксиди урану, «чорнобиліт», мінералоподібні фази, Чорнобиль.

## **Вступ**

Лавоподібні паливовмісні матеріали (ЛПВМ) в обсязі близько 1200 тон сформувалися тридцять п'ять років тому в результаті аварії ядерного реактора 4-го блоку Чорнобильської ЧАЕС. ЛПВМ містять основну частину радіонуклідів зруйнованого ядерного реактора і визначають сучасний стан ядерної, радіаційної та екологічної безпеки комплексу «Новий безпечний конфайнмент – Об'єкт Укриття». За цей час вивчено фізико-хімічні властивості ЛПВМ, створено модель еволюції їхньої мікроструктури, виділено стадії їх деградації, зроблено прогноз їх поведінки в найближчий та віддаленій перспективі [1]. Для одержання актуальної інформації про стан ЛПВМ і виявлення нових, раніше невідомих процесів в ЛПВМ проведено дослідження електронномікроскопічними методами.

## **Досліджувані матеріали**

Досліджувались зразки чорної кераміки ЛПВМ, характерні для приміщення 305/2 із 4-го блоку ЧАЕС. Зразки у вигляді частинок розмірами 3 - 50 мкм підготовлені методом подрібнення.

## **Методика досліджень**

Дослідження проводилися на електронному мікроскопі японської фірми JEOL, JSM6490LV з енергодисперсійним спектрометром INCA Penta Fet x3. Частинки ЛПВМ наносили на алюмінієву основу та поверх напилували шар платини.

## **Результати досліджень**

Типовими є частинки ЛПВМ (до 80 - 90 %) з розмірами від 10 мкм до 50 мкм, які мають у своєму складі 30 - 35 ваг. % кремнію та по декілька відсотків таких елементів як натрій, магній, алюміній, калій, кальцій та залізо. Також вони містять 5 - 6 ваг. % урану. Відомо, що такий елементний склад в ЛПВМ характерний для силікатного скла [1].

Значно рідше зустрічаються частинки з розмірами 3 - 5 мкм, які складаються тільки з урану. Раніше нами встановлено, що такий склад мають включення оксидів урану [1].

Рідко зустрічаються частинки, які мають у своєму складі цирконій, кремній та уран. Вони мають дві особливості. Перша з них, це те, що молярне співвідношення цирконію до кремнію дорівнює 1:1. Таке співвідношення цирконію до кремнію характерно для єдиної відомої сполуки між оксидами цирконію та кремнію - циркону  $ZrSiO_4$ . Друга особливість - це молярне співвідношення цирконію до урану, яке близьке до 20:1. Ці особливості вказують на те, що ми маємо справу, з так званим, «чорнобилітом»  $Zr_{0,95}U_{0,05}SiO_4$ .

У полі електронного мікроскопу зрідка ідентифікуються частинки, які мають у своєму складі залізо. Найімовірніше - це частинки конструкційних матеріалів, представлені металевим залізом або його оксидами.

У попередніх дослідженнях показано, що силікатне скло, оксиди урану, «чорнобиліт» та залізо є фазами, які входять до складу ЛПВМ [1].

Так само зрідка, як й істотно уранові частинки, зустрічаються частинки ЛПВМ, які окрім урану містять ще й такі елементи як кремній, алюміній, калій та кальцій (рис.). Вміст урану складає 60 - 65 ваг. %, а кремнію, алюмінію, калію та кальцію – по декілька відсотків кожного (таблиця). Можливо, що ці частки ЛПВМ містять мінералоподібні фази на основі урану.

Таблиця - Вміст елементів (ваг. %) у частинці чорних ЛПВМ

Елемент	Al	Si	K	Ca	U	O	Всього
Вміст	3,5	3,37	1,13	0,77	65,71	25,53	100,00

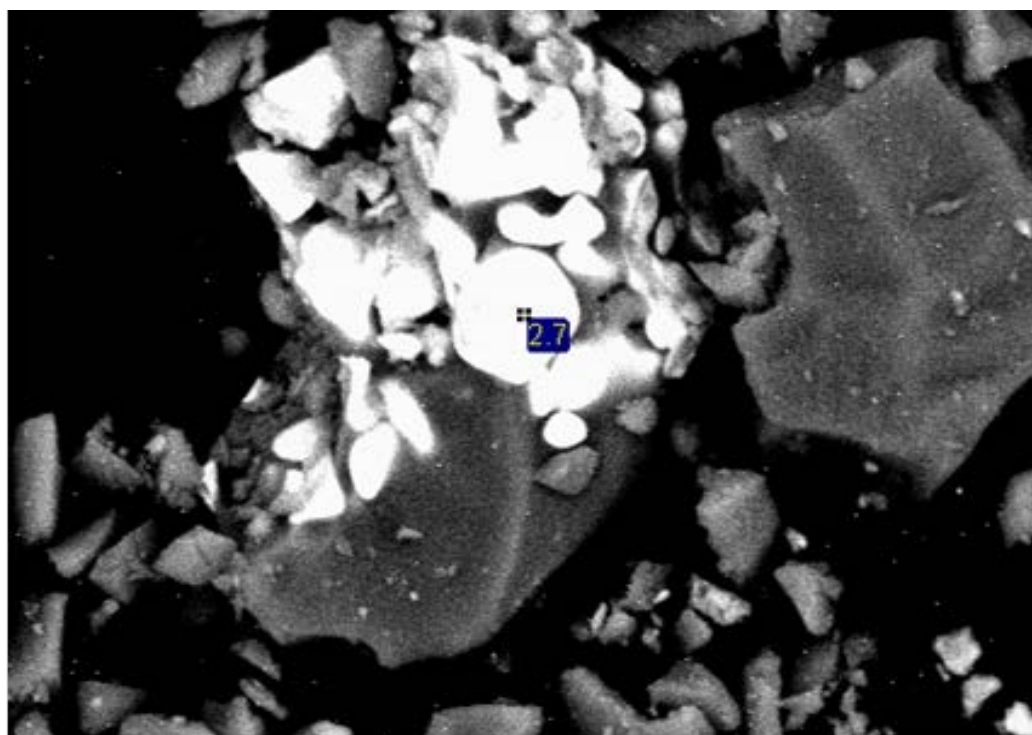


Рис. Частинка мінералоподібної сполуки на основі урану.

## **Висновки**

Дослідження ЛПВМ (чорна кераміка), проведені методом електронної мікроскопії, показали, що:

1. Найбільша частина фрагментів (до 80 - 90 %) містить 30 - 35 ваг. % кремнію та по декілька відсотків натрію, магнію, алюмінію, калію, кальцію, заліза та урану. За елементним складом ці фрагменти відповідають силікатному склу.

2. Декілька відсотків частинок містять тільки уран. За елементним складом вони відповідають оксидам урану.

3. Декілька відсотків частинок містять цирконій, кремній та уран. Молрне співвідношення цирконію до кремнію складає 1:1, а цирконію до урану 20:1. За елементним складом ці частки відповідають «чорнобиліту»  $(Zr_{0,95}U_{0,05})SiO_4$ .

4. До десяти відсотків частинок містять тільки залізо. Вони представлені металевим залізом (або оксидами заліза).

5. Декілька відсотків частинок містять 60 - 70 ваг. % урану та по декілька відсотків кремнію, алюмінію, калію та кальцію. Можливо, що ці частки представлені мінералоподібними фазами на основі урану.

## **Список використаних джерел:**

1. Габелков С. В., Носовский А. В., Щербин В. Н., Модель деградации лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие». Проблемы безопасности атомных станций і Чернобиля. – 2016, – вип. 26, – С. 75 - 84.

## **Інформація про авторів**

**С. В. Габелков** – завідувач відділу РМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: s.gabelkov@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, їхня деградація, прогнозування, радіоактивні відходи, нанорозмірні порошки та матеріали

**В. В. Долін** – заступник директора, ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України НАН України; e-mail: vdolin@ukr.net

Області наукових інтересів: ядерна геохімія, радіо біогеохімія, екологічна безпека

**І. В. Жиганюк** – завідувач сектору РМ ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: i.zhyganiuk@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи, гідратація іонів актинідів у водних та важководних розчинах, магнітний ізотопний ефект в хімічних реакціях, потенціали міжмолекулярної та іон-молекулярної

взаємодії, процеси кристалізації, молекулярна динаміка

**В. М. Сливінський**, головний програміст, ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» НАН України, e-mail: igns@ukr.net.

Область наукових інтересів: електронно-оптичні методи дослідження

**В. Г. Кудлай** – провідний інженер, ВРМПП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: v.kudlai@ispnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

**П. Є. Пархомчук** – провідний інженер, ВРМПП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: parkhomchuk@ispnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

**С. О. Чиколовець** – інженер, ВРМПП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: s.chikolovets@ispnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

## **LAVA-LIKE FUEL-CONTAINING MATERIALS NSC-OU. BLACK CERAMICS. ELECTRONIC MICROSCOPY**

*Gabeilkov S. V., Dolin V. V., Zhyganiuk I. V., Kudlay B. G.,  
Parkhomchuk P. Ye., Slivinskyi V. M., Chikolovets S. O.*

### **Abstract:**

Lava-like fuel-containing materials (LFCM) were studied by electron microscopy. It is shown that the composition of the elements up to 80 - 90% of LFCM correspond to silicate glass. At the level of several percent of LFCM contain oxides of uranium, "chornobylit" ( $Zr_{0,95}U_{0,05}SiO_4$ ) and metallic iron (or iron oxides). LFCM also have phases that, in addition to uranium, also contain several percent of silicon, aluminum, potassium and calcium. It is assumed that these particles are mineral-like phases based on uranium. These results will be used to forecast behavior and develop methods and technologies for management of fuel-containing materials, which were formed during accidents on the NPP of Chernobyl and Fukushima.

**Keywords:** fuel-containing materials, black ceramics, electron microscopy, phase composition, uranium oxides, "chornobylite", mineral-like phases, Chernobyl.

### **Authors' Information**

**S. V. Gabeilkov** – Head of Department of Radiation Materials Science and Radiation Instrumentation, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: s.gabelkov@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, degradation of fuel-containing materials, radioactive waste, nano powders and materials

**Dolin V. V.**, Deputy Director (Science), SI 'The Institute of Environmental Geochemistry' of NAS of Ukraine, e-mail: vdolin@ukr.net.

Major Fields of Scientific Research: nuclear geochemistry, radiobiogeochemistry, environmental Security

**I. V. Zhyganiuk** – Head of Sector of Radiation Materials Science, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: i.zhyganiuk@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste, hydration of actinides ions in aqueous and heavy water solutions, magnetic

isotope effect in chemical reactions, potentials of the intermolecular and ion-molecular interaction, crystallization processes, molecular dynamics

**V. M. Slivinskyi**, chief programmer, SI 'The Institute of Environmental Geochemistry' of NAS of Ukraine; e-mail: igns@ukr.net.

Major Fields of Scientific Research: electron-optical research method

**V. G. Kudlay** – Senior Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU; e-mail: v.kudlai@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

**P. E. Parhomchuk** – Senior Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: parkhomchuk@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

**S. O. Chikolovets** – Staff Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: s.chikolovets@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

# МІКРОТВЕРДІСТЬ ТА ТРИЩІНОСТІЙКІСТЬ ЛАВОПОДІБНИХ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ НБК-ОУ

*Габелков С. В., Жиганюк І. В., Краснов В. О., Кудлай В. Г.,  
Пархомчук П. Є., Чиколовець С. О.*

**Резюме:** Проведено вимірювання мікротвердості коричневої, чорної та полі-хромної керамік лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ). Показано, що значення мікротвердості кожної з керамік с плином часу не змінюються. Викорис-товуючи підходи лінійної механіки руйнування матеріалів, оцінено значення в'яз-кості руйнування коричневої кераміки, яке характеризує ЛПВМ як крихкі.

**Ключові слова:** мікротвердість, в'язкість руйнування, лавоподібні паливовмісні матеріали, коричнева, чорна та поліхромна кераміка, Чорнобиль.

## **Вступ**

Лавоподібні паливовмісні матеріали (ЛПВМ) визначають ядерну, радіаційну і екологічну безпеку комплексу “Новий безпечний конфайнмент - Об’єкт Укриття” тому, що містять основну частину радіонуклідів зруйнованого ядерного реактора. Близько 1200 тон ЛПВМ сформувалися тридцять п'ять років тому в результаті аварії ядерного реактора 4-го блоку Чорнобильської АЕС. За цей час вивчені фізико-хімічні властивості ЛПВМ, створена модель еволюції їхньої мікроструктури, виділено стадії їх деградації, зроблено прогноз їх поведінки в найближчий та віддаленій перспективі [1]. Мікротвердість як одна з фізико-механічних характеристик ЛПВМ використовується для оцінки стану мікродефектів. Ці дані допомагають оцінити вклад кожного з декількох основних фізичних та хімічних процесів, визначити їх послідовність та підвищити достовірність прогнозів деградації ЛПВМ.

## **Досліджувані матеріали**

Досліджувались зразки ЛПВМ, чорної, коричневої й поліхромної кераміки. Чорна кераміка характерна для приміщень 305/2 і 304/2, коричнева – для паро-розподільного коридору, поліхромна – для приміщення 305/2 4-го блоку ЧАЕС.

## **Методика досліджень**

Мікротвердість ЛПВМ вимірювали стандартною методикою мікроіндентування з використанням призми Віккерса (твердомір ПМТ-3, навантаження на індентор 284 г). Куски ЛПВМ різали на пластини товщиною 3 - 4 мм. Одну з площин зразка шліфували та полірували для мікроіндентування.

## **Результати досліджень**

Значення мікротвердості чорної, коричневої й поліхромної кераміки ЛПВМ приведено в таблиці 1. Зовнішній вигляд відбитка індентора на площині зразка коричневої кераміки представлено на рис. 1.

Значення мікротвердості коричневої, чорної та поліхромної кераміки ЛПВМ

Рік вимірювань	1998	1999	2011	2016	2020
Вид ЛПВМ	H <sub>v</sub> , ГПа				
коричнева кераміка	6,98	6,40	6,80	6,69 ± 0,19	6,39 ± 0,25
чорна кераміка	6,04	5,87	6,81	6,48 ± 0,15	6,03 ± 0,18
поліхромна кераміка	6,85	6,28	6,54	6,46 ± 0,25	6,28 ± 0,21

Примітка: мікроіндентування, навантаження на індентор 284 г.



Рис. 1. Зовнішній вигляд відбитка індентора на площині зразка коричневої кераміки ЛПВМ.

С урахуванням похибки вимірювань отримані значення мікротвердості всіх видів кераміки практично збігаються. Порівняння їх з результатами минулих років показує, що мікротвердість всіх видів керамік ЛПВМ за період 1998 - 2020 р.р. істотно не змінилася.

На рис. 2 представлено результат індентування. Ми бачимо розвиток тріщини з верхнього кута відбитка індентору. Використовуючи підходи лінійної механіки руйнування матеріалів, можна оцінити критичний коефіцієнт інтенсивності напружень в ЛПВМ, який дорівнює 1 - 2 МПа/м<sup>1/2</sup>, який характеризує ЛПВМ як крихкі матеріали.





Рис. 2. Тріщина в кутку відбитка інтенктору на зразку коричневої кераміки.

### **Висновки**

1. Проведено вимірювання мікротвердості коричневої, чорної та поліхромної керамік ЛПВМ. З урахуванням похибки вимірювань, значення мікротвердості кожної з керамік с плином часу не змінюються.

2. Відсутність залежності мікротвердості від часу вказує на незмінну концентрацію мікродфектів в цих матеріалах.

3. Оцінено значення в'язкості руйнування коричневої кераміки ЛПВМ, використовуючи підходи лінійної механіки руйнування матеріалів. Значення критичного коефіцієнту в'язкості руйнування дорівнюють  $1 - 2 \text{ МПа/м}^{1/2}$ , що характеризує ЛПВМ як крихкі матеріалами.

### **Список використаних джерел:**

1. Габелков С. В., Носовский А. В., Щербин В. Н., Модель деградации лаваобразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие». Проблемы безпеки атомних станцій і Чорнобиля. – 2016, – вип. 26, – С. 75 - 84.

### **Інформація про авторів**

**С.В. Габелков** – завідувач відділу РМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: s.gabelkov@isprpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, їхня деградація, прогнозування, радіоактивні відходи, нанорозмірні порошки та матеріали

**І.В. Жиганюк** – завідувач сектору РМ ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: i.zhyganiuk@isprpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи, гідратація іонів актинідів у водних та важководних розчинах, магнітний



ізотопний ефект в хімічних реакціях, потенціали міжмолекулярної та іон-молекулярної

взаємодії, процеси кристалізації, молекулярна динаміка

**В.О. Краснов** – завідувач відділення, Інститут проблем безпеки атомних електро-станцій, НАН України; e-mail: v.krasnov@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: атомна енергія, ядерна та радіаційна безпека

**В.Г. Кудлай** – провідний інженер, ВРМПП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: v.kudlai@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

**П.Є. Пархомчук** – провідний інженер, ВРМПП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: parkhomchuk@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

**С.О. Чиколовець** – інженер, ВРМПП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: s.chikolovets@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

## MICROHARDNESS AND CRACK RESISTANCE OF LAVA-LIKE FUEL-CONTAINING MATERIALS OF NSC-OU

*Gabeilkov S. V., Zhyganiuk I. V., Krasnov V. O., Kudlay V. G.,  
Parkhomchuk P. Ye., Chikolovets S. O.*

### **Abstract:**

The microhardness of brown, black and polychrome ceramics of lava-like fuel-containing materials (LFCM) was measured. It is shown that the value of microhardness of each of the ceramics does not change over time. Using the approaches of linear fracture mechanics of materials, the value of fracture toughness of brown ceramics, which characterizes LFCM as brittle, was estimated.

**Keywords:** microhardness, fracture toughness, lava-like fuels materials, brown, black and polychrome ceramics, Chornobyl.

### **Authors' Information**

**S.V. Gabelkov** – Head of the Department of Radiation Materials Science and Radiation

Instrumentation, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: s.gabelkov@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, degradation of fuel-containing materials, radioactive waste, nanopowders and materials

**I.V. Zhyganiuk** – Head of the Sector of Radiation Materials Science, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: i.zhyganiuk@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste, hydration of actinides ions in aqueous and heavy water solutions, magnetic isotope effect in chemical reactions, potentials of the intermolecular and ion-molecular interaction, crystallization processes, molecular dynamics

**V.O. Krasnov** - Head of the Division, Institute of Nuclear Power Plant Safety, National Academy of Sciences of Ukraine; e-mail: v.krasnov@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: atomic energy, nuclear and radiation safety

**V.G. Kudlay** – Senior Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU; e-mail: v.kudlai@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

**P.E. Parhomchuk** – Senior Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: parkhomchuk@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

**S.O. Chikolovets** – Staff Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: s.chikolovets@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

# МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ДАНИХ РЕНТГЕНІВСЬКОЇ ДИФРАКЦІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ ЛАВОПОДІБНИХ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ 4-ГО БЛОКУ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

*Габелков С. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Скорбун А. Д., Чиколовець С. О.*

**Резюме:** Розроблено методику аналізу дифрактограм рентгенівської дифракції, яка була застосована для аналізу лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ) 4-го блоку Чорнобильської АЕС. Метод базується на автоматизованому порівнянні табличного набору ліній (табличної дифрактограми) з експериментальною дифрактограмою, яка включає в себе лінії від десятків кристалічних фаз. Стандартна методика аналізу не дозволяє розшифровувати дифрактограми від матеріалів, які складаються з більш ніж 8-10 кристалічних фаз. Ідентифікація кристалічних фаз в ЛПВМ, особливо уранових, є необхідною для аналізу фізичних та хімічних процесів, які проходять в ЛПВМ. Розроблену методику перевірено на реальних дифрактограмах.

**Ключові слова:** кристалічні фази, лавоподібні паливовмісні матеріали, коричнева кераміка, рентгенівський фазовий аналіз, фазовий склад, Чорнобиль.

## **Вступ**

Поводження з лавоподібними паливовмісними матеріалами (ЛПВМ) є однією з основних проблем при перетворенні об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему. На сьогоднішній день прийнятних пропозицій з цього питання немає. У даній роботі продовжено розвиток ідеї [1], що стан ЛПВМ є пов'язаним з процесами формування їхньої мікроструктури. Наприклад, утворення нерозчинних сполук урану веде до зменшення небезпеки вимивання його водою. Деякі з таких процесів ідуть самостійно, на деякі можна впливати термообробкою з відповідним температурним режимом. У багатьох випадках це є пов'язаним із фазовим складом ЛПВМ [2], який визначають за допомогою методу рентгенівського фазового аналізу. Тому, відповідно, методики аналізу даних рентгенівської дифракції потребують розвитку та удосконалення [3], а нові дані з фазового складу ЛПВМ дозволять розвинути прогноз еволюції мікроструктури та властивостей ЛПВМ на найближчу та віддалену перспективу.

## **Досліджувані матеріали**

Досліджувались зразки коричневої кераміки ЛПВМ, характерні для приміщення 304/2 і паророзподільного коридору 4-го блоку ЧАЕС. Зразки у вигляді пластин підготовлені методом шліфування для зменшення шорсткості поверхні.

### Методики досліджень

Фазовий склад матеріалу визначали методом рентгенівської дифракції (модернізований дифрактометр ДРОН-4, схема  $\theta - 2\theta$ , випромінювання  $\text{Cu K}\alpha$ , монохроматор - монокристал графіту).

Для обробки даних використовували методи комп'ютерної статистики.

### Результати досліджень

Проблема дослідження ЛПВМ методами рентгенівської дифракції полягає у тому, що через велику кількість сполук, які кристалізувалися в ЛПВМ, виділити окремі лінії практично неможливо: через велику кількість фаз сигнали від них є надзвичайно низькоінтенсивними. У результаті дифрактограми від ЛПВМ практично представляють собою шумову доріжку, в якій неможливо виділити окремі лінії, а ще важче виділити набір ліній від деякої фази. У розробленому методі для пошуку ліній від окремих фаз пропонується розраховувати ступінь кореляції між експериментальною дифрактограмою (рис. 1 а) і табличною дифрактограмою (рис. 1 б) тієї фази, яка шукається. Розраховується ковзна кореляція при зміщенні кутів. При появі помітної кореляції між експериментальною і табличною дифрактограмами, спостерігається максимум на рис. 1 с. Це означає, що у проаналізованому зразку ЛПВМ присутня фаза  $\text{ZrO}_2$ . Послідовним пошуком знаходять всі кристалічні фази, присутні в ЛПВМ.

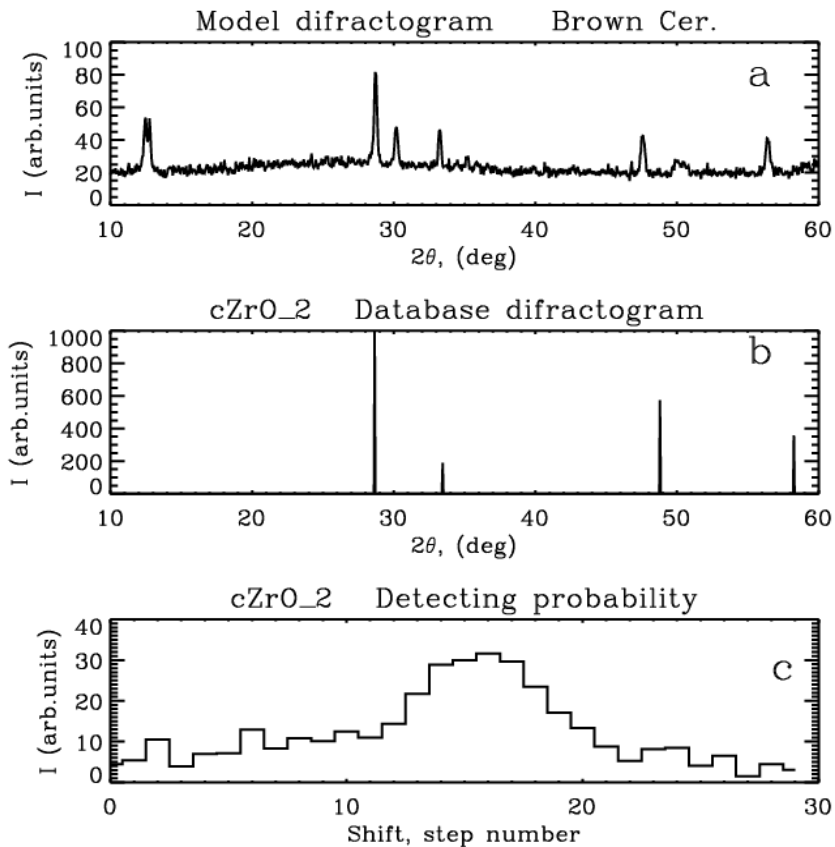


Рис. 1. Результат сканування експериментальної дифрактограми зразка коричневої кераміки ЛПВМ еталонною дифрактограмою діоксиду цирконію.

## **Висновки**

В роботі розроблено і перевірено на реальних даних алгоритм і метод аналізу дифрактограм рентгенівської дифракції для систем з великою кількістю фаз.

Розроблений метод має загальне значення для аналізу матеріалів, які утворюються в результаті важких аварій на АЕС, наприклад, Чорнобиля і Фукусіми.

## **Список використаних джерел:**

1. Габелков С. В., Носовский А.В., Щербин В. Н., Модель деградации лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие». Проблемы безопасности атомных станций і Чорнобиля. – 2016, – вип. 26, – С. 75 - 84.

2. Габелков С. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Носовський А. В., Пархомчук П. Є., Чиколовец С. О., Щербін В. М., Фазовий склад коричневої кераміки лавоподібних паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття» ЧАЕС. Ядерна фізика та енергетика. – 2019, – вип. 20, – С. 388 - 396.

3. Скорбун А. Д., Габелков С. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Чиколовец С. О., Метод обробки даних рентгенівської дифракції для багатофаз-них матеріалів з низьким вмістом фаз. Український фізичний журнал. – 2019. - Т. 64, № 9. - С. 862-870.

## **Інформація про авторів**

**С. В. Габелков** – завідувач відділу РМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: s.gabelkov@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, їхня деградація, прогнозування, радіоактивні відходи, нанорозмірні порошки і матеріали

**І. В. Жиганюк** – завідувач сектору РМ ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: i.zhyganiuk@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи, гідратація іонів актинідів у водних та важководних розчинах, магнітний ізотопний ефект в хімічних реакціях, потенціали міжмолекулярної та іон-молекулярної взаємодії, процеси кристалізації, молекулярна динаміка

**В. Г. Кудлай** – провідний інженер, ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: v.kudlai@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

**П. Є. Пархомчук** – провідний інженер, ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: parkhomchuk@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

**А. Д. Скорбун** – головний науковий співробітник, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України; e-mail: anskorbun@gmail.com

Області наукових інтересів: ядерна та радіаційна безпека атомних електростанцій, радіоактивні відходи, статистичні методи аналізу

**С.О. Чиколовец** – інженер, ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: s.chikolovets@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

# METHOD OF ANALYSIS OF X-RAY DIFFRACTION DATA FOR DETERMINATION OF PHASE COMPOSITION OF LAVA-LIKE FUEL-CONTAINING MATERIALS OF THE 4-TH CHORNOBYL BLOCK

Gabelkov S. V., Zhyganiuk I. V., Kudlay V. G., Parhomchuk P. E.,  
Skorbun A. D., Chikolovets S. O.

## Abstract:

The method of analysis of X-ray diffraction patterns was developed, which was used for the analysis of lava-like fuel-containing materials (LFCM) of the 4th unit of the Chernobyl NPP. The method is based on the automated comparison of a tabular set of lines (tabular diffraction pattern) with an experimental diffraction pattern, which includes lines from dozens of crystalline phases. The standard method of analysis does not allow to decipher diffraction patterns from materials consisting of more than 8-10 crystalline phases. Identification of crystalline phases in LFCM, especially uranium, is necessary for the analysis of physical and chemical processes that take place in LFCM. The developed technique is checked on real diffraction patterns.

**Keywords:** crystalline phases, fuel-containing materials, brown ceramics, X-ray analysis, phase composition, Chernobyl.

## Authors' Information

**S. V. Gabelkov** – Head of Department of Radiation Materials Science and Radiation Instrumentation, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: s.gabelkov@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, degradation of fuel-containing materials, radioactive waste, nano powders and materials

**I. V. Zhyganiuk** – Head of Sector of Radiation Materials Science, Institute for Safety Problems of NPP, NASU; e-mail: i.zhyganiuk@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste, hydration of actinides ions in aqueous and heavy water solutions, magnetic isotope effect in chemical reactions, potentials of the intermolecular and ion-molecular interaction, crystallization processes, molecular dynamics

**V. G. Kudlay** – Senior Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: v.kudlai@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

**P. E. Parhomchuk** – Senior Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: parkhomchuk@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

**A. D. Skorbun** - Chief Research Fellow, Institute of Nuclear Power Plant Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine; e-mail: anskorbun@gmail.com

Major Fields of Scientific Research: nuclear and radiation safety of nuclear power plants, radioactive waste, statistical methods of analysis

**S. O. Chikolovets** – Staff Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: s.chikolovets@ispnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

# МЕТОДИКА КІЛЬКІСНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ РЕНТГЕНІВСЬКОЇ ДИФРАКЦІЇ У ЗАСТОСУВАННІ ДО ЛПВМ

*Габелков С. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Скорбун А. Д., Чиколовець С. О.*

**Резюме:** Розроблено метод кількісної оцінки вмісту кристалічних фаз у багатофазних матеріалах на основі аналізу інтенсивностей ліній рентгенівської дифракції. Проблема кількісної оцінки вмісту кристалічних фаз у лавоподібних паливовмісних матеріалах (ЛПВМ) є одною з ключових у комплексній задачі оцінки стану ЛПВМ 4-го блока. В основі методу – кореляційний спосіб ідентифікації кристалічних фаз на дифрактограмах рентгенофазового аналізу, який дає можливість отримати прийнятне співвідношення інтенсивностей відображень. Далі, шляхом порівняння інтенсивностей ліній експериментальної дифрактограми з табличними даними, оцінюється співвідношення вмісту окремих фаз. Ідентифікація уранових фаз в ЛПВМ, є особливо необхідною для аналізу фізичних та хімічних процесів, які проходять в ЛПВМ. Розроблену методику перевірено на реальних дифрактограмах.

**Ключові слова:** кристалічні фази, лавоподібні паливовмісні матеріали, рентгенівський фазовий аналіз, фазовий склад, Чорнобиль.

## **Вступ**

Поводження з лавоподібними паливовмісними матеріалами (ЛПВМ) є однією з основних проблем при перетворенні об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему [1, 2]. На сьогоднішній день прийнятних пропозицій з цього питання немає. Прогнозування поведінки ЛПВМ на найближчу та віддалену перспективу потребує ідентифікації та визначення пріоритетності протікання фізичних та хімічних процесів в ЛПВМ. Вирішальне значення має взаємний вплив цих процесів один на одного. Їх виявлення, встановлення їх черговості, інтенсивності, тривалості, стадійності та ін.. потребує використання методів досліджень на межі їх придатності. Підвищення можливостей методів досліджень ЛПВМ є одним з шляхів вирішення всього комплексу проблем поведження з паливовмісними матеріалами. У даній роботі продовжено розробку методів аналізу даних рентгенівської дифракції з метою створення методу аналізу багатофазних матеріалів, до яких відносяться ЛПВМ [3], за допомогою рентгенівського фазового аналізу.

## **Досліджувані матеріали**

Досліджувались зразки коричневої кераміки ЛПВМ, характерні для приміщення 304/2 і паророзподільного коридору 4-го блоку ЧАЕС. Зразки у вигляді пластин підготовлені методом шліфування для зменшення шорсткості поверхні.

## **Методика досліджень**

Класикою методу рентгенівської дифракції при кількісному аналізі є створення еталонів, з якими порівнюється дифрактограма досліджуваного зразка. У випадку ЛПВМ еталони зробити неможливо як через велику кількість сполук, які кристалізувалися в ЛПВМ, так і через необхідність працювати з високоативними пробами.

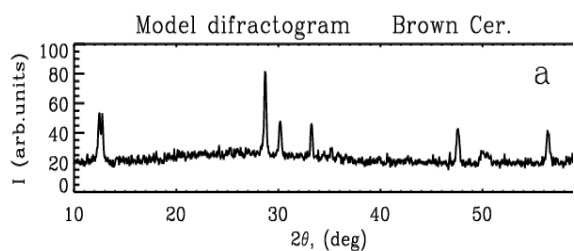


Рис. 1. Експериментальна дифрактограма зразка ЛПВМ (коричнева кераміка)

Тому було розроблено метод, аналізу дифрактограм, у якому реалізовано перший етап стандартного способу кількісного аналізу: встановлення співвідношень інтенсивностей окремих фаз. Метод використовує прийоми комп'ютерної статистики, які дозволяють при розрахунках кореляцій враховувати інтенсивності ліній.

### Результати досліджень

Типовий приклад дифрактограми від ЛПВМ наведено на рис. 1. У дійсності це шумова доріжка, на якій кілька найбільш інтенсивних ліній від невідомих сполук. Стандартним методом таку дифрактограму розшифрувати неможливо. На основі розробленого нами раніше методу кореляційного аналізу, який дозволив трансформувати такі зашумлені дифрактограми, де відношення сигнал/шум на рівні одиниці, у кореляційну дифрактограму, де це відношення набагато краще. Проте підвищена чутливість веде до появи на дифрактограмі сотень ліній від різних фаз, і ідентифікувати кристалічні фази з даних таких дифрактограми досить складно.

Розроблений метод базується на використанні прийомів комп'ютерної статистики (permutation test), який дозволяє при розрахунках кореляцій враховувати інтенсивності сигналів. Алгоритм розрахунків наступний.

1. Експериментальна дифрактограма за допомогою permutation test перетворюється у так званий кореляційний спектр. Особливістю такого перетворення є те, що при цьому коректно видаляється фон. А дифрактограма набуває вигляду окремих ліній, для яких легко оцінити інтенсивність.

2. Методом послідовних наближень ідентифікуються окремі сполуки. Мається на увазі, що для початку повинна бути ідентифікована сполука, сумнівів у ідентифікації якої немає. Далі її лінії видаляються із експериментальної дифрактограми, в результаті чого полегшується подальша ідентифікація.

3. Дифрактограма ідентифікованої сполуки ретельно аналізується кількісно на відповідність табличним даним. Тому що вона буде реперною по відношенню до інших сполук.

4. Методом Монте-Карло порівнюються інтенсивності всіх розшифрованих ліній ідентифікованих сполук для визначення найбільш імовірного значення та невизначеності зробленої оцінки.

5. Робиться висновок про співвідношення інтенсивностей ліній різних сполук.

6. Необхідні поправочні коефіцієнти оцінюються і вводяться на основі літературних даних.

### Висновки

В роботі розроблено і перевірено на реальних даних метод кількісної оцінки концентрацій фаз у багатофазних матеріалах на основі аналізу



інтенсивностей ліній рентгенівської дифракції для матеріалів з великою кількістю фаз.

Розроблений метод має загальне значення для аналізу матеріалів, які утворюються в результаті важких аварій на АЕС, наприклад, Чорнобиля і Фукусіми.

#### **Список використаних джерел:**

1. Габелков С. В., Носовский А. В., Щербин В. Н., Модель деградации лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие». Проблемы безпеки атомних станцій і Чорнобиля. – 2016, – вип. 26, – С. 75 - 84.

2. Габелков С. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Носовський А. В., Пархомчук П. Є., Чиколовець С. О., Щербін В. М., Фазовий склад коричневої кераміки лавоподібних паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття» ЧАЕС. Ядерна фізика та енергетика. – 2019, – вип. 20, – С. 388 - 396.

3. Скорбун А. Д., Габелков С. В., Жиганюк І. В., Кудлай В. Г., Пархомчук П. Є., Чико-ловець С. О., Метод обробки даних рентгенівської дифракції для багатофазних матеріалів з низьким вмістом фаз. Український фізичний журнал. – 2019. - Т. 64, № 9. - С. 862 - 870.

#### **Інформація про авторів**

**С. В. Габелков** – завідувач відділу РМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: s.gabelkov@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, їхня деградація, прогнозування, радіоактивні відходи, нанорозмірні порошки і матеріали

**І. В. Жиганюк** – завідувач сектору РМ ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: i.zhyganiuk@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи, гідратація іонів актинідів у водних та важководних розчинах, магнітний ізотопний ефект в хімічних реакціях, потенціали міжмолекулярної та іон-молекулярної взаємодії, процеси кристалізації, молекулярна динаміка

**В. Г. Кудлай** – провідний інженер, ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: v.kudlai@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

**П. Є. Пархомчук** – провідний інженер, ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: parkhomchuk@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

**А. Д. Скорбун** – головний науковий співробітник, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України; e-mail: anskorbun@gmail.com

Області наукових інтересів: ядерна та радіаційна безпека атомних електростанцій, радіоактивні відходи, статистичні методи аналізу

**С. О. Чиколовець** – інженер, ВРМРП, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України; e-mail: s.chikolovets@isnpp.kiev.ua

Області наукових інтересів: паливовмісні матеріали, радіоактивні відходи

## METHODS OF QUANTITATIVE ANALYSIS OF X-RAY DIFFRACTION DATA IN APPLICATION TO LFCM

Gabelkov S. V., Zhyganiuk I. V., Kudlay V. G., Parhomchuk P. E., Skorbun A. D.,  
Chikolovets S. O.

**Abstract:** A method for quantitative estimation of content of crystalline phases in multiphase materials based on the analysis of X-ray diffraction line intensities has been developed. The problem of quantitative assessment of content of crystalline phases in lava-like fuel-containing materials (LFCM) is one of the key in the complex task of assessing the state of LFCM of the 4th block. The method is based on the correlation method of identification of crystalline phases on the diffractograms of X-ray phase analysis, which makes it possible to obtain an acceptable ratio of the intensities of reflections. Next, by comparing the intensities of the lines of the experimental diffraction pattern with tabular data, the ratio of the content of the individual phases is estimated. Identification of uranium phases in LFCM is especially necessary for the analysis of physical and chemical processes that take place in LFCM. The developed technique is checked on real diffractograms.

**Keywords:** crystalline phases, lava-like fuel-containing materials, brown ceramics, X-ray analysis, phase composition, Chernobyl.

### AUTHORS' INFORMATION

**S.V. Gabelkov** – Head of Department of Radiation Materials Science and Radiation Instrumentation, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: s.gabelkov@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, degradation of fuel-containing materials, radioactive waste, nano powders and materials

**I. V. Zhyganiuk** – Head of Sector of Radiation Materials Science, Institute for Safety Problems of NPP, NASU; e-mail: i.zhyganiuk@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste, hydration of actinides ions in aqueous and heavy water solutions, magnetic isotope effect in chemical reactions, potentials of the intermolecular and ion-molecular interaction, crystallization processes, molecular dynamics

**V. G. Kudlay** – Senior Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU; e-mail: v.kudlai@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

**P. E. Parhomchuk** – Senior Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU;

e-mail: parkhomchuk@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

**A. D. Skorbun** - Chief Research Fellow, Institute of Nuclear Power Plant Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine; e-mail: anskorbun@gmail.com

Major Fields of Scientific Research: nuclear and radiation safety of nuclear power plants, radioactive waste, statistical methods of an analysis

**S. O. Chikolovets** – Staff Engineer, Institute for Safety Problems of NPP, NASU; e-mail: s.chikolovets@isnpp.kiev.ua

Major Fields of Scientific Research: fuel-containing materials, radioactive waste

# ASSESSMENT OF NEUTRON DETECTORS' INFORMATIVITY INSIDE THE "SHELTER" OBJECT

*Roman Godun*

**Abstract:** At the current moment all neutron detectors of the Nuclear Safety Monitoring System (NSMS) of "Shelter" object (SO) can be placed only at the periphery of fuel-containing materials' (FCM) clusters, that naturally causes a loss of their sensitivity (individual for each monitoring point). Accordingly, to increase the efficiency of nuclear safety's ensuring, it is necessary to perform assessments of the current sensitivity of NSMS detectors to potential neutron anomalies, as well as to determine the most informative points for monitoring of neutron flux density (NFD). To solve this scientific and technical problem, it is proposed to use the developed software code Sensor V.1, which in spherical coordinates models neutron sources (FCM clusters) with mutual position of detectors as well as environment between them.

The Sensor V.1 code allows to perform the calculations of NFD distributions (accordingly the detectors' responses) at zone of FCM clusters' localization during the variations of their parameters and power of a surrounding neutron background. Code performs the NFD distribution's estimation in two-group approximation (the distribution of fast neutrons is described using the relaxation length equations, and the slow neutrons are described in the diffusion-age approximation). Also, Sensor V.1 allows to estimate (in real points of NFD monitoring) a ratio of background level to a useful signal from FCM clusters. Accordingly, the developed code makes it possible to develop effective individual criteria for early identification of dangerous changes of subcriticality in this breeding system. In addition, the assessments (using Sensor V.1 code) of cross-responses of the detectors' group will provide data to determine the criteria for detecting of significant deviations in the NFD dynamics for physically compatible detection units.

According to the results of the calculations (performed in Sensor V.1 code) it is shown that the attenuation of the responses of NSMS detectors, located in the floor's concrete of premise 305/2 is 2 - 4 orders of magnitude greater than the attenuation of the response of detectors, that located above the FCM clusters. Thus, it is shown that the current localization of NSMS detectors determines their insufficient efficiency in the early stages of neutron anomalies, when the expected NFD changes will not exceed  $10^2$ .

Validation of the results of software code was performed by their comparing with the actual NFD measurements, as well as duplicate calculations in the computer code MCNP-4C.

**Keywords:** nuclear safety, "Shelter" object, fuel-containing materials, calculation, software code, Sensor V.1, informativeness estimates, neutron detectors, monitoring system.

## **Authors' Information**

**Roman Godun** – Head of Department of Nuclear Safety, Institute for Safety Problems of NPP of NAS of Ukraine; e-mail: rgl.wmw@gmail.com

Major Fields of Scientific Research: the ensuring of nuclear and radiation safety of "Shelter" object (SO); the potential re-criticality of fuel-containing materials; the increasing of efficiency of neutron control; the modernization of monitoring system inside SO; the radioactive waste management; remote-controlled devices for sampling.

## **ПРОГНОЗНА ОЦІНКА СУКУПНИХ РАДІАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ НА ДОВКІЛЛЯ РАДІАЦІЙНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ У КОРОТКОСТРОКОВІЙ ТА СЕРЕДНЬОСТРОКОВІЙ (ДО 2030 РОКУ) ПЕРСПЕКТИВІ**

*Городецький Д. В., Деренговський В. В., Кафтанатіна О. А., Меньшенін Є. А.,  
Павловський Л. І., Паскевич С. А., Рудько В. М.*

*Інститут проблем безпеки АЕС Національної академії наук України  
d.gorodetsky@isnpp.kiev.ua, v.derengovsky@isnpp.kiev.ua,  
o.kaftanatina@isnpp.kiev.ua, y.menshenin@isnpp.kiev.ua,*

*l.pavlovsky@isnpp.kiev.ua, s.paskevich@isnpp.kiev.ua, v.rudko@isnpp.kiev.ua*

В роботі виконано аналіз змінення стану наявних радіаційно небезпечних об'єктів та прогностичну оцінку їхніх сукупних впливів на довкілля в короткостроковій та середньостроковій (до 2030 року) перспективах. Для цього виконано порівняння поточного забруднення території чорнобильської зони відчуження з можливим забрудненням цієї території при одночасному випадінні на поверхню землі при аваріях  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  і ТУЕ. Також на основі аналізу «доз-витрат-вигод» розроблено методичні рекомендації для підтримки прийняття рішень, що спрямовані на мінімізацію впливів від радіаційно- небезпечних об'єктів на довкілля.

## **FORECASTING ASSESSMENT OF TOTAL RADIATION IMPACTS ON THE ENVIRONMENT OF RADIATION-DANGEROUS OBJECTS OF THE CHERNOBYL ZONE OF ALIENATION IN SHORT AND MEDIUM TERM PROSPECT**

The paper analyzes the change in the state of existing radiation-hazardous objects and forecasts the overall impact on the environment in the short and medium term (until 2030). To do this, a comparison of the current pollution of the Chernobyl Exclusion Zone with the possible pollution of this area during the simultaneous fall to the ground in accidents  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and TUE. Also, based on the analysis of "dose-cost-benefit", guidelines have been developed to support decision-making aimed at minimizing the impact of radiation-hazardous objects on the environment. Regarding the application of the "dose-cost-benefit" method, the following can be stated: with the obtained predicted environmental impacts from radiation-hazardous objects of the Chernobyl Exclusion Zone during normal operation, which do not exceed even one percent of the control level (taking into account the accuracy of environmental pollution radioactive materials and estimated errors of the predicted impacts), the feasibility of this method occurs only when exceeding, not less than 50%, at least one component of the impact on the environment.

Чорнобильська зона відчуження (ЧЗВ) є територією на якій проводиться діяльність, яка супроводжується радіаційним впливом на компоненти навколишнього середовища.

На території ЧЗВ знаходиться розвинена інфраструктура низки підприємств, діяльність яких спрямована на мінімізацію наслідків аварії, поведження з

радіоактивними відходами (РАВ), виведення з експлуатації Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС) та перетворення об'єкта «Укриття» (ОУ) на екологічно-безпечну систему. Діяльність більшості з цих підприємств, експлуатація яких триватиме ще багато років, призводить до суттєвих радіаційних впливів на довкілля. Також на території ЧЗВ знаходиться низка об'єктів, що законсервовані або покинуті з часів активної фази ліквідації аварії на ЧАЕС. Більшість цих об'єктів має радіоактивне забруднення, яке значно перевищує рівень забруднення прилеглих ділянок, та становить потенційну загрозу радіаційного впливу на довкілля, особливо у випадку надзвичайних подій (пожежі, аномальні природні явища та погодні умови тощо). Наявність на території ЧЗВ значної кількості радіаційно-небезпечних об'єктів потребує комплексної оцінки їх сукупного впливу на навколишнє середовище і аналізу достатності та ефективності існуючого комплексу заходів із забезпечення екологічної безпеки. Прогнозування рівнів можливого впливу сприятиме прийняттю обґрунтованих рішень щодо мінімізації негативних впливів на навколишнє середовище у випадку виникнення надзвичайних ситуацій.

В ПІБ АЕС здійснено збір даних щодо стану компонентів навколишнього середовища та проведено аналіз достатності радіологічних характеристик радіаційно небезпечних об'єктів, що знаходяться на території ЧЗВ, або заново створюються. При цьому було вперше складено і систематизовано повний перелік наявних і потенційних радіаційно небезпечних об'єктів, що знаходяться на території ЧЗВ, який включає в себе 51 одиницю радіаційно-небезпечних об'єктів. В роботі зроблена класифікація та вибір радіаційно небезпечних об'єктів, що становлять найбільшу потенційну небезпеку для довкілля. До найнебезпечніших радіаційно небезпечних об'єктів віднесено 28 об'єктів (з 51 об'єкта), які зосереджені на території чорнобильської зони відчуження у трьох умовних географічних районах, а саме: промислова зона «Чорнобильська АЕС» (23 об'єкти), промислова зона «Буряківка» (4 об'єкти) та промислова зона «Чорнобиль» (1 об'єкт).

Для цих об'єктів виконано аналіз зміни їх стану та прогнозу оцінку їхніх сукупних впливів на довкілля в короткостроковій та середньостроковій перспективах. Після виконаних розрахунків величини радіоактивних випадіннь на довкілля від об'єктів, що досліджувались, при нормальній експлуатації та можливих максимальних проектних аваріях дійшли висновку, що їхнім додатковим впливом можна знехтувати у порівнянні з поточним забрудненням ЧЗВ. Однак при виникненні аварійних ситуацій впродовж відносно тривалого часу (декількох годин) можливе перевищення встановлених контрольних рівнів забруднення повітря до десяти разів.

Після виконання аналізу «доз-витрат-вигод» на основі розрахованого впливу на територію ЧЗВ, розташування КПП та пунктів АСКРС, можна стверджувати, що на даний час цілком достатньо існуючих заходів з забезпечення безпеки довкілля та засобів контролю нерозповсюдження радіоактивних матеріалів. Однак варто звернути увагу, що на пункті АСКРС «Стечанка» варто виконати розширення набору досліджуваних параметрів. Рекомендується до вимірювання потужності дози додати вимірювання концентрації забруднення повітря радіонуклідами та реєстрації випадіннь радіоактивних матеріалів на поверхню

грунту. Це дозволить ліквідувати відсутність реєстрації концентрації забруднення повітря радіонуклідами та реєстрації випадінь радіоактивних матеріалів на поверхню ґрунту у північному напрямку від розташування ПЗРВ «Буряківка», що знаходиться в експлуатації. З огляду на розу вітрів, це не є критичним напрямком розповсюдження радіоактивного забруднення, але відсутність контролю в даному напрямку може стати проблемою при можливих аварійних ситуаціях та пожежах.

Щодо застосування методу «доз-витрат-вигоди», можна стверджувати наступне: при отриманих прогнозованих впливах на довкілля від радіаційно небезпечних об'єктів ЧЗВ при нормальній експлуатації, які не перевищують навіть одного відсотка від КР (з урахуванням точності вимірювання забруднення компонентів довкілля радіоактивними матеріалами і розрахунковими похибками прогнозованих впливів), доцільність застосування даного методу виникає лише при перевищенні, не менше ніж 50%, хоча-би одного компонента впливу на довкілля.

Щодо розгляду можливих максимальних проектних аварій, то можна стверджувати наступне: можливе короточасне перевищення контрольних рівнів забруднення повітря радіонуклідами на незначній території, але результуючі випадіння також становлять менше одного відсотка від наявного забруднення ґрунту на території ЧЗВ.

При суттєвому зміненні хоча б одного з припущень можливе значне змінення впливу на довкілля від радіаційно небезпечних об'єктів ЧЗВ. Це, в свою чергу, призведе до необхідності внесення змін до переліку існуючих заходів із забезпечення безпеки та засобів контролю нерозповсюдження радіоактивних матеріалів (для мінімізації можливих впливів на довкілля від радіаційно небезпечних об'єктів).

При зменшенні нинішньої території ЧЗВ до меж 10-км зони відчуження (тобто, суттєвого наближення до селітебних територій) можлива зміна величин сукупних радіаційних впливів радіаційно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище. Також варто враховати, що зважаючи на унікальні умови території ЧЗВ, які за багатьма параметрами є придатними для розміщення на них нових об'єктів атомної енергетики України, варто й надалі продовжувати дослідження стану радіаційно-небезпечних об'єктів та їх сукупного впливу на довкілля. Це дозволить отримати зважені рішення щодо можливості нових видів підприємств та обґрунтовано визначати місця їх розташування на території ближньої зони Чорнобильської АЕС.

## СХОВИЩЕ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА -2

*Грехов Максим, Хоменко Денис*

*Державне спеціалізоване підприємство «Чорнобильська АЕС»*

*м. Славутич, Київська область, Україна, 07101*

*Grekhov.chnpp@gmail.com, d.chnpp@gmail.com*

**Abstract:** The presentation is aimed at unprepared audience and focuses on the topic of spent nuclear fuel (SNF) management at SSE Chornobyl NPP (SSE ChNPP) in general and at the Interim Spent Fuel Storage Facility-2 (ISF-2) in particular. The presentation defines the SNF and its quantity being stored at ChNPP, gives brief description of ISF-1 and the way the SNF is being stored at the facility, the method of transporting the SNF from ISF-1 to ISF-2, the history of implementing the ISF-2 construction project, the design and purpose of ISF-2, and major SNF management process and storage method used at the facility.

**Keywords:** Chornobyl NPP, SNF, ISF-1, ISF-2

**Анотація:** Доповідь спрямована на непідготовлену аудиторію і присвячена розкриттю теми поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) на ДСП ЧАЕС в цілому і в сховищі відпрацьованого ядерного палива - 2 (СВЯП-2) зокрема. У презентації описується, що таке ВЯП і його кількість на ДСП ЧАЕС, дається стисле описання СВЯП-1 і способу зберігання ВЯП у ньому, способу перевезення ВЯП зі СВЯП-1 на СВЯП-2, історія реалізації проєкту СВЯП-2, призначення та структура об'єкта СВЯП-2, основний технологічний процес поводження з ВЯП і спосіб його зберігання на СВЯП-2.

## КУЛЬТУРНА СПАДЩИНА ЯК ІНСТРУМЕНТ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ ІСТОРІЇ АТОМОГРАДУ СЛАВУТИЧ

*Гріза Віктор, Громадська організація «Креативна Україна», місто Київ,  
g.victor65@gmail.com*

The problem of historical narrative for satellite cities of nuclear power plants, which arose during the Soviet era, has acquired special significance for Slavutych. The Chernobyl nuclear power plant is a frozen monument to a man-made disaster, and the workers at the nuclear power plant are in fact the security guards. But the city has a unique history and an unprecedented cultural heritage. Which allows you to claim the status of an open-air museum city. And this status can become a new tourist "magnet" and provide opportunities for the development of appropriate infrastructure. Park sculptures, street lamps, ceramic panels, mosaics and other elements of the artistic culture higher than the average in Ukraine. Releasing these subjects from the ideological burden is a question and a task for scientific development, which will bring to the fore information about the authors, country of origin, technique, etc. A side task is to search for art objects in the area, drawing them on Google maps, accompanied by QR-codes and putting them into tourist circulation. The urgent task of Slavutych's deputy corps is to accept the maximum majority of open-air museum exhibits on the city's balance sheet, giving them the status of "Slavutych's Cultural Heritage".

Проблема історичного нарративу для міст-супутників АЕС, що виникли в часи СРСР, набула для Славутича особливої гостроти, порівняно з Кузнецовськом, Нетішином, Енергодаром та Южноукраїнськом. Як зазначає дослідниця Євгенія Губкіна «Славутич – це “Антиприп’ять”. Ці два міста будувались за абсолютно різними, протилежними принципами, у різні часи. Архітектори зрозуміли, що треба збудувати зовсім інше середовище, бо інакше люди будуть ходити тими самими вулицями – нове місто може нагадувати їм про трагедію». [1]

У вищезгаданих міст такої трагедії не було – Рівненська, Хмельницька, Запорізька та Південноукраїнська АЕС працюють від початку до нашого часу. Чорнобильська ж атомна електростанція припинила свою діяльність, що відбилося на соціальній атмосфері у місті-супутнику. На відміну від інших, що є дієздатними, бо генерують електроенергію, ЧАЕС є застиглою пам’яткою техногенної катастрофи, а безпосередньо атомники – фактично, охоронцями законсервованого підприємства. З одного боку, майже все населення Славутича, прямо чи опосередковано, є учасником міжнародної програми виводу з експлуатації об’єкту ядерної енергетики. З іншого – утримується державою, що формує пасивну ідеологію та плекає патерналістські настрої, стримує персональну ініціативу. У цих обставинах місцевому самоврядуванню вкрай необхідно знайти спроможні замітники первісно закладених у місію міста цінностей. І пошуки у напрямку інвестицій у нові підприємства та новітні технології - не єдине джерело нових цінностей. Адже місто має унікальну історію створення та безпрецедентну культурну спадщину. Що дозволяє



претендувати на статус міста-музею під відкритим небом. А цей статус може стати новим туристичним «магнітом» та дати можливості для розвитку відповідної інфраструктури – транспортної, готельної, ресторанної, екскурсійної, що, у свою чергу, створить нові робочі міста, підвищить самооцінку, бо викликає почуття затребуваності.

Відомо, що нове місто приїхали будувати спеціалісти з вісьмох радянських республік – вони привезли свої типові проекти житла, свої локальні матеріали, своїх архітекторів та будівельників. Але це ще не все: архітектурно-художнє оздоблення Славутича також було солідарним і переконливо ілюструвало один з радянських міфів про дружбу народів. Попри те, що представників самих народів СРСР у місті залишилося не так багато, щоб можна було розвивати національні культурні традиції латишів, литовців, естонців, вірмен, грузин, азербайджанців, підстави для багатонаціонального (або – мультикультурного) музею знаходяться буквально на кожному кроці. Паркові скульптури, вуличні ліхтарі, керамічні панно, мозаїки та інші елементи художніх культур колишніх братських народів у вимірі на площу та кількість жителів у багато разів перевершують середню по Україні.

«Архітектура Славутича – це неймовірний вибух фантазії та сміливості на той момент. У нових будинках втілились уявлення радянських архітекторів про гуманізм. Замість 12-поверхівок вони будують споруди по 4-5 поверхів, та зовсім маленькі типові приватні будиночки. Відбувається осмислення та поворот до співрозмірності архітектури людині та зменшення масштабу». [1] Отже, архітектурне тло Славутича вже на етапі задуму відрізнялося від інших атомоградів. Тому й простір для втілення творчих ідей був більш сприятливий до великої кількості малих форм у навколишньому середовищі.

У Музеї міста Славутича та Чорнобильської АЕС є план міста часів його забудови, на якому нанесені всі заплановані та частково реалізовані об'єкти архітектурно-художнього оздоблення. Їх біля 140, серед яких (вибірково, нумерацію збережено):

#### 1 МОСКОВСЬКИЙ КВАРТАЛ

1-3 комплексне оформлення інтер'єрів та екстер'єрів дитячого садка-ясел на 280 місць - «Золотий ключик»

1-6 декоративний годинник і рельєф на будівлі фізкультурно-оздоровчого комплексу

#### 2 КИЇВСЬКИЙ КВАРТАЛ

2-1 Вхідна група «Квітка України»

2-2 Скульптурна група в Дитячому містечку «Реліктовий лабіринт»

2-6 Скульптурна композиція «Чумацький шлях»

2-9 Реалогія (7 архітектурно-скульптурних композицій на тему предметів українського побуту) в зоні пішохідної вулиці кварталу

#### 3 ЛЕНІНГРАДСЬКИЙ І БІЛГОРОДСЬКИЙ КВАРТАЛИ

3-1 комплексне оформлення інтер'єрів та екстер'єрів дитячого садка - «Калинка»

3-2 оформлення інтер'єру магазину «Русь»

3-4 архітектурно-художнє оформлення декоративного басейну пішохідної вулиці

3-5 скульптурна композиція «Сім'я»

- 3-6 скульптурна композиція «Мрія»
- 3-9 комплексне оформлення інтер'єрів кафе «Слов'янка»
- 3-15 флюгера на котеджах (15 шт.)
- 4-1 ТАЛЛІНСЬКИЙ КВАРТАЛ
- 4-1-2 паркова скульптурна композиція «Козуля»
- 4-2 РИЖСКИЙ КВАРТАЛ
- 4-2-1 скульптурна композиція «Фонтан» (комбінат «Максла» Худфонду Латвії)
- 4-3 ВІЛЬНЮСЬКИЙ КВАРТАЛ
- 4-3-2 комплексне оформлення інтер'єрів та екстер'єрів кафе-пельменній
- 4-3-4 скульптурна композиція - фонтан «Древо життя»
- 5-1 ТБІЛІСЬКИЙ КВАРТАЛ
- 5-1-1 комплексне оформлення інтер'єрів та екстер'єрів фізкультурно-оздоровчого комплексу на тему «Спорт» в виколотці.
- 5-1-2 комплексне оформлення інтер'єрів та екстер'єрів кафе «Лалі»
- 5-1-3 комплексне оформлення інтер'єрів кафе «Іверія»
- 5-3-12 кераміка в пункті прийому
- 5-1-14 декоративний барельєф на будинку №35
- 5-2 БАКИНСЬКИЙ КВАРТАЛ
- 5-2-1 комплексне оформлення інтер'єрів та екстер'єрів дитячого садка-ясел на 280 місць (шамот, гобелен, графіка)

Навіть такий дуже скорочений перелік переконливо свідчить про те, що візуальна художня культура Славутича містить великий потенціал для туристичних маршрутів пішохідним містом для ознайомлення з образотворчими традиціями і технологіями декоративно-прикладної творчості. Вивільнення цих об'єктів від ідеологічного навантаження – справа і завдання для наукового опрацювання, яке б на перший план висунуло інформацію про авторів, країну походження, техніку виконання тощо. Побічним завданням є уточнення положення арт-об'єктів на місцевості, нанесення на гугл-мапи, супровід їх QR-кодами та іншим чином введення у туристичний обіг.

Нагальним завданням же для депутатського корпусу Славутича є взяття на баланс міста максимальної більшості експонатів музею під відкритим небом з наданням їм умовного статусу «Культурної спадщини Славутича», що підвищить їх цінність, приверне увагу мешканців, певною мірою унебезпечить від пошкодження або знищення. А відділ культури та освіти отримають змістовний матеріал для створення спеціальних програм у співпраці з Туристично-інформаційним центром Комунального підприємства «Агентство регіонального розвитку».

### **Список використаних джерел:**

1 <https://hmarochos.kiev.ua/2014/12/23/konspekt-urbanistki-yevgeniya-gubkina-pro-ukrayinski-atomogradi/>

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ПІДКРИТИЧНОСТІ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

*Дорошенко А. О. Муляр Д. О.  
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України*

Будівництво Нового безпечного конфайнменту (НБК) та встановлення його в проектне положення спричинило істотні зміни умов зберігання скупчень паливовмісних матеріалів (ПВМ), що знаходяться в об'єкті «Укриття» (ОУ). У зв'язку з цим особливої актуальності набуває потреба оцінки ефективності систем контролю підкритичності скупчень ПВМ. До таких систем відноситься: Інтегрована автоматизована система контролю (ІАСК), система подачі розчину азотокислого гадолінію (СПРГ), модернізована система пилопригнічення (МСПП) та система оперативного вводу нейтронпоглинаючого розчину ЮК СОВГ – 40. Дані системи були спроектовані та введені в експлуатацію задовго до будівництва НБК, завдяки цьому ми маємо можливість відслідковувати зміни, що відбуваються в середині ОУ, після встановлення НБК в проектне положення.

Система контролю ядерної безпеки (СКЯБ), що входить до складу ІАСК, передбачає безперервний моніторинг щільності потоку нейтронів (ЩПН) і потужність експозиційної дози та, в разі виходу за безпечні межі експлуатації, ввімкнення аварійної сигналізації. За період від початку дослідної експлуатації до сьогодні отримано довгі ряди вимірювань аналіз яких дає можливість інтерпретувати змін в ЩПН, що відбуваються після встановлення НБК в проектне положення. Протягом останніх років, а саме, з 2017 по 2021 рік спостерігається зростання ЩПН по декількох вимірювальних каналах розміщених в приміщенні 305/2, що може пояснюватись зміною вологості, і як наслідок зростання ефективного коефіцієнту розмноження в скупченнях ПВМ [1]. Варто зазначити, що розглядати систему СКЯБ як повноцінну систему оперативного контролю параметрів критичності некоректно, оскільки основна її функція - моніторинг, а контроль передбачає певний вплив на об'єкт з метою контролю його параметрів.

Функції контролю покладені на системи СПРГ, ЮК СОВГ – 40 та частково МСПП [2]. Принцип дії полягає у подачі до місця локалізації ПВМ нейтронпоглинаючих матеріалів (НПМ) а саме, водного розчину нітриду гадолінію концентрацією 0,1 %. Форсунки системи СПРГ та МСПП розміщені під легкою покрівлею ОУ та покривають розвал шахти реактору 4 енергоблоку. У технологічному регламенті ОУ передбачається подача розчинів НПМ згідно затвердженого розкладу та у випадку виникнення аварійної ситуації (перевищення контрольних рівнів) [2]. Використання НПМ передбачає зниження ефективного коефіцієнту розмноження за рахунок поглинання нейтронів у ПВМ, і як наслідок введення негативної реактивності. Фізичним проявом зменшення ефективного коефіцієнту розмноження є зменшення ЩПН, що фіксує нейтронний детектор.

З урахуванням розкладу сеансів запуску систем СПРГ та МСПП було проаналізовано довгі ряди вимірювань ЩПН та встановлено відсутність

відхилень в її динаміці. Цей факт може свідчити про недостатню кількість розчину НПМ або ж про низьку ефективність цих систем, для контролю ефективного коефіцієнту розмноження.

Система ЮК СОВГ – 40 розміщена в приміщенні 208/10 і передбачає безпосередню подачу НПМ в приміщення 305/2 системою напірних трубопроводів через свердловину Ю-12-105. ЮК СОВГ – 40 аварійна система, що передбачає подачу 1% розчину нітриду гадолінію в кількості 40 л безпосередньо до скупчення ПВМ у разі досягнення аварійних меж експлуатації. Дати оцінку ефективності даної системи досить складно, оскільки за період після встановлення НБК у проектне положення дана система жодного разу не експлуатувалась і не перевірялась пробним ввімкненням.

Отже, на даний момент контроль підкритичності в скупченнях ПВМ, забезпечується системами, проектні та експлуатаційні характеристики яких не передбачали існування НБК. За результатами проведеного дослідження, встановлено, що зміна факторів навколишнього середовища, внаслідок будівництва та встановлення НБК в проектне положення, може бути причиною зростання ЩПН скупчень ПВМ. Тому, питання контролю підкритичності скупчень ПВМ має розглядатися з урахуванням ряду факторів, що в даний момент є динамічними, та можуть спричинити аварійні ситуації. Крім того, вищезазначені системи потребують вдосконалення через моральну та технічну застарілість.

#### **Список використаних джерел:**

1. R. L. Godun, A. O. Doroshenko, D. O. Muliar. The effectiveness' assessment of the state system for nuclear safety's monitoring of Shelter object / ISSN 1562-6016. PAST. 2020. №2(126), p. 71 - 80

2. Технологический регламент объекта «Укрытие реактора блока № 4 Чернобыльской АЭС» 1Р-ОУ / МНС України. ДСП «Чернобыльская АЭС». - Арх.№74 від 30.03.2011р. зі змін. від 30.07.2017 р. – 71 с.

#### **Відомості про авторів**

**Анатолій Дорошенко** – Інститут проблем безпеки АЕС НАН України;  
e-mail: ipb.doroshenko@gmail.com

Основні напрямки наукових досліджень: ядерна та радіаційна безпека; системи моніторингу, методи контролю підкритичності ядерно-небезпечних об'єктів

Посада: молодший науковий співробітник

**Дар'я Муляр** – Інститут проблем безпеки АЕС НАН України;  
e-mail: muliar@ispnpp.kiev.ua

Основні напрямки наукових досліджень: наслідки радіаційних аварій, заходи по стабілізації радіаційного стану ОУ, методи та технології радіаційного захисту

Посада: молодший науковий співробітник

# EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF CONTROL SYSTEMS OF SUBCRITICALITY OF THE "SHELTER" OBJECT

Doroshenko A. O. Muliar D. O.

## **Abstract:**

It is presented the results of long - term measurements of neutron flux density (NFD) after the installation of New Safe Confinement into design position. It is shown that in some measurement channels (which detectors are located in room 305/2) there is a significant increase of neutron flux density. This may be due to changes of water concentration in the clusters of fuel-containing materials, which in turn leads to an increase of effective neutron multiplication factor.

The efficiency operation analysis of systems of subcriticality's control of accumulations of fuel-containing materials, such as the Integrated automated monitoring system, gadolinium nitrate supply system, the modernized system of dust suppression, as well as the system of operative input of neutron-absorbing materials. Neutron flux density's analysis and the operation schedule of systems of the subcriticality control showed their low efficiency and the need for their re-equipment.

**Keywords:** fuel-containing materials, neutron-absorbing, control systems of subcriticality, neutron flux density.

## **Authors' Information**

**Anatolii Doroshenko** – Institute for Safety Problems of NPP of NASU;  
e-mail: [ipb.doroshenko@gmail.com](mailto:ipb.doroshenko@gmail.com)

Major Fields of Scientific Research: nuclear and radioactivity safety; monitoring systems, methods for controlling the criticality of nuclear unsafe facilities

Position: junior researcher

**Daria Muliar** – Institute for Safety Problems of NPP of NASU;  
e-mail: [muliar@ispnpp.kiev.ua](mailto:muliar@ispnpp.kiev.ua)

Major Fields of Scientific Research: inheritance of radioactive accidents, methods and technologies of radiation protection

Position: junior researcher

## ЗМІНИ РАДІАЦІЙНИХ УМОВ НА ПРОМИСЛОВОМУ МАЙДАНЧИКУ НБК-ОУ

*Єгоров В. В., Павловський Л. І., Хоменко Д. О., Брилка С. Г.  
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль*

*vegor@ukr.net*

*l\_pavlovsk@ukr.net*

*khomenko.amid@gmail.com*

*brylkasergij@gmail.com*

Діяльність по перетворенню об'єкта «Укриття» (ОУ) на екологічно безпечну систему (ЕБС) включає комплекс робіт по демонтажу нестабільних конструкцій, а також часткове вилучення ядерних матеріалів і високоактивних відходів із об'єкта «Укриття» і переводом паливовмісних матеріалів, які залишаються в ОУ, у контрольований стан. Для реалізації цих проектів необхідна відповідна інфраструктура. Як один із варіантів розміщення об'єктів інфраструктури є територія промислового майданчика нового безпечного конфайнмента ОУ (НБК-ОУ).

Для вибору зон будівництва і маршрутів руху персоналу, а також проведення розрахунків дозовитрат персоналу необхідні дані по радіаційним умовам.

Фахівцями ІПБ АЕС НАНУ в 2020 році вивчено розподіл величин потужності дози (ПД) і характеристики кутового розподілу інтенсивності гамма-випромінювання на проммайданчику, а також проведено порівняльний аналіз зміни радіаційних умов за період від будівництва Арки до пуску комплексу НБК-ОУ у дослідно-промислому експлуатацію.

В ході радіаційних досліджень отримані картограма розподілу ПД (рис. 1) і характеристики кутового розподілу інтенсивності гама-випромінювання (рис. 2 і 3).



Рис. 1. Картограма ПД на проммайданчику НБК ОУ, 2020 р, мкЗв/год.

Величини ПД до і після встановлення Арки в проектне положення приведені у таблиці 1.

Таблиця 1 - Величини ПД на проммайданчику НБК-ОУ до і після насування Арки.

№ п/п	Територія проммайданчика НБК-ОУ	Потужність дози, мкЗв/год	
		до насування арки, 2016 р.	після насування арки, 2020 р.
1	Зона збирання Арки	≤ 5	0,7 - 2
2	Зона відстою частини Арки	5 - 15	1 - 4
3	Транспортна зона	15 - 50	4 - 7
4	Зона встановлення Арки у проектне положення	50 - 150	7 - 10

Результати порівняльного аналізу дозволяють стверджувати, що після встановлення Арки у проектне положення величини ПД на проммайданчику НБК-ОУ знизились від 4 раз до 15. Зниження значень відбулося за рахунок видалення в період будівництва всіх локальних джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) з території проммайданчика, а також зведення нових споруд (технологічна будівля, шлюз доступу пожежних підрозділів на піонерній стіні та інші). Нові споруди на проммайданчику НБК-ОУ є захисними бар'єрами потенційних робочих місць на майданчику НБК-ОУ від ДІВ в ОУ.

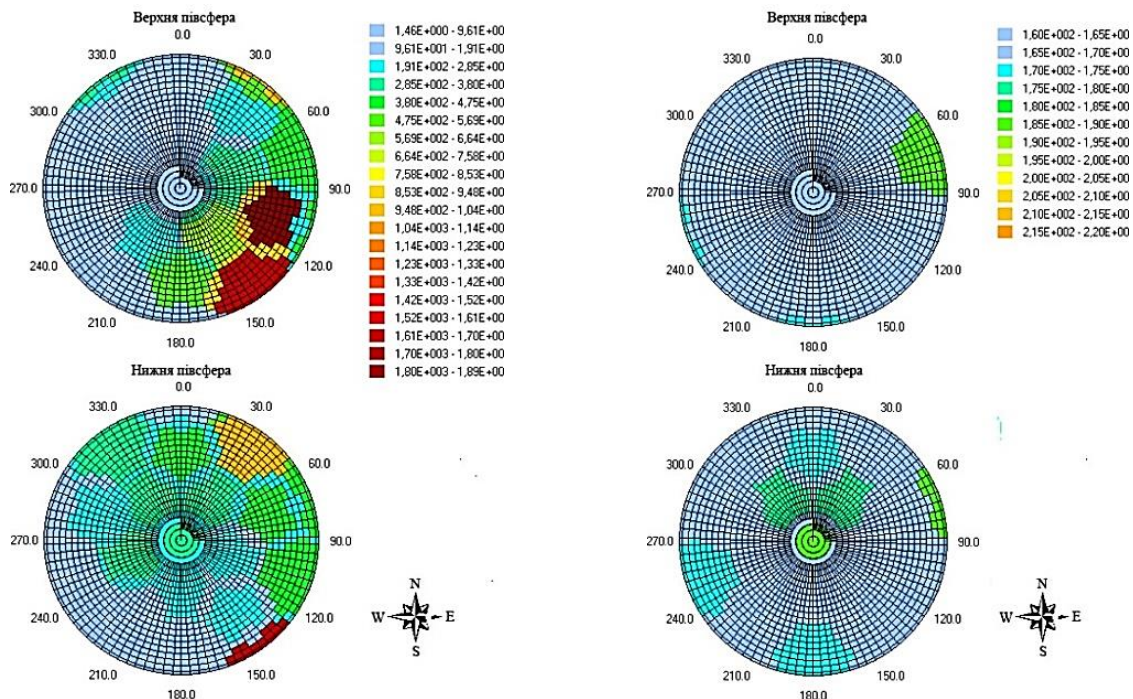
Комплексне дослідження кутового розподілу гамма-випромінювання на майданчику, який межує із комплексом НБК-ОУ проводилося два рази: у 2004 р. і 2020 р. Для проведення порівняльного аналізу точки виміру кутових розподілень гама-випромінювання у 2020 р. були максимально приближені до місць вимірів досліджень 2004 року.

Дослідження кутового розподілу гама-випромінювання виконувалися за допомогою пристрою ШД-1, а також радіометра-дозиметра МКС-07 "Пошук" із виносним колімованим детектором.

Картограма кутового розподілу інтенсивності гамма-випромінювання у точці Ш1 приведено на рис. 2.

Результати кутових досліджень інтенсивності гама-випромінювання в 2020 р відрізняються від попередніх досліджень 2004 року. Порівняльний аналіз картограм (рис. 2) результатів вимірів пристроєм ШД1 в точці вимірювання біля північного фундаменту Арки, між осями Ю+40/68+30 показує, що в 2004 р. основні джерела, що формують ПД в зоні досліджень розташовані в напрямку ОУ (рис. 2а). Але зараз, коли збудовані технологічна будівля, фундаменти НБК-ОУ та лоток збору дощових вод, цей напрямок екранується. Проте став помітний вклад від будівлі сховища твердих і рідких радіоактивних відходів (СТРРВ) (див. рис. 2б). Ця особливість добре видно в точці вимірювання колімованим детектором між осями Ж/68+145 (рис. 3), де напрямок інтенсивності випромінювання на СТРРВ став одним із основних.





а) вимірювання 2004 р.

б) вимірювання 2020 р.

Рис.2. Картограма кутового розподілу гамма-випромінювання в точці Ш1,  $\text{мкР}\cdot\text{год}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$

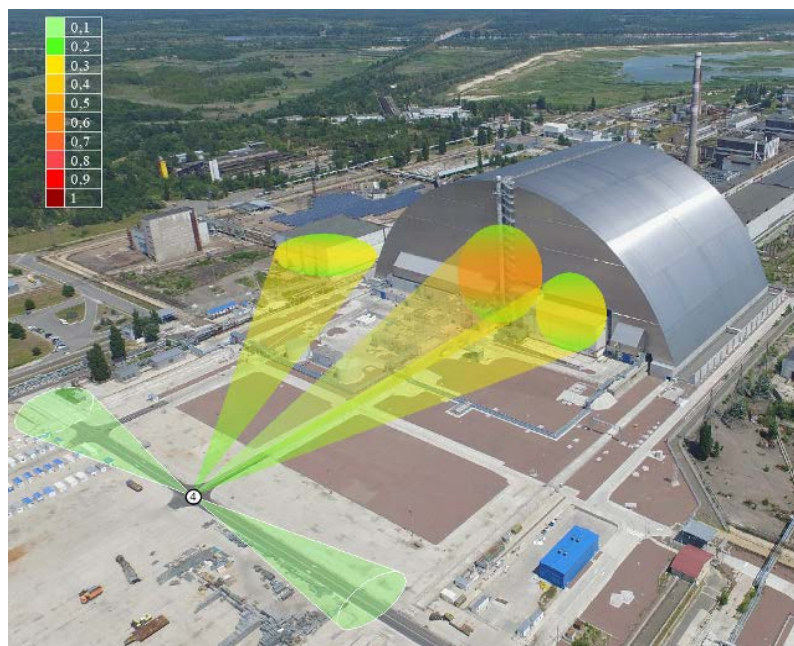


Рис. 3. Основні напрямки на джерела, що формують потужність дози в точці, яка розташована між осями Ж/68+145.

Виходячи із результатів дослідження можна констатувати, що розподіл ПД на території майданчику визначається впливом джерел іонізуючого випромінювання, які розташовані у приміщеннях ОУ, на покрівлі деаераторної етажерки і машинного залу. Зниження значень ПД, а також розподіл кутового гама-випромінювання відбулися за рахунок видалення в період будівництва всіх локальних джерел іонізуючого випромінювання з території, а також зведення нових споруд які є захисними бар'єрами для потенційних робочих місць на проммайданчику НБК-ОУ.



# ЧОРНОБИЛЬСЬКИЙ ТУРИЗМ – НЕОБХІДНА СКЛАДОВА СИСТЕМИ ПОДОЛАННЯ НЕГАТИВНИХ НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА ЧАЕС ТА ВІДРОДЖЕННЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ, РЕГІОНУ І МІСТА СЛАВУТИЧ

*Ємельяненко Ярослав*

*Асоціація чорнобильських туроператорів, ЧОРНОБИЛЬ ТУР, Київ  
yaroslav.yemelianenko@chernobyl-tour.com*

*Мирний Сергій*

*Чорнобильський університет, Асоціація чорнобильського туризму, Київ  
s.mirnyi@gmail.com*

Yemelyanenko Yaroslav, Mirnyi Sergii. Chornobyl tourism – mandatory component of the system for mitigation of the Chornobyl accident aftermath, and revival of the Chornobyl zone, region and Slavutyich-town.

Overview of the scope, achievements, problems and prospects of the tourism to the Chornobyl zone and adjacent region indicates its 5 main functions in the accident aftermath mitigation and subsequent recovery – namely, economic, psychotherapeutic, educational, symbolic, socio-managerial. Including the town of Slavutyich into the system of international Chornobyl tourism is dealt with in particular detail. The “CHORNOBYL TOUR” case is used to show strategies to overcome the aftermath of the COVID-19 pandemic on Chornobyl tourism. Progress in granting the status of the UNESCO World Heritage Site to the set of the Chernobyl-Disaster-related objects and locations is reviewed, and its multifaceted importance is emphasized.

Огляд сучасного стану туризму до Чорнобильської зони відчуження та прилеглих територій, населених пунктів та громад, його досягнень, проблем та перспектив.

Показаний великий масштаб явища, яке вже стало глобальним феноменом, у кількісному вимірі, та його велике значення і розмаїття як культурного та соціального явища.

Із залученням досвіду аварії на АЕС «Фукусіма-1» доведено, що такий туризм є абсолютно необхідним елементом у системі подолання наслідків радіаційних аварій. Спостережені й узагальнені 5 головних функцій чорнобильського (і, ширше кажучи, пост-радіаційного) туризму, а саме:

- (1) Економічна: піднімає економіку Зони та суміжних територій, сприяє їх економічному та соціальному відродженню;
- (2) Психологічна: сприяє психологічній реабілітації постраждалих груп – ліквідаторів, населення «забруднених» територій та евакуйованих;
- (3) Символічна: слугує важливим символом-меседжем для суспільства про – і одночасно практичним кроком до – нормалізації ситуації після аварії;
- (4) Просвітницька: є потужним – предметним, наочним, буквально «даним

у відчуттях» – інструментом інформування і освіти суспільства та фахівців пост-чорнобильської ери в питаннях радіації, радіоекології, радіаційної безпеки, цивільної оборони, ядерної енергетики, психологічної травми суспільства та індивідуума, та багатьох інших;

(5) «Управлінсько-оздоровлююча»: Стимулює повернення пост-аварійної Зони з надзвичайного, мілітаризованого стану до стану звичайного, цивільного, який є більш ефективним для вирішення завдань довготривалого подолання наслідків, нормалізації й відродження, і є передумовою сталого розвитку Зони й регіону. Ця функція є найменш очевидною, і її варто пояснити. Справа в тому, що поява в Зоні великої кількості туристів-представників громадськості та не вписаного в адміністративну структуру Зони (тур)бізнесу фактично створює в ній щось на зразок нормального громадянського демократичного суспільства. Це робить діяльність в до-того-закритій Зоні більш прозорою, стимулює перетворення соціально-управлінської системи Зони із закритого адміністративно-командного, «тоталітарного» стану (що ефективний під час гострої фази аварії, але після її завершення швидко втрачає ефективність у подоланні наслідків, і майже неминуче призводить до застою) – до стану більш відкритого й демократичного, що є запорукою прискорення її розвитку та його перетворення у сталий процес.

Окреслені перспективні напрямки розвитку туризму з точки зору подолання наслідків аварії та економічного, соціального та психологічного відродження Чорнобильської зони та зачеплених її наслідками територій, населених пунктів та громад. Особлива увага приділяється досвіду, результатам, проблемам і перспективам ефективної інтеграції міста Славутич в загальну систему міжнародного чорнобильського туризму.

На прикладі діяльності проекту "ЧОРНОБИЛЬ ТУР" під час пандемії коронавірусу узагальнюється досвід подолання криз інноваційним туризмом, актуальний для даного моменту.

Аналізується 4-річний процес надання об'єктам та історичним місцям Чорнобильської катастрофи статусу Місця Світової спадщини ЮНЕСКО, що був ініційований авторами, і зараз знаходиться на стадії подання Попередньої заявки в ЮНЕСКО від Української держави. Надання цього статусу чорнобильським об'єктам та місцям не тільки стимулює туристичний потік (що досить критично для пост-коронавірусного відродження), – але й органічно відповідає завданням ліквідації наслідків аварії, зростання національного престижу України, збереження унікальної і критично важливої культурної спадщини людства, і, що особливо актуально в теперішній напруженій військово-політичній ситуації, використання історичної спадщини Чорнобиля для зменшення ризику ядерної війни чи конфлікту.

## АНАЛІЗ БЕЗПЕКИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА АЕС УКРАЇНИ

Іньюшев В. В.<sup>1</sup>, Масько О. М.<sup>1</sup>, Боднар О.<sup>2</sup>, Боднар І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ДП «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування» (ДП «ДНІЦ СКАР»), м. Київ, 04213, Україна, e-mail: dnic@dnic.com.ua

<sup>2</sup> Аргонська національна лабораторія (Argonne National Laboratory), 9700 S Cass Ave, Lemont, IL 60439, USA

Протягом 2015-2016 рр. ДНІЦ СКАР здійснював розробку попереднього звіту з аналізу безпеки (ПЗАБ) Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР АЕС України (ЦСВЯП). ПЗАБ був наданий до Держатомрегулювання України у складі пакету документів, на підставі яких НАЕК «Енергоатом» отримав ліцензію на право провадження діяльності на етапах життєвого циклу «будівництво та введення в експлуатацію ЦСВЯП». Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки (ДНТЦ ЯРБ) виконав експертизу ПЗАБ, в якій визначив додаткові вимоги, що мають бути враховані при розробленні актуалізованого ПЗАБ для отримання Окремого дозволу на введення ЦСВЯП в експлуатацію. Зокрема це: обґрунтування сейсмостійкості конфігурації «піраміда» при завантаженні (вивантаженні) контейнера HI-STAR 190 ML, врахування завантаження багатоцільового контейнера (БЦК) пошкодженими відпрацьованими тепловиділяючими збірками (ВТВЗ), обґрунтування збереження цілісності ВТВЗ протягом їх довготривалого зберігання, моніторинг теплового стану та герметичності контейнерів зберігання ВЯП, виконання аналізу ядерної безпеки контейнерної системи у випадку запроектних аварій тощо.

У листопаді 2018 р. відбулася нарада за участю представників НАЕК «Енергоатом», Holtec International, Міністерства енергетики США (DOE), Аргонської національної лабораторії (ANL), ДНТЦ ЯРБ для визначення підходів до невирішених питань та залучення ANL для виконання додаткових обґрунтувань безпеки ЦСВЯП.

Виконання додаткових обґрунтувань безпеки ЦСВЯП за напрямками:

- контроль температури у контейнерах зберігання;
- аналіз поведінки матеріалів при довгостроковому зберіганні ВЯП;
- визначення негерметичних ВТВЗ та процедур поводження з ними;
- аналіз запроектних аварій (ЗПА)

Було виділено в окремий проект і доручено ДНІЦ СКАР. Технічну підтримку проекту надавало DOE. Безпосереднє наукове керівництво проектом (за дорученням DOE) здійснювала ANL. Консультативну підтримку розробок надавала Комісія ядерного регулювання США (NRC).

Далі представлені основні результати виконаних робіт.

**Контроль температури у контейнерах зберігання та валідація кодів і моделей тепловідведення.** Мета роботи - аналіз можливості моніторингу цілісності БЦК шляхом контролю зміни температури повітря на виході з вентиляційного каналу (ВК) HI-STORM 190 та/або зміни температури зовнішньої стінки БЦК.

Вивчалась динаміка зміни температури у вентиляційному каналі HI-STORM 190 та температури стінок багатоцільового контейнеру (БЦК) у разі

розгерметизації зовнішньої стінки БЦК шляхом теплового моделювання з використанням комп'ютерного коду ANSYS. Тепловий аналіз виконувався для двох модифікацій паливної корзини - БЦК-85 і БЦК-31, призначених для зберігання 85 ВТВЗ реактора ВВЕР-440 та 31 ВТВЗ реактора ВВЕР-1000 відповідно.

З використанням коду FLUENT CFD виконаний аналіз впливу миттєвого заміщення гелію повітрям на температуру стінок БЦК та температури повітря в вентиляційному каналі.

Результати теплового аналізу показали, що зміна температури повітря на виході з ВК становить  $\sim 1$  °С. Така різниця температури не може використовуватись для моніторингу герметичності БЦК в силу похибки вимірювальних приладів.

Зміна температури зовнішньої стінки БЦК становить 9 °С та 13,8 °С для БЦК-31 та БЦК-85 відповідно. Це свідчить про можливість ідентифікації розгерметизації БЦК шляхом моніторингу температури зовнішньої стінки БЦК.

**Аналіз поведінки матеріалів при довгостроковому сухому зберіганні ВЯП.** Мета роботи - аналіз поведінки матеріалів системи сухого зберігання ВЯП та обґрунтування збереження цілісності бар'єрів протягом проектного терміну зберігання відпрацьованого палива у ЦСВЯП. Вивчались можливості використання підходів і баз даних, що застосовуються в США, для оцінки властивостей матеріалів системи сухого зберігання ЦСВЯП (бетонних конструкцій, матеріалів контейнерів та металевих конструкцій, паливних таблеток, матеріалів оболонки твелів) та підтвердження герметичності цирконієвої оболонки твелів протягом їх довготривалого зберігання у ЦСВЯП.

На відміну від палива і оболонки твелів, бетонні і металеві компоненти сховища можуть обстежуватися і обслуговуватися протягом всього терміну експлуатації. До того ж вже проведені численні практичні дослідження поведінки матеріалів аналогічних бетонних і металевих конструкцій. Тому найбільш важливим завданням була оцінка поведінки палива і оболонок твелів протягом тривалого часу.

Враховуючи, що ЦСВЯП проектується і споруджується із застосуванням технології американської компанії Holtec International, ліцензованої NRC на базі регуляторних вимог США, то найбільш доцільно було розглядати і враховувати досвід і методологію, що застосовуються і апробовані для ВЯП реакторів PWR, які мають характеристики матеріалу оболонки твел і умови експлуатації аналогічні паливу, що використовується в реакторах ВВЕР.

Результати досліджень показали, що цирконієві оболонки ВТВЗ, які зберігатимуться в ЦСВЯП, піддаються впливу таких самих деградаційних механізмів, як і оболонки палива реакторів PWR.

Порівняння умов експлуатації і сухого зберігання ВТВЗ у ЦСВЯП та аналогічного палива в США дозволило обґрунтовано стверджувати що, за умов дотримання встановлених критеріїв безпечної експлуатації, паливо та цирконієві оболонки ВТВЗ АЕС України зможуть зберегти цілісність протягом встановленого терміну зберігання у ЦСВЯП.

**Ідентифікація пошкоджених відпрацьованих паливних збірок, критерії та процедури поводження з ними.** Мета роботи - аналіз можливостей використання критеріїв ідентифікації пошкодженого ВЯП і процедур поводження, що практикуються в США, у проекті ЦСВЯП. У ЦСВЯП

використовуються БЦК, конструкції яких дозволяють розміщувати в ньому паливо реакторів ВВЕР-1000 і ВВЕР-440, включаючи пошкоджені ТВЗ. У зв'язку з цим виникла потреба в гнучкій системі класифікації ВЯП, яка б дозволяла оптимальним чином здійснювати його відбір для сухого зберігання.

Найбільш прийнятним для цього вбачається використання у проекті ЦСВЯП наступних критеріїв ідентифікації пошкодженого ВЯП та процедур поводження з ним, що практикуються в США:

1. Контроль герметичності оболонок (КГО) ТВЕЛ:

- візуальний огляд за допомогою телевізійних камер;
- КГО твел під час ППР за допомогою штатного пенального водяного методу;

- оперативний сиппінг-контроль герметичності оболонки ТВЕЛ.

2. Використання спеціальних контейнерів для розміщення пошкоджених ТВЗ.

3. Забезпечення можливості безпечного вилучення ВЯП із сховища.

Використання критеріїв ідентифікації пошкодженого ВЯП і процедур поводження з ним, що практикуються в США, в передбачених проектом ЦСВЯП процедурах поводження з ВЯП, має ряд переваг, зокрема:

- ця система критеріїв апробована, достатньо відпрацьована та надійна;
- розглянуті критерії забезпечують більш гнучку систему поводження з ВЯП, що надає певні економічні переваги та вигоди при поводженні з ним;
- ця система дозволить в більшій мірі розвантажити басейни витримки від пошкоджених ТВЗ, що сприятиме підвищенню безпеки експлуатації АЕС.

**Аналіз запроектних аварій (ЗПА).** Мета роботи - аналіз ядерної безпеки контейнерних систем ЦСВЯП в умовах запроектних аварій. Для оцінок критичності під час ЗПА при поводженні з ВЯП обрано наступні вихідні події (ВП) та граничні умови:

- ВП «Падіння HI-TRAC 190 з висоти 38 м», наслідком якої є зміна геометрії палива та конструкційних елементів HI-TRAC 190;

- ВП «Довготривала пожежа», пов'язана з впливом високих температур.

В аналізі консервативно розглядалися контейнери БЦК-31, завантажені паливом типу ТВЗ-М із максимальним початковим збагаченням 4,4%. Для виконання розрахунків критичності використовувався розрахунковий код SCALE.

Розрахунки та аналіз критичності паливних систем виконувала ANL. ДНІЦ СКАР здійснював аналіз результатів розрахунків і оцінку відповідності їх вимогам нормативних документів України, а також надавав рекомендації щодо коригування звітів про результати аналізу критичності.

На основі розрахункової моделі БЦК-31 проаналізована критичність паливних систем, що може виникнути внаслідок деградації паливного кошика, виготовленого з нейтронопоглинаючого матеріалу Metamic, та у ЗПА, пов'язаних з падінням БЦК з великої висоти, а також при довготривалих пожежах (більш ніж 30 хвилин).

Показано, що руйнування і втрата геометричних форм ВЯП і паливної корзини БЦК внаслідок падіння з понадпроектної висоти або впливу на БЦК довготривалої пожежі з плавленням конструкційних елементів паливної корзини та ТВЗ не можуть призвести до виникнення критичності, якщо вигорання палива досягає, або перевищує 50 МВт·доб/кг.

## ПЕРСПЕКТИВНА СИСТЕМА ЗВІЛЬНЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ ВІД РЕГУЛЮЮЧОГО КОНТРОЛЮ

*Казимиров О. С., Беккер Б. І., Євсєєв В. Р.,  
Ієвлєв С. М., Чорний Є. В.*

**Анотація.** Ми включили до назви своєї доповіді слово «система», оскільки вона включає як технічні, так і організаційні питання. Міжнародний досвід і національні регуляторні вимоги до звільнення РАВ від регуляційного контролю та практика поводження з РАВ на АЕС України визначають структуру системи.

Технічно вона побудована на перевірених технічних рішеннях та методиках, що вже впроваджені на АЕС та в організаціях, що причетні до поводження з РАВ в Україні. Показники чутливості та швидкодії системи відповідають необхідним для потоку низько-активних РАВ типового блоку типу ВВЕР 1000.

Система включає три позиції контролю, що використовують пристрої вимірювання гамма випромінювання. На першій позиції проводиться відокремлення потенційно «чистих» матеріалів та виключаються радіаційно забруднені матеріали за допомогою фізичного сортування, на другій – вилучаються порції матеріалу, що має підвищений рівень забруднення, а на третій – проводиться фінальна характеристика за допомогою гамма-спектроскопії та перевіряється відповідність критеріям звільнення від регуляторного контролю. При цьому проводиться аналіз вмісту пакунків з РАВ методом вагових коефіцієнтів за допомогою спеціального програмного забезпечення. На виході системи формується звіт для регуляторного органу.

Система включає в себе логістичну схему характеристики радіоактивних матеріалів, обладнання для кожного етапу характеристики та супутні методологічні розробки. Набір технічних засобів, передбачений такою системою, забезпечує можливість визначення радіаційних характеристик на рівнях, достатніх для оцінки відповідності критеріям звільнення.

Радіоактивні відходи (РАВ) виникають на всіх етапах використання радіоактивних речовин і ядерних технологій - при видобутку і переробці уранових і торієвих руд, виготовленні, використанні та переробці ядерного палива, застосування радіоактивних речовин, радіоізотопних приладів і джерел іонізуючого випромінювання в медицині, промисловості, наукових дослідженнях тощо. Вони являють собою джерело підвищеної небезпеки для населення і навколишнього середовища. Головною метою поводження з РАВ [1] є мінімізація їх потенційної небезпеки.

При цьому слід зазначити, що основна частка радіоактивних матеріалів відноситься до категорії низькоактивних РАВ. Значна частина цих матеріалів може бути звільнена від регулюючого контролю, що знизить навантаження на сховища і дозволить повернути звільнені матеріали в господарський обіг.

У нинішній час є встановлений порядок звільнення від регулюючого контролю для матеріалів у твердому вигляді [2] та рівні звільнення за критерієм питомої активності [3].

Впровадження цих вимог в практику вимагає розробки документів відповідно до [2], а саме встановлення основного порядку підготовки матеріалів до звільнення, виконання вимірювань і розрахунків, що підтверджують відповідність матеріалів критеріям [3], оформлення необхідних документів.

Протягом багатьох років автори приймали участь у створенні апаратного та методичного забезпечення в напрямку характеристики РАВ. Так нами розроблено і впроваджено СТП НАЕК «Енергоатом» [4], яким було визначено порядок проведення вимірювань характеристик упакованих низько- та середньоактивних РАВ [5] за допомогою нашої установки СЕГ-001м «АКП-С»-ТРО (рис.1).

Ще одним кроком у розвитку методичного забезпечення стала розробка і впровадження методики визначення питомої активності радіоізотопів  $^{238}\text{Pu}$  і  $^{239+240}\text{Pu}$  в пробах об'єктів навколишнього середовища зони відчуження ЧАЕС [6] на підставі результатів вимірювання питомої активності реперних радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{154}\text{Eu}$  та встановлених для реперних радіонуклідів вагових коефіцієнтів. Питомі активності реперних радіонуклідів визначаються за допомогою серійних сцинтиляційних спектрометрів енергій бета-гамма-випромінювання типу СЕБ-01 і СЕГ-001 з програмним забезпеченням AkWin виробництва АКП (рис.2).

Протягом останнього часу авторами розроблені проект методики та програмні засоби розрахунку складу радіонуклідів, які важко вимірюються, в партіях РАВ, що засновані на методі вагових коефіцієнтів відповідно до рекомендацій МАГАТЕ [10]. Перша редакція цього продукту успішно випробувана на даних підприємства по переробці твердих РАВ ЧАЕС.

Розроблена і затверджена методика виконання вимірювань [7], було розроблено і випробувано спектрометр енергій гамма-випромінювання СЕГ-001 «АКП-С» «КЕРН» (рис. 3), який може використовуватися для радіаційного контролю металу у вигляді труб і довгих предметів. В рамках європейського проекту U4.01/10BE у 2014-2016 роках автори брали участь у розробці проекту методології звільнення матеріалів від регулюючого контролю. Проект методології рекомендований як базовий документ по створенню системи звільнення радіоактивних матеріалів.

В даний час основним джерелом РАВ України є діючі АЕС. НАЕК «Енергоатом» розробив документ [8], в якому приділено багато уваги питанням визначення характеристик РАВ діючих АЕС.

Останнім часом НАЕК «Енергоатом» обговорює проект по створенню ділянки сортування ПРМ для підготовки до звільнення від регулюючого контролю. Впровадження такого процесу вимагає певних організаційних і технічних зусиль.

На наш погляд вже створені методичні та технічні засоби дозволяють інтегрувати з них комплекс, що забезпечить вирішення основних питань звільнення матеріалів від регулюючого контролю.

Першим етапом є підготовка матеріалів до вимірювань в зоні суворого режиму. При цьому повинні бути вирішені два питання - формування потоку матеріалів та первинне виділення матеріалів, які потенційно можуть бути звільнені.

Формування потоку матеріалів є організаційним завданням, яке може вирішуватися персоналом АЕС під час надходження матеріалів у місце збору шляхом сортування по виду та за походженням. Іншим варіантом є використання установок по сортуванню РАВ, що створюються на АЕС.

Наступним етапом є відбір матеріалу, який може бути звільнений.

Зазвичай це робиться за допомогою стандартних дозиметрів за критерієм неперевикнення контрольних рівнів потужності еквівалентної дози (ПЕД). Однак це недостатньо показовий метод у порівнянні зі спектрометрією гамма-випромінювання.

Ми пропонуємо проводити пошук радіаційних аномалій шляхом ручного сканування порції матеріалу на поверхні за допомогою приладу ПРС-01 (рис. 4) [9]. Цей прилад по суті є портативним спектрометром, який має додаткові функції виявлення радіаційних аномалій. Можливості приладу дозволяють програмно налаштувати його на певну, найбільш інформативну лінію гамма-випромінювання. Він може працювати як автономно, так і під управлінням комп'ютера.

Операції по первинному сортуванню можуть бути організаційно поєднані з використанням установок по сортуванню, що впроваджуються на АЕС.

Вже відібрані матеріали повинні надходити до буферної ділянки в зоні суворого режиму, де буде проводитися поглиблене сортування по радіаційним характеристикам.

Це пропонується проводити на спеціальній установці, яка представляє собою стіл, на який вивантажуються матеріали, відокремлені на першому етапі сортування як такі, що потенційно можуть бути звільнені від регулюючого контролю.

Під поверхнею столу розміщуються 4 однакових детектори (рис.5). Площа столу - 1 м<sup>2</sup>. Стіл графічно поділено на 4 частини, кожна з яких відзначена відповідним номером від 1 до 4. Кожен детектор контролює свою ділянку столу. У стіл планується встановити вбудовані ваги для визначення маси матеріалу, що сортується. Управління установкою здійснюється комп'ютером.

Установка є індикаторною. Вона виявляє радіаційні аномалії у певному секторі. Результати контролю показуються на графічному дисплеї в кольоровому вигляді для кожного сектора окремо. Крім цього виводиться оцінка орієнтовною питомої активності матеріалу по одному або декільком реперним радіонуклідам в кожному секторі та оцінка її відповідності встановленим робочим рівням. На цей же дисплей виводиться службова інформація, необхідна для управління установкою.

Така підготовка може забезпечити виконання вимог щодо однорідності матеріалу відповідно до п. 4.3 [3] і знизити завантаження установки по звільненню.

Останнім етапом є контроль на установці по звільненню. Вона повинна перебувати на контрольованій території АЕС поза зоною суворого режиму. Туди надходять два потоки матеріалів у стандартних упаковках - попередньо відсортовані по радіаційним і фізико-хімічними властивостями матеріали із



зони суворого режиму і відсортовані за фізико-хімічними властивостями матеріали з інших джерел на території АЕС, наприклад, будівельне сміття від ремонту приміщень.

Перед вимірюваннями контейнери з матеріалом зважуються для визначення нетто ваги. На рисунках 6 і 7 надано можливе технічне рішення для установки по звільненню.

Установка буде оснащена 2-ма NaI (Тl) Ø 63×63 мм детекторами, і HPGe детектором з відносною ефективністю близько 30%.

Установка визначає питому активність матеріалів із застосуванням методу вагових коефіцієнтів.

Детектори в комплексі дозволяють вирішити такі завдання: визначення однорідності матеріалу в контейнері за радіаційними характеристиками, HPGe детектор дозволяє підтвердити коректність встановленого нуклідного вектора матеріалу, забезпечити якість вимірювань.

Очікуваний час вимірювань одного контейнера - не більше 15 хв.

Програмне забезпечення установки дозволяє формувати паспорта на партії матеріалу у формі, яка вимагається регулюючим органом.

Таким чином, в Україні вже є власні напрацювання та значний досвід характеристикації РАВ та звільнення матеріалів від регулюючого контролю. Це є хорошою базою для подальшого розвитку напрямку щодо поводження з РАВ та звільнення радіоактивних матеріалів від регулюючого контролю. Даний напрямок може бути розвиненим як для напрямків діяльності на підприємствах "Об'єднання «РАДОН»", так і уранових об'єктів, для яких ці питання є досить актуальними.

#### **Список використаних джерел:**

1. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами» від 30.06.1995.

2. НП 306.4.159-2010 «Порядок звільнення радіоактивних матеріалів від регулюючого контролю у рамках практичної діяльності».

3. Гігієнічні нормативи «Рівні звільнення радіоактивних матеріалів від регулюючого контролю» затверджені постановою головного санітарного лікаря України від 30.06.2010 № 22.

4. СТП 0.03.051-2004. Стандарт підприємства. Тверді радіоактивні відходи. Визначення активності та ізотопного складу. Загальні положення.

5. Тверді радіоактивні відходи. Активність та ізотопний склад. Типова методика виконання вимірювань з використанням сцинтиляційних спектрометрів НВП "АКП" та програмного забезпечення AkWin/АК1-П. МВИ №7-27-05.

6. Удельная активность радионуклидов плутония в пробах объектов окружающей среды Зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. Методика косвенных измерений с использованием сцинтиляционных спектрометров гамма-, бета-излучений с программным обеспечением AkWin. МВИ 06-03/11.

7. «Определение активности естественных радионуклидов в объектах окружающей среды». Методическое пособие. Научно-производственное предприятие «АКП». Киев, 1992.

8.«Комплексна програма поводження з радіоактивними відходами у ДП «НАЕК «Енергоатом» ПМ-Д.0.18.174-16.

9.А. С. Казимиров, Г. Ф. Казимирова, Л. Б. Мартынюк, С. М. Иевлев, Е. В. Черный. Приборы для контроля радиационной безопасности на предприятиях ядерно-энергетического комплекса. Материалы научно-технической конференции «Проблемы поводження з радіоактивними відходами в Україні», 11-й міжнародний виставочний форум «Технологія захити-2012», ГК «Українське державне об'єднання «Радон», Київ, 2012 – 111 С, с.68-78.

10. DETERMINATION AND USE OF SCALING FACTORS FOR WASTE CHARACTERIZATION IN NUCLEAR POWER PLANTS, NUCLEAR ENERGY SERIES No. NW-T-1.18, IAEA, VIENNA, 2009



Рис. 1. Установка СЕГ-001м «АКП-С»-ТРО.



Рис. 2. Сцинтиляційні спектрометри енергій бета-гамма-випромінювань типу СЕБ-01 та СЕГ-001.

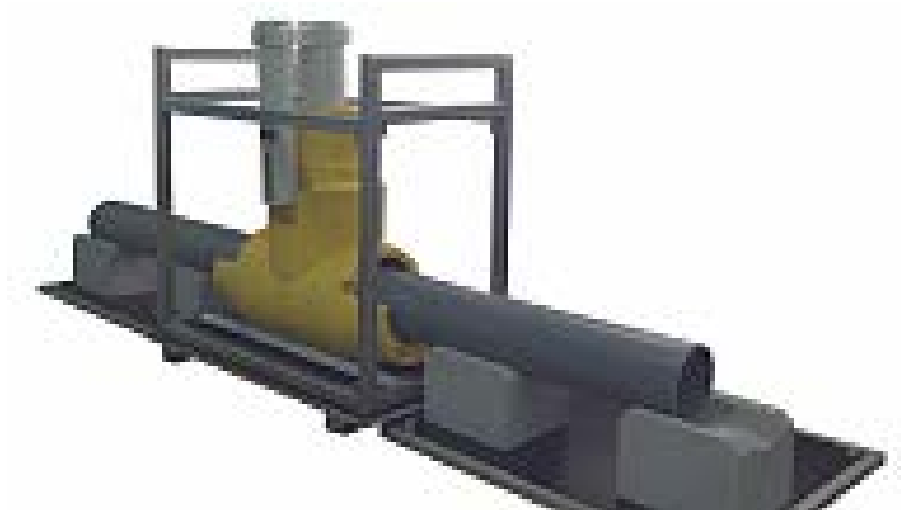


Рис. 3. Спектрометр енергій гамма-випромінювання СЕГ-001 «АКП-С» «КЕРН».



Рис. 4. ПРС-01.

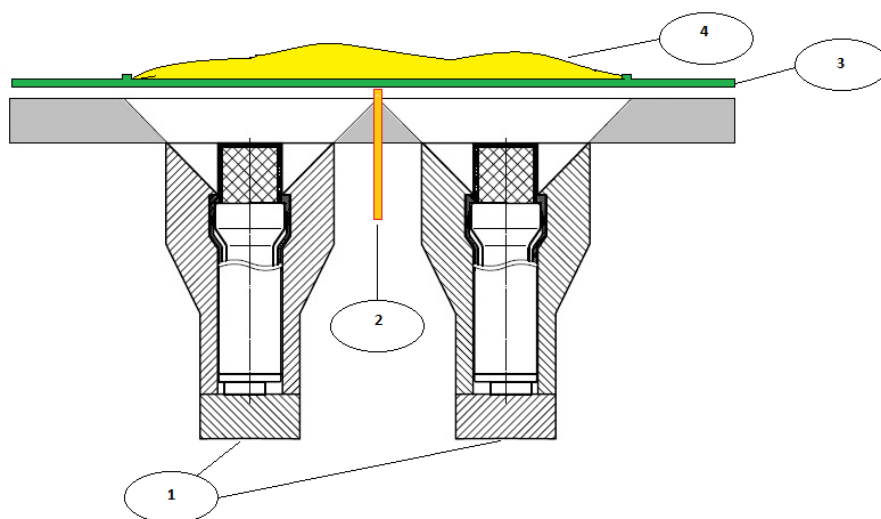


Рис. 5. Поперечний переріз установки сортування:  
 1 – сцинтиляційні детектори гама - випромінювання NaI (Tl) Ø 63×63 мм;  
 2 – датчик ваги;  
 3 – робочий стіл для сортування;  
 4 – сортуємий матеріал.

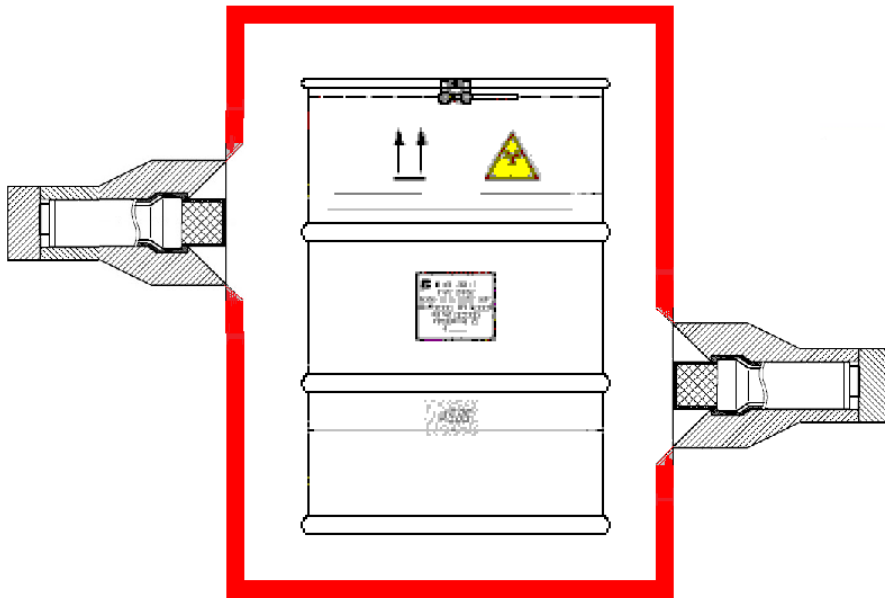


Рис. 6. Установка по звільненню. Вигляд спереду.

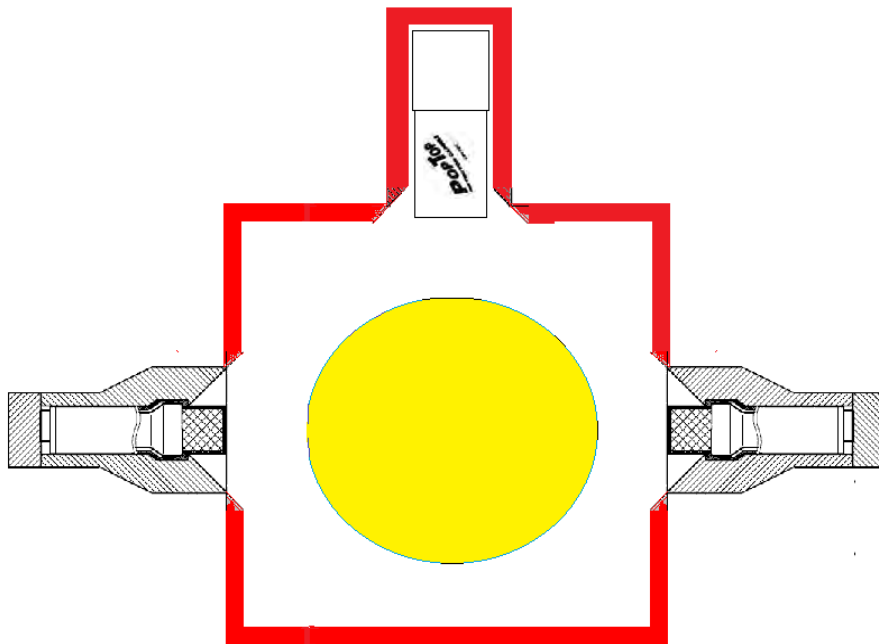


Рис. 7. Установка по звільненню. Вигляд зверху.



Рис. 8 Логістична блок-схема процесу характеристики РАВ.

### **Інформація про авторів:**

**Казимиров О. С., Беккер Б. І., Ієвлєв С. М., Чорний Є. В.** – ТОВ НВП «АТОМКОМПЛЕКСПРИЛАД», м. Київ.

02660 м. Київ, вул. Магнітогорська, 1. e-mail [akr@akr.kiev.ua](mailto:akr@akr.kiev.ua)

**Євсєєв В. Р.** - Національний Науковий Центр «Інститут метрології», м. Харків.

61002, м. Харків, вул. Мироносицька, 42.  
[vladimir.evseev@metrology.kharkov.ua](mailto:vladimir.evseev@metrology.kharkov.ua)

### ***Annex for papers written in English and Russian***

#### **Annotation**

We call our proposal “system” as it includes both technical and organizational arrangements. International experience and national regulatory demands to the materials free release and actual radioactive materials management practice in Ukraine define the structure of the system. Technically it is built on proven technical solutions and procedures implemented at Ukrainian NPPs and organizations involved in radiation monitoring. The sensitivity and speed values of proposed system ensure the low-level radioactive materials flow rate of one WWER 1000 unit. The system consists of three measurement points equipped by gamma-radiation measurement devices. At the first point operator distinguishes potentially clean materials in the flow and excludes “hot” objects by the physical sorting techniques, at the second - excludes portions with elevated level of activity and at the third - effects final spectroscopy measurements. Special software assesses the radioactive content of the material in package using the scaling factor methodology and prepares the final report for the regulatory body.

#### **Аннотация.**

Мы включили в название своего доклада слово «система», поскольку она включает как технические, так и организационные вопросы. Международный опыт и национальные регуляторные требования к освобождению РАО от регуляционного контроля и практика обращения с РАО на АЭС Украины определяют структуру системы.

Технически она построена на проверенных технических решениях и методиках, уже внедренных на АЭС и в организациях, причастных к обращению с РАО в Украине. Показатели чувствительности и быстродействия системы соответствуют необходимым для потока низко-активных РАО типичного блока типа ВВЭР 1000.

Система включает три позиции контроля, которые используют устройства измерения гамма излучения. На первой позиции проводится отделения потенциально «чистых» материалов и исключаются радиационно загрязненные материалы с помощью физической сортировки, на второй - изымаются порции материала, имеющего повышенный уровень загрязнения, а на третьей - проводится финальная характеристика с помощью гамма-спектрологии и проверяется соответствие критериям освобождения от

регуляторного контроля. При этом проводится анализ содержимого упаковок с РАО методом весовых коэффициентов с помощью специального программного обеспечения. На выходе системы формируется отчет для регуляторного органа.

Система включает в себя логистическую схему характеристики радиоактивных материалов, оборудования для каждого этапа характеристики и сопутствующие методологические разработки. Набор технических средств, предусмотренный такой системой, обеспечивает возможность определения радиационных характеристик на уровнях, достаточных для оценки соответствия критериям освобождения.

## НЕОРГАНІЗОВАНИЙ ВИКИД РАДІОАКТИВНИХ АЕРОЗОЛІВ ЧЕРЕЗ ЛЕГКУ ПОКРІВЛЮ ОБ'ЄКТА "УКРИТТЯ" В 1998 - 2019 рр.

*Калиновський Олександр, Краснов Віктор, Філіппов Олексій  
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль,  
вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, України 07270, o.kalynovsky@isprpp.kiev.ua*

В статті представлені результати довгострокового моніторингу неорганізованих викидів радіоактивних аерозолів (РА) (1998–2017 рр.) через легку покрівлю об'єкта "Укриття" (ОУ). До складу РА викидів включали довгоживучі нукліди (ДЖН) чорнобильського генезу:  $\Sigma\alpha$ - ДЖН ( $^{238}, ^{239}, ^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) і  $\Sigma\beta$ - ДЖН ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ). Розрахунок складу та активності радіонуклідів у викидах виконували на підставі аналізу активності нуклідів, що акумульовані на планшетах, які розміщені безпосередньо над люком. При розрахунку інтегрального викиду сумарна площа отворів на верхніх відмітках ОУ оцінювалась в  $120 \text{ м}^2$ .

На рисунку 1 надано динаміку неорганізованого викиду  $\Sigma\text{ДЖН}$  через технологічні отвори і нещільності легкої покрівлі ОУ в період з 1998 р. по 2019 р.

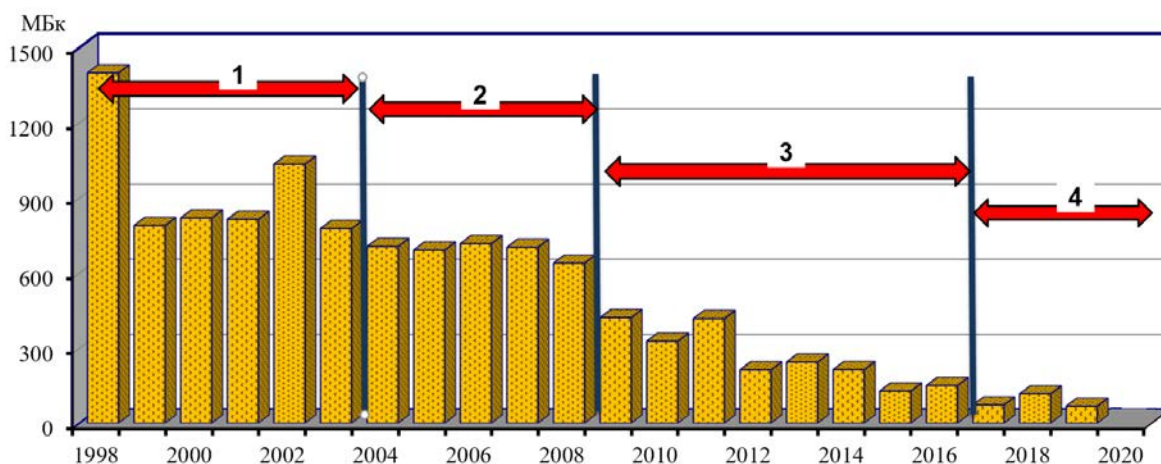


Рисунок 1. Динаміка неорганізованих викидів  $\Sigma\text{ДЖН}$  через нещільності в покрівлі ОУ.

Динаміку викидів  $\Sigma\text{ДЖН}$  можна умовно розділити на чотири періоди:

- перший період (1) – з 1998 р. по 2003 р., в цей час тривала експлуатація третього енергоблока ЧАЕС (по 2000 р.), працювала система пилопригнічення тільки над центральним залом та були виконані невідкладні роботи з ремонту окремих будівельних конструкцій ОУ, підсилення опор балок Б1 і Б2, герметизації легкої покрівлі. Середній викид  $\Sigma\text{ДЖН}$  становив  $940 \pm 245 \text{ МБк}$ ;
- другий період (2) – з 2004 р. по 2008 р., при якому була створена та введена в експлуатацію модернізована система пилопригнічення (МСПП), виконані роботи з герметизації покрівлі ОУ та установки металевих конструкцій підсилення. Крім того в приміщеннях ОУ здійснювалась підвищена технологічна діяльність, що пов'язана зі стабілізаційними заходами. Середній викид  $\Sigma\text{ДЖН}$  становив  $690 \pm 31 \text{ МБк}$ ;

- третій період (3) – з 2009 р. по 2016 р. Цей період закінчується в грудні 2016 р., коли арка НБК була встановлена в проектне положення. Середнє значення викиду  $\Sigma\beta$  дорівнює  $265 \pm 113$  МБк, тобто він зменшився більше ніж у три рази порівняно з першим періодом. Мінімальне значення викиду становило 128 МБк (зафіксовано в 2015 р.). В цей проміжок часу здійснювалось: будівництво допоміжних приміщень комплексу НБК; спорудження НВТ (2011 р.) і демонтаж ВТ-2 (2013 р.); демонтаж окремих будівельних конструкцій ОУ (2015 р.); спорудження західної та східної стін огороджуючого контуру НБК (2016 р.);

- четвертий період (4) – з 2017 р. по 2019 р. в цей період виконувались роботи з герметизації арки НБК (2017 р.), демонтаж окремих конструкцій машзалу (2018 р.) та введення в експлуатацію комплексу НБК-ОУ (літо 2019 р.). В цей період викид РА відбувається в підарковий простір і середнє значення викиду  $\Sigma\text{ДЖН}$  дорівнює  $86 \pm 27$  МБк, тобто викид зменшився більше ніж у десять разів порівняно з першим періодом.

Основними причинами зменшення викиду РА є зниження температури паливовмісних матеріалів, введення в експлуатацію МСПП, а також спорудження НБК, що забезпечило захист ОУ від впливу метеорологічних факторів.

**Ключові слова:** моніторинг радіоактивних аерозолів, радіоактивні викиди, довгоживучі нукліди, об'єкт "Укриття", новий безпечний конфайнмент.

## **THE UNORGANIZED RELEASES OF RADIOACTIVE AEROSOLS THROUGH THE LIGHT ROOF OF THE SHELTER OBJECT IN 1998-2019**

*Kalynovskyi A. K., Krasnov V. A., Filippov O. V.  
Institute for Safety Problems of NPP of NASU, Chernobyl, Ukraine*

**Abstract:** The results of long-term monitoring (1998–2019) of unorganized releases of radioactive aerosols (RA) through the light roof of the Shelter Object (SO) are presented in the article. The analysis of the monitoring results showed that emission of RA from the OS after installation of the arch into design position (2017) decreased more than ten-fold compared to beginning of 2000s (1998 -2003).

The main reasons for the reduction of RA releases are reduction of fuel-containing materials temperature, commissioning of the modernized dust suppression, as well as construction of the NSC, which provided a protection of the OS from meteorological factors impact.

**Keywords:** monitoring of radioactive aerosols, radioactive releases, Shelter Object, New Safe Confinement.



## ЦЕНТРАЛІЗОВАНЕ СХОВИЩЕ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

*Касперович Ігор,  
Медінцов Володимир  
ДП "НАЕК "Енергоатом", ВП "Атомремонтсервіс"  
м. Славутич*

**Annotation** This report describes the HOLTEC technology used at the SNF Centralized Storage Facility during preparation for storage, loading, shipment, transportation and storage of spent nuclear fuel from Ukrainian NPPs.

The Centralized Storage Facility for Spent Nuclear Fuel (CSFSF) is a nuclear facility of national importance. The CSFSF implements the technology of "dry" storage of spent nuclear fuel in special containers, which provides for the storage of dried spent nuclear fuel in an inert gas environment in double-walled sealed packages (MPC) placed in HI-STORM storage containers with natural air cooling. This SNF management technology was developed by the American company HOLTEC and is used at nuclear power plants in the United States and in other countries of the world.

The CSFSF capacity ensures the placement and storage of VVER spent nuclear fuel generated at power units No. 1-4 of Rivnenskaya, power units No. 1-2 at Khmel'nitskaya and power units No. 1-3 of the South-Ukrainian NPP, incl. the fuel in the BV, the fuel loaded into the reactors, and the fuel that will be produced during the operation of all power units, taking into account the gradual increase in storage volumes.

The site for the construction of the CSFSF in the administrative-territorial respect is located in the Ivankovsky district of the Kiev region and is located on the territory of the Exclusion Zone and the Zone of unconditional (mandatory) resettlement.

The service life of the CSFSF is 100 years.

Вибір технології, яка повинна бути реалізована у централізованому сховищі відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР України (ЦСВЯП), був здійснений в процесі тендера, проведеного ДП НАЕК «Енергоатом» в 2003-2004 р.р. за процедурою міжнародного тендера «під ключ».

Переможцем тендеру стала корпорація «Holtec International» (США). Запропонована нею технологія передбачала:

- використання багатоцільових контейнерів (БЦК), розрахованих на зберігання 31 ВТВЗ ВВЕР-1000 (БЦК-31) або 85 ВТВЗ ВВЕР-440 (БЦК-85);
- завантаження ВТВЗ в БЦК встановленим у HI-TRAC в реакторних відділеннях енергоблоків АЕС;
- транспортування БЦК з ВТВЗ до ЦСВЯП в спеціальному контейнері для транспортування HI-STAR;
- розміщення БЦК з ВТВЗ в спеціальні захисні вентильовані оболонки (контейнери), які пропонувалися для зберігання ВТВЗ на території ЦСВЯП з

використанням наземного контейнера HI-STORM 100S, досвід експлуатації якого є у США.

Проект передбачає розміщення і довготривале зберігання (не менше 100 років) ВТВЗ реакторів ВВЕР:

- 12010 ВТВЗ реакторів ВВЕР-1000;
- 4519 ВТВЗ реакторів ВВЕР-440.

В рамках проекту ЦСВЯП планується реалізація технології сухого зберігання ВТВЗ в інертному середовищі з природним повітряним охолодженням, що включає:

- на кожному енергоблоці АЕС вивантаження ВТВЗ з БВ із завантаження в БЦК;
- транспортування БЦК з ВТВЗ за допомогою транспортних контейнерів HI-STAR з АЕС на ЦСВЯП;
- приймання на майданчику ЦСВЯП, перевантаження БЦК з транспортних контейнерів HI-STAR в контейнери зберігання HI-STORM;
- транспортування завантажених HI-STORM з будівлі приймання та установку їх на майданчику зберігання.

Майданчик для будівництва ЦСВЯП в адміністративно-територіальному відношенні розташована в Іванківській районі Київської області та знаходиться на території Зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення.

Зони завантаження ВТВЗ в БЦК і підготовки контейнерів HI-STAR до транспортування розташовуються в реакторних відділеннях енергоблоків Хмельницької, Рівненської та Южно-Української АЕС.

У центральному залі реакторного відділення проводиться завантаження ВТВЗ, витриманих в басейні витримки не менше 5 років, в БЦК, зневоднення і осушення БЦК, герметизація БЦК і заповнення його гелієм.

БЦК забезпечує два бар'єри герметичності на шляху поширення радіоактивних речовин від ВТВЗ в навколишнє середовище.

Для забезпечення біологічного захисту персоналу при перевантаженнях використовується перевантажувальний контейнер HI-TRAC і транспортний контейнер HI-STAR.

Транспортування БЦК з ВТВЗ з АЕС на ЦСВЯП здійснюється з використанням транспортних контейнерів HI-STAR, які спроектовані відповідно до вимог з безпеки США і підлягають сертифікації в Україні як упаковка типу В(U)F відповідно до вимог ПБПРМ-2020.

Будівля приймання призначене для перевантаження БЦК з ВТВЗ з транспортних контейнерів HI-STAR в контейнери для довготривалого зберігання HI-STORM. Перевантаження БЦК з ВТВЗ здійснюється у вузлі перевантаження контейнерів (ВПК) за допомогою пристрою перевантаження контейнера (ППК).

Майданчик зберігання контейнерів з ВТВЗ є пасивною системою зберігання контейнерів HI-STORM, які мають два бар'єри герметичності БЦК і біозахисний бар'єр контейнера HI-STORM.

Більшу частину промайданчика ЦСВЯП займає майданчик для зберігання контейнерів HI-STORM з ВЯП. Майданчик для зберігання

контейнерів призначена для тривалого зберігання МЦК в контейнерах HI-STORM. Вона складається з монолітних плит-фундаментів, на які встановлюються контейнери. Між плитами передбачені технологічні проїзди шириною від 9,00 до 11,00 м для проїзду і маневрів транспортера і іншої обслуговуючої техніки, а також для проходження обслуговуючого персоналу. Проектний термін експлуатації майданчика зберігання контейнерів - 100 років.

Майданчик для зберігання має прямокутну форму і витягнута уздовж промайданчика ЦСВЯП з півночі на південь до її центральної частини. Майданчик зберігання контейнерів має власне сітчасту огорожу з радіаційним контролем по периметру і комплексом ІТС системи фізичного захисту. Уздовж майданчика зі східної сторони проходять залізничні колії відстою і маневрування.

Ядерна безпека на всіх цих етапах забезпечується в основному засобами БЦК. Усередині БЦК, ВТВЗ розміщуються в осередках кошика, що забезпечують їх постійне положення. Кошик цілком виконана з «Metamic-NT» - композитного матеріалу, що складається з алюмінію і В4С. Таким чином, всі ВТВЗ повністю оточені матеріалом, що поглинає нейтрони. Сама кошик завантажується ВТВЗ в умовах рівномірного завантаження (БЦК-85) або зонований завантаження (БЦК-31), сумарне залишкове тепловиділення яких обмежена. Сам БЦК здатний запобігати попаданню води при нормальних і аварійних умовах. Так як БЦК, являє собою двостінний герметичний посудину з нержавіючої сталі, заповнений гелієм і містить паливну кошик, що забезпечує два незалежних локалізуючих бар'єру між радіоактивним матеріалом і навколишнім середовищем.

Поводження з ВТВЗ в рамках технології Холтек для ЦСВЯП включає:

- завантаження БЦК на енергоблоках АЕС з використанням перевантажувального контейнера HI-TRAC;
- осушення, заповнення інертним газом (гелієм) і заварка двох бар'єрів герметичності БЦК на енергоблоках АЕС;
- перевірка герметичності і якості зварювання кришок БЦК на енергоблоках АЕС;
- перевантаження підготовленого БЦК в транспортний контейнер HI-STAR за допомогою перевантажувального контейнера HI-TRAC;
- відправка вагон-контейнерного ешелону з контейнерами HI-STAR, заповнених БЦК на ЦСВЯП;
- прийом вагон-контейнерного ешелону в ЦСВЯП на шляхах відстою і маневрування;
- перевантаження БЦК з транспортного контейнера HI-STAR в контейнер для зберігання HI STORM в будівлі приймання;
- вивезення контейнера HI-STORM з БЦК на майданчик зберігання за допомогою внутрішньомайданчикowego транспортера;
- довгострокове зберігання контейнерів HI-STORM з ВТВЗ.

Транспортування БЦК з ВТВЗ з АЕС на ЦСВЯП здійснюється залізничним транспортом з використанням спеціальних залізничних транспортерів і

транспортних контейнерів HI-STAR, які спроектовані відповідно до вимог з безпеки США і будуть сертифіковані в Україні як упаковка типу В (U) відповідно до вимог ПБПРМ- 2020.

Будівля примикає призначене для перевантаження БЦК з ВТВЗ з транспортних контейнерів HI-STAR в контейнер для довготривалого зберігання HI-STORM.

В межах ЦСВЯП з відпрацьованим ядерним паливом здійснюються наступні транспортно-технологічні операції:

- прийом залізничного спецсоставу з транспортними контейнерами HI-STAR, завантаженими ВЯП на шляхах відстою і маневрування;
- почергова (по одній платформі) розвантаження залізничних платформ з транспортними контейнерами HI-STAR, завантаженими ВЯП, в будівлі приймання;
- перевантаження, заварених на АЕС, первинних двустінних герметичних упаковок з ВЯП (БЦК) з транспортного контейнера HI-STAR в контейнер зберігання HI-STORM в боксі перевантаження за допомогою вантажопідіймального крана;
- переміщення контейнера зберігання HI-STORM, завантаженого ВЯП, з будівлі приймання на майданчик зберігання за допомогою спеціального транспортера;
- установка контейнера зберігання HI-STORM, завантаженого ВЯП, на фундамент площадки зберігання з допомогою транспортера;
- тривале зберігання ВЯП в контейнері HI-STORM. Безперервний контроль температури на вході і виході вентиляційних отворів кожного HI-STORM.
- спостереження за станом вентиляційних отворів. Контроль радіаційної обстановки на майданчику зберігання.

## УМОВИ ФОРМУВАННЯ РАДІОАКТИВНОГО ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА ПРОММАЙДАНЧИКУ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС

*Коваленко І. О., Панасюк М. І., Сосонна Н. В., Левін Г. В.,  
Люшня П. А., Одінцов О. О., Паламар Л. А., Онищенко І. П.\**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль,  
07270, Україна, [piranasyuk53@gmail.com](mailto:piranasyuk53@gmail.com)*

*\*Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень  
НАН України, вул. О. Гончара, 55б, Київ, 01054, Україна*

За даними багаторічних моніторингових досліджень, забруднення підземних вод  $^{90}\text{Sr}$  на проммайданчику ЧАЕС сягає значень 600 - 4000 Бк/л, що в 2000 раз перевищує норми для питної води. Підземні води розвантажуються в р. Прип'ять. Відносний внесок ґрунтових вод у радіоактивне забруднення поверхневих вод р. Прип'ять досягає 25-30 %. Високі концентрації  $^{90}\text{Sr}$  характерні для підземних вод з рН більше 9.5. Другий механізм формування високих концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  зв'язаний з підвищеними концентраціями іону  $\text{Ca}^{2+}$ . З часу після аварії 1986 р. концентрації  $^{90}\text{Sr}$  в пробах підземних вод виявляють тенденцію до зростання. Сильнолужне середовище в підземних водах в інтервалі рН = 8.9 – 10.9. призводить до зростання концентрацій урану та ТУЕ. В цьому інтервалі рН, частка урану в іонно-дисперсному (розчинному) стані збільшується в 2 - 2,5 рази до значень 92% порівняно з дослідженнями, які припадали до періоду спостережень з рН менше 8.9. З подальшим підвищенням значень рН вище 10.9, на відміну від розподілу  $^{90}\text{Sr}$ , доля урану в іонно-дисперсній формі знижується до 35 % за рахунок гідролізації комплексних карбонатних сполук. Простежений зв'язок хімічного складу підземних вод та концентрацій радіонуклідів. Аналіз просторового розподілу хімічних елементів та сполук за допомогою діаграм Дурова та Пайпера вказує, що Об'єкт «Укриття» являється значним джерелом надходження в підземні води іонів  $\text{Na}^+$  та  $\text{K}^+$ .

На окремих ділянках поверхні проммайданчика ЧАЕС склалися сприятливі умови для зосередженої інфільтрації атмосферних опадів через радіоактивно забруднені ґрунти зони аерації в підземні води. Організація поверхневого стоку води для запобігання зосередженої інфільтрації атмосферних опадів дасть змогу значно зменшити радіоактивне забруднення довкілля.

**Ключові слова:**  $^{90}\text{Sr}$ , уран, ТУЕ, підземні води, пальовий фундамент НБК, основні іони, рН, міграція, проммайданчик Чорнобильської АЕС.

За даними моніторингових досліджень по окремих спостережним свердловинам, що розташовані на проммайданчику ЧАЕС, з часом після аварії об'ємні активності  $^{90}\text{Sr}$  аномально різко підвищуються в 200 – 500 разів до значень 600 – 2100 Бк/л. При цьому також підвищуються, величини рН та концентрації основних іонів. Вищенаведені рівні вмісту  $^{90}\text{Sr}$  в підземних

водах почали виявлятися тільки з 2005 р. без видимих додаткових надходжень радіоактивно забруднених вод у водоносний горизонт від джерел забруднення.

За нашими дослідженнями, один із механізмів підвищення міграційної здатності радіонуклідів у підземних водах пов'язаний із формуванням сильнолужного середовища з рН більше 9.5. Аналіз змін хімічного складу та динаміка концентрацій радіонуклідів дозволяють зробити висновок, що має місце зниження сорбційних властивостей та процеси десорбції  $^{90}\text{Sr}$  з поверхні скелету ґрунту.

Високі значення рН формуються безпосередньо при контакті ґрунтових вод із бетоном фундаментів споруд чи надходженням у водоносний горизонт водних мас, що контактували з бетоном.

Другий механізм формування високих концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  в підземних водах на ділянці розташування комплексу НБК - ОУ пов'язаний з підвищеними концентраціями іону  $\text{Ca}^{2+}$ . В 2017 р. просторові розподіли максимальних концентрацій іонів кальцію (85 - 120 мг/л) майже повністю збігаються з розподілом максимальних значень концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  (520 - 2100 Бк/л). Зростання вмісту іонів кальцію призводить до підвищення концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  в пробах підземних вод. І навпаки, зниження вмісту іонів кальцію обумовлює зменшення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах води. Так, наприклад, за результатами моніторингових досліджень по свердловині 21-1А, при концентрації  $\text{Ca}^{2+}$  більш ніж 20 мг/л концентрація  $^{90}\text{Sr}$  зростає в 6 - 10 разів. І навпаки, за результатами опробування свердловині 13-2А, зниження вмісту іонів кальцію нижче 20 - 30 мг/л приводить до зменшення об'ємної активності  $^{90}\text{Sr}$  у 3 - 4 рази. Як відомо, іони кальцію найбільш сильно зменшують поглинання радіостронцію твердою фазою ґрунту і, отже, сприяють зростанню об'ємних активностей  $^{90}\text{Sr}$  у воді водоносного горизонту, у тому числі за рахунок підвищення ступеню десорбції  $^{90}\text{Sr}$  з поверхні частинок скелета ґрунту.

В цілому, з часу після аварії 1986 р концентрації  $^{90}\text{Sr}$  в пробах підземних вод виявляють тенденцію до зростання

Сильнолужне середовище в підземних водах призводить до зростання концентрацій урану та ТУЕ. При цьому, найвища концентрація урану спостерігається в інтервалі рН = 8.9 – 10.9. В цьому інтервалі рН частка урану в іонно-дисперсному (розчинному) стані збільшується в 2 - 2,5 рази до значень 92% порівняно з дослідженнями, які припадали до періоду спостережень з рН менше 8.9. З подальшим підвищенням значень рН вище 10.9, на відміну від розподілу  $^{90}\text{Sr}$ , доля урану в іонно-дисперсній формі знижується до 33-36% за рахунок гідролізації комплексних карбонатних сполук.

Аналіз просторового розподілу хімічних елементів та сполук за допомогою діаграм Дурова та Пайпера вказує, що Об'єкт «Укриття» являється значним джерелом надходження в підземні води іонів  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  та інших.

Корозія бетону фундаменту Нового безпечного конфайнмента, який складається з 424 паль, що перекривають водоносний горизонт на половину

його потужності, призводить до зміни хімічного складу підземних вод. За останній час спостерігається зростання концентрації окремих іонів в пробах із свердловини 31-1А в 1,4 – 5 разів. Цей факт потребує подальших спостережень та уточнень.

Одним із заходів, який може привести до зменшення радіоактивного забруднення підземних вод, є регулювання поверхневого стоку атмосферних опадів. На окремих ділянках поверхні промайданчика ЧАЕС склалися сприятливі умови для зосередженої інфільтрації атмосферних опадів через радіоактивно забруднені ґрунти зони аерації в підземні води. Об'ємні активності  $^{90}\text{Sr}$  у пробах підземних вод із свердловин, що розташовані в зоні впливу таких ділянок, досягають 600 – 3800 Бк/л. Одна із таких ділянок розташована біля південної стіни СРТВ (свердлов. С-4А, 3-Г, 2-Г, 30-1А). Дощові води з даху СРТВ скидаються на рельєф та інфільтруються через радіоактивно забруднені ґрунти в підземні води. Друга ділянка розташована на південь від локальної зони Об'єкта «Укриття» в районі розташування спостережних свердловин С-24, С-22А, Б. Ліквідація зосереджених скидів атмосферних опадів на поверхню промайданчика ЧАЕС дасть змогу значно зменшити радіоактивне забруднення довкілля.

## **CONDITIONS OF FORMATION OF RADIOACTIVE AND CHEMICAL COMPOSITION OF GROUNDWATER ON THE INDUSTRIAL SITE OF THE CHERNOBYL NPP.**

*Kovalenko I. O., Panasiuk M. I., Sosonna N.V., Levin G. V., Lyushnya P. A., Odintsov O. O., Palamar L. A., Onyshchenko I. P.\**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine  
nipanasyuk53@gmail.com*

*\*Radio-Environmental Center NAS of Ukraine, O. Gonchara str., 55b, Kyiv, 01054, Ukraine*

According to long-term monitoring studies, the pollution of  $^{90}\text{Sr}$  groundwater at the Chernobyl industrial site reaches values of 600 - 4000 Bq/l, which is 2000 times higher than the norms for drinking water. Groundwater is discharged into the Pripyat River. The relative contribution of groundwater to the radioactive contamination of surface waters of the Pripyat River reaches 25-30%. High concentrations of  $^{90}\text{Sr}$  are characteristic of groundwater with a pH greater than 9.5. The second mechanism of formation of high concentrations of  $^{90}\text{Sr}$  is associated with elevated concentrations of

$\text{Ca}^{2+}$  ion. Since the accident in 1986, the concentration of  $^{90}\text{Sr}$  in groundwater samples show a tendency to increase. Strong alkaline environment in groundwater in the range of pH = 8.9 - 10.9. leads to an increase in concentrations of uranium and TUE. In this pH range, the proportion of uranium in the ion-dispersed (soluble) state increases by 2 to 2.5 times to 92% compared with studies that occurred before the observation period with a pH less than 8.9. With a further increase in pH above

10.9, in contrast to the distribution of  $^{90}\text{Sr}$ , the proportion of uranium in ion-dispersed form is reduced to 35% due to the hydrolysis of complex carbonate compounds. The relationship between groundwater chemical composition and radionuclide concentrations has been observed. Analysis of the spatial distribution of chemical elements and compounds using Durov and Piper diagrams indicates that the Shelter Object is a significant source of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  ions in groundwater.

Favorable conditions for concentrated infiltration of precipitation due to radioactively contaminated soils of the aeration zone into groundwater have developed in some areas of the Chernobyl industrial site. The organization of surface water runoff to prevent concentrated infiltration of precipitation will significantly reduce radioactive contamination.

**Key words:**  $^{90}\text{Sr}$ , uranium, TUE, groundwater, NSC pile foundation, ra, basic ions, pH, migration, Chernobyl industrial site.



## ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНІ ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ЧОРНОБИЛЬСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ

*Коваленко Андрій, Сакаль Оксана,  
Державна установа «Інститут економіки природокористування та сталого  
розвитку Національної академії наук України», місто Київ  
A.Kovalenko@nas.gov.ua, o\_sakal@ukr.net*

Solving the environmental and economic problems of the development of the Chernobyl territories on a scientific reasonable basis, using long-term strategic planning documents is still an unsolved problem. Against the background of the presence of Chernobyl issues in the program documents, today there is no single comprehensive approach to these issues at the state level. The fire danger in the Chernobyl territories once again raised the issue of their long-term socio-economic and environmental development on the basis of strategic program and planning documents of the state level with appropriate and regular amounts of budget funding. In our opinion, in order to bring the Chernobyl territories back to life, the protected approach should be combined with efficient activities to survey the entire territory of the Chernobyl zone and completely clean it from pollution based on innovative technologies, as well as further restoration of economic and research activities and tourism infrastructure, including social. Thus, man must repay his debt to nature, acting consciously and sparingly, not limited to knowledge of the Chernobyl zone, but transforming it for sustainable development, being armed with all the achievements of modern science and humanism.

Розв'язання еколого-економічних проблем розвитку чорнобильських територій на науково обґрунтованій основі, з використанням довгострокових документів стратегічного планування залишається невирішеною проблемою. На фоні присутності чорнобильської тематики в програмних документах на сьогодні відсутній єдиний комплексний підхід до цих питань на державному рівні.

Водночас органами державного управління здійснюються окремі кроки в цьому напрямі. Так, у Національній економічній стратегії на період до 2030 року, затвердженій Урядом у березні 2021 р., задекларовано, зокрема, наступні заходи:

- розроблення і ухвалення Стратегії розвитку території зони відчуження;
- прийняття Закону України «Про внесення змін до Загальнодержавної програми зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему»;
- оновлення законодавства про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи;
- перетворення території зони відчуження на точку зростання економіки [1].

Згідно з Указом Президента України «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 23 березня 2021 року «Про виклики і загрози національній безпеці України в екологічній сфері та першочергові заходи щодо їх нейтралізації» № 111/2021 від 23.03.2021 Кабінету Міністрів України для забезпечення екологічної безпеки і підтримання екологічної рівноваги на території України, підвищення рівня екологічної безпеки в зоні відчуження та посилення її бар'єрної функції доручено:

внести на розгляд Верховної Ради України у тримісячний строк проекти законів щодо:

внесення змін до законів України стосовно створення та забезпечення правового режиму зони спеціального промислового використання для спорудження та експлуатації об'єктів, призначених для поводження з відпрацьованим ядерним паливом та радіоактивними відходами;

актуалізації Загальнодержавної програми зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, затвердженої Законом України від 15 січня 2009 року № 886–VI;

опрацювати у тримісячний строк питання стосовно створення із залученням міжнародних організацій інтегрованої системи поводження з радіоактивними відходами в контексті зняття Чорнобильської АЕС з експлуатації та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему [2].

У контексті урядових намірів щодо перетворення чорнобильських територій на екологічно нейтральну територію у 2021 р. заплановано асигнування близько 1,4 млрд грн коштів державного бюджету, які охоплюватимуть фінансування зняття з експлуатації Чорнобильської атомної електростанції та перетворення об'єкту «Укриття», а також всієї зони відчуження в екологічно безпечну зону; підтримку в безпечному стані 3 енергоблоків Чорнобильської АЕС, сховища відпрацьованого ядерного палива та існуючих сховищ радіоактивних відходів; ремонт систем та обладнання, які здійснюють контроль за безпекою об'єктів.

Значних негативних наслідків завдали у квітні 2020 р. масштабні лісові пожежі на території зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. Як зазначається в огляді Національної гідрометслужби України, ці пожежі, що тривали практично протягом усього квітня, призвели до вивільнення певної кількості техногенних радіонуклідів у процесі горіння біомаси, а вітряна посушлива погода сприяла поширенню продуктів горіння на значні відстані. Щоправда, не зважаючи на це, випадків екстремально високих значень сумарної бета-активності атмосферних аерозолів та випадань у I півріччі 2020 р. не спостерігалось [3, с. 5].

Фахівці НАН України за допомогою математичного моделювання провели аналіз атмосферного поширення радіонуклідів при пожежах у зоні відчуження, що дало змогу оцінити інтенсивність викидів радіонуклідів в атмосферу, їх максимальну концентрацію [4].

Пожежна небезпека на чорнобильських територіях ще раз актуалізувала проблему їх довгострокового соціально-економічного та екологічного розвитку на основі стратегічних програмно-планових документів державного рівня з належними й регулярними обсягами бюджетного фінансування.

Схожу позицію висловлюють фахівці інституцій громадянського суспільства, професійних екологічних асоціацій, розробляючи довгострокові концептуальні документи щодо комплексного відновлення і розвитку територій зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи. При цьому, пропонуючи в якості основного сценарію відновлення

деградованих радіоактивно забруднених екосистем тотальне заповідання території, робиться висновок про те, що цей підхід не вирішує проблему пожежної безпеки лісів [5].

На нашу думку, для повернення чорнобильських територій до життя слід поєднувати заповідальний підхід з активною діяльністю щодо обстеження всієї території чорнобильської зони й повного очищення її від забруднення на основі інноваційних технологій, а також подальшим відновленням господарської, дослідницької діяльності з одночасним розвитком усієї необхідної для повноцінної життєдіяльності й туризму інфраструктури, включаючи соціальну. Таким чином, свій борг перед природою людина має повертати, діючи свідомо й ощадливо, не обмежуючись пізнанням Чорнобильської зони, а перетворюючи її для сталого розвитку, будучи озброєною всіма здобутками сучасної науки та гуманізму.

### **Список використаних джерел:**

1. Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року : Постанова Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 № 179. *Урядовий кур'єр*. 2021. 6 березня. № 45. С. 8–36.

2. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 23 березня 2021 року «Про виклики і загрози національній безпеці України в екологічній сфері та першочергові заходи щодо їх нейтралізації» : Указ Президента України № 111/2021 від 23.03.2021. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/1112021-37505>.

3. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за I півріччя 2020 року (За даними мережі спостережень Національної гідрометслужби України). URL: [http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/data/ukr-zabrud-viz-1/oglyad-stanu-zabrudnennya--pivrichchya-2020\\_-na-sayt.pdf](http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/data/ukr-zabrud-viz-1/oglyad-stanu-zabrudnennya--pivrichchya-2020_-na-sayt.pdf).

4. За підсумками року. Інтерв'ю з Президентом НАН України акад. А. Г. Загороднім. URL: <http://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=7423>.

5. Концепція комплексного відновлення і розвитку територій зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи на 2021–2070 роки. Професійна асоціація екологів України. 2021. URL: <https://ecolog-ua.com/news/konceptsiya-kompleksnogo-vidnovlennya-i-rozvytku-terytoriy-zony-vidchuzhennya-i-zony-bezumovnogo>.

## ОЧИЩЕННЯ МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОД ВІД УРАНУ З ВИКОРИСТАННЯМ СТАБІЛІЗОВАНОГО НАНОРОЗМІРНОГО НУЛЬВАЛЕНТНОГО ЗАЛІЗА

Ковальчук І. А.<sup>1,2</sup>, Корнілович Б. Ю.<sup>1,2</sup>, Тобілко В. Ю.<sup>2</sup>,  
Спасьонова Л. М.<sup>2</sup>, Бащак О. Є.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут сорбції та проблем ендоекології НАН України,  
<sup>2</sup> Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, kowalchukiryna@gmail.com

У водоочисних технологіях сорбційні методи широко застосовують на завершальних етапах доочищення вод від забруднювачів досягаючи при цьому найнижчих рівнів залишкових концентрацій екотоксикантів у водах. В останні роки сорбційні властивості нанорозмірних порошків використовують в природоохоронній практиці при вилученні неорганічних та органічних забруднювачів з поверхневих і підземних вод. Висока реакційна здатність та схильність до швидкого окислення і агрегації нанорозмірних порошків обумовлює необхідність їх стабілізації шляхом застосування поверхнево активних речовин чи нанесення на тверді матриці.

Для дослідження сорбційного очищення води від іонів урану використовували мінералізовану воду зі складом: 5280 мг/дм<sup>3</sup> загальний солевміст, 2830 мг/дм<sup>3</sup> SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 450 мг/дм<sup>3</sup> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 180 мг/дм<sup>3</sup> Cl<sup>-</sup>, 130 мг/дм<sup>3</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, рН 7,2, що відповідає складу підземної мінералізованої води поблизу сховища рідких відходів гідрометалургійної переробки уранових руд (м. Жовті Води). Композити на основі нуля валентного заліза (НВЗ) синтезували відновленням іонів Fe<sup>3+</sup> на поверхні глинистих мінералів (глуховецького каолініту, черкаського монтморилоніту та палигорськіту) боргідридом натрію NaBH<sub>4</sub> в атмосфері азоту.

Мінералізовані води характеризуються підвищеною концентрацією сульфат-іонів, тому практично весь уран зв'язаний в сульфатні комплекси в кислій області і в карбонатні комплекси в нейтральній та лужній області. Результати сорбційних експериментів свідчать про практично відсутність сорбції на природних каолініті, монтморилоніті та палигорськіті нейтральних або негативно заряджених комплексів урану. В той же час для всіх композитів на основі НВЗ властиві достатньо високі значення величин сорбції урану з мінералізованих вод: 30, 14 та 9 мг/г відповідно для монтморилоніту, палигорськіту та каолініту з нанесеним шаром НВЗ. Видалення U(VI) з мінералізованих вод композитами на основі НВЗ відбувається насамперед за рахунок обміну гідроксил-іонів гідроксидної плівки на поверхні нанорозмірних частинок заліза на сульфатні та карбонатні комплекси урану:



Крім цього можливо відновлення U(VI) до U(IV) завдяки переносу електрона з об'єму частинок НВЗ через гідроксидну плівку на їх поверхню з утворенням і осадженням набагато менш розчинних сполук.

Таким чином, висока селективність композитів на основі НВЗ по відношенню до аніонних форм урану обумовлює перспективність їх використання для сорбційного очищення мінералізованих уранвмісних вод.

## СТАТУС ВИКОНАННЯ РОБІТ З ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НБК, ПЛАНУВАННЯ РАНЬОГО ДЕМОНТАЖУ НЕСТАБІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

*Сергій Кондратенко*

*Державне спеціалізоване підприємство «Чорнобильська АЕС» м. Славутич  
Київської обл, Україна, 07101*

*kondratenko@chnpp.gov.ua*

*Сергій Поплигін*

*Державне спеціалізоване підприємство «Чорнобильська АЕС» м. Славутич  
Київської обл, Україна, 07101*

*popligin@chnpp.gov.ua*

*Сергій Свєрчков*

*Державне спеціалізоване підприємство «Чорнобильська АЕС» м. Славутич  
Київської обл, Україна, 07101*

*sverchkov@chnpp.gov.ua*

**Abstract:** The paper offers a brief description of the New Safe Confinement, the objectives of its construction, and the procedure of pilot operation of the New Safe Confinement Construction Stage 1. The purpose of the NSC CS-1 pilot operation stage is to confirm that the NSC CS-1 systems, structures and components (SSC) and the facility as a whole operate in line with the design, the defects are eliminated, and the NSC is ready for safe operation in all design modes. A brief description of the completed and scheduled testing of the main NSC systems during pilot operation is also presented. In order to obtain the NSC operation license it is necessary to develop a number of documents, including the technical guideline, and the safety analysis report of the NSC-OS complex.

Early dismantling of unstable structures is the first step of immediate operations to be done in terms of unstable structures dismantling which had to be started following the NSC commissioning and be completed by the end of 2023 (i.e. the design life of the reinforcing structures). In order to implement this project, design works are being carried out on the NSC Commissioning Stage 2 – “Infrastructure for dismantling of the unstable Shelter structures”.

**Keywords:** New Safe Confinement, pilot operation stage, early dismantling, unstable Shelter structures.

**Анотація:** У доповіді пропонується увазі стислий опис нового безпечного конфайнмента, мети його створення, порядку проведення дослідно-промислової експлуатації Пускового комплексу-1 Нового безпечного конфайнмента. Метою виконання дослідно-промислової експлуатації ПК-1 НБК є підтвердження того, що системи, конструкції і компоненти (СКК) ПК-1 НБК та об'єкт в цілому функціонують відповідно до проєкту, виявлені недоліки усунуто і НБК приведено в стан готовності до безпечної експлуатації у всіх проєктних режимах. Подається стислий опис виконаних і запланованих випробувань основних систем НБК впродовж дослідно-промислової експлуатації. Для отримання ліцензії на промислову експлуатацію НБК необхідно розробити ряд документів, включаючи

технологічний регламент, звіт з аналізу безпеки НБК, включаючи об'єкт «Укриття» (комплексу НБК-ОУ).

«Ранній» демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» є першим етапом виконання першочергових робіт з демонтажу нестабільних конструкцій, який повинен був початися після введення в експлуатацію НБК і завершитися до кінця 2023 (проектний термін служби конструкцій посилення). Для реалізації даного проєкту виконується проєктування Пускового комплексу 2 НБК «Інфраструктура для демонтажу нестабільних конструкцій ОУ».

**Ключові слова:** новий безпечний конфайнмент, дослідно-промислова експлуатація, «ранній» демонтаж, нестабільні конструкції ОУ.

### **ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПК-1 НБК**

Створення Нового Безпечного Конфайнмента (НБК) було основним завданням міжнародного «Плану здійснення заходів на об'єкті «Укриття», спрямованого на перетворення цього об'єкта в екологічно безпечну систему. НБК повинен забезпечити досягнення наступних цілей:

- забезпечення захисту персоналу, населення та навколишнього середовища від впливу джерел ядерної та радіаційної небезпеки, пов'язаних з існуванням об'єкта «Укриття»;
- створення необхідних умов для здійснення практичної діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему, в тому числі для вилучення залишків ядерного палива і ПВМ, виконання робіт щодо поводження з РАВ та демонтажу/підсилення нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття».

Будівельно-монтажні роботи здійснювалися в 2008-2019 роках відповідно до розробленої та затвердженої проєктної та проєктно-технологічної документації, узгодженої у встановленому порядку.

Пусковий комплекс 1 (ПК-1 НБК) становить собою комплекс, основними будівлями і спорудами якого є:

- арочна конструкція з підвісними конструкціями для кранового обладнання, західною та східною торцевими стінами, системами життєзабезпечення, контролю і управління;
- основи та фундаменти Арки в сервісній зоні;
- система внутрішньої і зовнішньої обшивки сталеві конструкції Арки;
- будівельні конструкції II черги ЧАЕС, що виконують функції огорожуючого контуру НБК;
- технологічна будівля;
- огорожуючі конструкції (стіни галерей обслуговування шарнірних опор, східні і західні залізобетонні стіни);
- шлюз доступу пожежних підрозділів;
- тверде ізолююче покриття відкритих ділянок ґрунту всередині НБК.

До допоміжних будівель і споруд НБК відносяться: будівля електротехнічних пристроїв, будівля насосної станції протипожежного водопостачання, майданчик для заправки вилочного навантажувача, дизельні

електростанції, північний і південний басейни збору зливових вод з покрівлі Арки, очисні споруди зливових вод, насосні станції для підкачування і перекачування зливових вод в мережу зливової каналізації.

Відповідно до вимог нормативних документів з ядерної та радіаційної безпеки («Условия и порядок выдачи отдельных письменных разрешений на виды работ или операций по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему» (НП 306.4.160-2010), 24.07.2020 ДСП ЧАЕС отримало Окремий дозвіл Держатомрегулювання на проведення дослідно-промислової експлуатації ПК-1 НБК.

Метою виконання дослідно-промислової експлуатації ПК-1 НБК є підтвердження того, що системи, конструкції і компоненти (СКК) ПК-1 НБК та об'єкт в цілому функціонують відповідно до проекту, виявлені недоліки усунуті і НБК приведений в стан готовності до безпечної експлуатації у всіх проєктних режимах.

Під час дослідно-промислової експлуатації необхідно виконати випробування всіх систем НБК для підтвердження можливості ПК-1 НБК виконувати проєктні функції в різних кліматичних (погодних) умовах (зима-весна-літо-осінь), підготувати пакет документів для отримання ліцензії на промислову експлуатацію НБК (здійснення діяльності «Переробка, зберігання радіоактивних відходів, які існують і будуть утворюватися під час перетворення об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему).

На сьогоднішній день успішно проведені випробування наступних основних систем НБК:

- система водяного пожежогасіння;
- система електропостачання, включаючи аварійне електропостачання НБК – випробування ДГ-1,2 НБК під навантаженням не менше 50% в період низьких температур навколишнього середовища (- 20°C);
- система оповіщення і зв'язку;
- система основних кранів – аномальні вібрації під час експлуатації СОК;
- система теплопостачання НБК – відмова електрокотельні ЧАЕС для подачі тепла на споживачів НБК;
- система припливної та витяжної вентиляції приміщень в зоні суворого режиму НБК;
- система поводження з РРВ;
- система господарсько-побутової каналізації.

Протягом наступного періоду дослідно-промислової експлуатації необхідно виконати випробування ще досить багатьох систем, включаючи системи, важливі для забезпечення безпечної експлуатації, зокрема:

- система вентиляції основного об'єму і кільцевого простору;
- система радіаційного контролю;
- система пінного пожежогасіння покрівлі машинного залу ОУ;
- система основних кранів та інших вантажопідйомних механізмів;
- система контролю доступу та система відеоспостереження;
- інтегрована система управління;

- система газового пожежогасіння і автоматичної пожежної сигналізації.

Завершення дослідно-промислової експлуатації та підготовка всіх документів, необхідних для отримання ліцензії, планується в кінці липня 2021.

Окрім проведення випробувань систем і обладнання НБК, для отримання ліцензії на промислову експлуатацію НБК необхідно розробити ряд документів, включаючи наступні основні документи:

- технологічний регламент безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ;
- звіт з аналізу безпеки НБК, включаючи об'єкт «Укриття» (комплексу НБК-ОУ) з урахуванням результатів дослідно-промислової експлуатації;
- межі і умови безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ;
- звіт за результатами дослідно-промислової експлуатації НБК;
- експлуатаційно-технічну документацію на експлуатацію та технічне обслуговування обладнання всіх систем НБК.

### **ДЕМОНТАЖ НЕСТАБІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»**

За результатами проведених досліджень і розрахункових оцінок, які проводилися протягом усього існування ОУ, були визначені конструкції, ймовірність і наслідки обвалення яких занадто великі – так звані нестабільні конструкції. Після проведення низки невідкладних стабілізаційних заходів виходячи з їх обсягу та проектних критеріїв термін експлуатації стабілізованих конструкцій ОУ був визначений у 15 років (до кінця 2023).

«Ранній» демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» є першим етапом виконання першочергових робіт з демонтажу нестабільних конструкцій, який повинен був початися після введення в експлуатацію НБК і завершитися до кінця 2023 (проектний термін служби конструкцій посилення).

У період лютого 2012 - липня 2014 року в рамках контракту ПОМ № SIP09-2-001 на надання послуг Інженера Клієнта Підрядником в складі ДП НДІБК, КІЕП і ІПБ АЕС були виконані роботи 1-го етапу проектування ПК-2 НБК в складі:

- передпроектні дослідження в необхідному обсязі;
- переоцінка складу нестабільних конструкцій ОУ, що підлягають «ранньому» демонтажу, з метою його оптимізації;
- аналіз концептуальних проектних рішень з «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій ОУ з урахуванням можливої реалізації двох варіантів: «інтегрованого демонтажу / поводження» (згідно з ТЕО (КП) НБК) і «демонтажу з відкладеним поводженням» (пропозиція МКГ);
- проведення порівняльного аналізу «доз-витрат-вигод» вищевказаних варіантів «раннього» демонтажу.

За результатами робіт 1-го етапу випущено схвалене ЄБРР і узгоджене Держатомрегулювання Технічне Рішення «Про обрання варіанту «раннього» демонтажу для розробки Робочого проекту ПК-2 НБК «Інфраструктура для демонтажу нестабільних конструкцій ОУ» (інв. № 4 від 29.01.2015), в якому визначено: «... прийняти до реалізації на 2-му етапі «Проектування ПК-2 НБК



- розробка робочого проекту ... » щодо «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта ОУ Варіант 1 «інтегрований демонтаж / поводження» як найбільш доцільний з економічної і технологічної точок зору з урахуванням рекомендації МКГ в частині організації «буферної зони» для забезпечення тимчасового складування / зберігання демонтованих конструкцій... ».

Слід зазначити, що у зв'язку з відсутністю фінансування, 2-й етап робочого проектування демонтажу (ПК-2) НБК в даний час не реалізований.

З огляду на відсутність необхідного обсягу фінансування на реалізацію ПК-2 НБК в повному обсязі, ДСП ЧАЕС ініціювало розробку пілотного проекту «Реконструкція об'єкта «Укриття» ДСП ЧАЕС в частині демонтажу металевої ферми підсилення південної покрівлі» (конструкція № 1 з переліку конструкцій ОУ, що підлягають «ранньому» демонтажу), забезпечивши фінансування цих робіт за рахунок власних коштів підприємства, отриманих від господарської діяльності. Роботи з демонтажу металевої ферми планувалося виконати відразу ж після введення в експлуатацію ПК-1 НБК (05.12.2019 ДАБІ видано ДСП ЧАЕС Сертифікат відповідності закінченого будівництвом об'єкта «Пусковий комплекс 1 Нового Безпечного Конфайнмента» проектній документації, що підтверджує готовність ПК-1 НБК до експлуатації) в період його дослідно-промислової експлуатації.

Для виконання робіт з демонтажу металевої ферми в 2016 році АТ «КІЕП» було розроблено проєкт «Реконструкція об'єкта «Укриття» ДСП ЧАЕС в частині демонтажу металевої ферми посилення південної покрівлі».

Метою проєкту є демонтаж металоконструкцій в умовах дослідно-промислової експлуатації НБК з перевіркою повноти та ефективності основних проєктно-конструкторських рішень, що забезпечують проведення робіт з експлуатації та перетворення об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему, а саме:

- перевірка ефективності запроєктованих систем і устаткування, що створюють умови для безпечної експлуатації НБК;
- аналіз повноти і достатності запроєктованих установок, систем, оснащення для проведення демонтажу нестабільних конструкцій ОУ;
- додаткове оснащення системи основних кранів необхідними інструментами, захватами і механізмами за необхідності.

Демонтаж металевої ферми в даному проєкті розглядається як пілотний демонтаж, з урахуванням того, що металева ферма є першим елементом в технологічній послідовності демонтажу нестабільних конструкцій, що підлягають ранньому демонтажу, демонтаж ферми не залежить від демонтажу інших нестабільних конструкцій і не вимагає попереднього розбирання будівельних конструкцій ОУ для забезпечення доступу до неї.

В даний час розроблено технічне рішення «Про коригування затвердженого Проєкту щодо реконструкції об'єкта «Укриття» ДСП ЧАЕС в частині демонтажу металевої ферми посилення південної покрівлі з метою виділення пускових комплексів» від 14.01.2021 № 2300-01-БС. У цьому технічному рішенні наголошено на необхідності виконання робіт з демонтажу металевої ферми поетапно, з виділенням двох пускових комплексів.

Окрім того, з'явилася необхідність уточнення марки і комплектації дистанційно-керованого робота-маніпулятора, який навішується на мобільну інструментальну платформу системи основних кранів НБК, щоб була можливість його використання не тільки для демонтажу металевої ферми, а й в подальшому під час проведення демонтажу нестабільних конструкцій ОУ в рамках ПК-2 НБК. Для виконання закупівлі дистанційно-керованого робота-маніпулятора типу BROKK 500 (Nuclear Arm system) в 2021 році, з метою скорочення загального терміну реалізації проєкту ПК-2 НБК, розроблено і направлено на узгодження в Держатомрегулювання «Технічну специфікацію на проєктування, виготовлення, постачання, монтаж і введення в експлуатацію обладнання для демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», яке навішується на МІП СОК НБК ДСП ЧАЕС», 01-21-ЦЕОУ (НБК).

Після поставки, монтажу, налагодження дистанційно-керованого робота-маніпулятора типу BROKK 500 і навчання персоналу у 2022 необхідно виконати пілотний демонтаж металевої ферми, що дозволить отримати практичний досвід з виконання демонтажних робіт нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», що в майбутньому буде мати позитивний вплив при виконанні робіт за проєктом другого пускового комплексу НБК в цілому.

## **ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЖЧУЖЕННЯ. ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРШЕННЯ**

*Корнева Ольга Андріївна, Київський національний економічний університет ім.  
Вадима Гетьмана, м Київ, obyakorneva09@gmail.com*

The ecological and radiation conditions of the Chornobyl Exclusion Zone and the

threat of its deterioration are analyzed. It has been determined that the greatest ecological and radiation threat to the environment is posed by potentially dangerous objects located in the Chornobyl Exclusion Zone, especially such objects as «the Shelter» and the Spent Fuel Storage Facility, where an accident involving the release of radioactive substances is possible. It is noted that one of the main tasks is an early detection of the causes of forest fires, minimization of their consequences and ensuring radiation protection of the population from the negative effects of radioactive clouds.

It is proposed solution for ecological and radiation problems that were detected.

Метою цієї доповіді є огляд екологічної безпеки чорнобильської зони віджчуження.

Чорнобильська катастрофа явила собою масштабну, унікальну аварію в історії людства зі своїми занадто негативними наслідками, відсутністю досвіду їх подолання, різноманітністю об'єктів ураження тощо. Не дивлячись на те, що з моменту цієї катастрофи минуло вже 35 років, її наслідки будуть ще довго нагадувати про себе своїм негативним впливом на довкілля. У післяаварійний період (10–15 років) було написано дуже багато наукових праць різного характеру, присвячених Чорнобильській катастрофі і, зокрема, її екологічній складовій. Потім інтерес до Чорнобильської тематики дещо спав та імпульсивно проявлявся після взаємопов'язаних надзвичайних подій, таких як аварії і пожежі на об'єкті «Укриття» (далі – ОУ), масштабні пожежі у Чорнобильській зоні віджчуження (далі – ЧЗВ), аварія на АЕС «Фукусіма» тощо. Після Чорнобильської катастрофи було проведено чимало досліджень щодо вторинної небезпеки радіоактивних аерозолів під час пожеж в лісах, забруднених техногенними радіонуклідами. Досі тривають дискусії щодо визначальних параметрів надходження радіоактивних продуктів згоряння (далі – РПЗ) у довкілля під час лісових пожеж на території ЧЗВ. Отже дослідження тривають, оскільки наразі немає гарантованих даних, що однозначно визначають процеси надходження різних радіонуклідів в атмосферу під час лісових пожеж.

Тому дуже актуальною залишається проблема комплексного аналізу і оцінки впливу техноприродних загроз на рівень екологічної безпеки ЧЗВ, вирішення якої дасть змогу підвищити ефективність системи екологічного управління зазначеної території.

Після катастрофи на ЧАЕС у 1986 році площа радіоактивного забруднення склала 53,5 тис. км<sup>2</sup> (9% всієї території України), що охоплює 73 райони у 12

областях. На цій території розміщено 2293 населених пунктів, в яких проживає 2 315 900 людей (5% населення країни), в тому числі 499 500 дітей. Хвойні посадки займають 42% загальної площі, зокрема соснові – 33%. Частина твердолистяних насаджень становить 40%, зокрема дуби і вільха – 32%. Запас деревини в лісах оцінюється в 1,8 млрд кубометрів. Найбільші площі лісів, забруднених радіоактивними продуктами Чорнобильської аварії, знаходяться в Житомирській (974,3 тис. га), Рівненській (728,8 тис. га), Чернігівській (725,5 тис. га) та Київській (416,4 тис. га) областях. У Черкаській, Вінницькій, Волинській, Сумській та Хмельницькій областях площа лісів, забруднених  $^{137}\text{Cs}$ , становила (10–20)% від загальної площі лісового фону.

На територію 30-и кілометрової зони ЧАЕС у вигляді радіоактивних опадів випало, приблизно  $5 \cdot 10^{15}$  Бк, з них  $3 \cdot 10^{13}$  Бк припадає на трансуранові елементи. Найбільша густина забруднення ґрунту для  $^{137}\text{Cs}$  сягає понад  $8 \cdot 10^{12}$  Бк/км<sup>2</sup>, для  $^{90}\text{Sr}$  –  $7 \cdot 10^{12}$  Бк/км<sup>2</sup>, плутонію –  $3 \cdot 10^{10}$  Бк/км<sup>2</sup>.

Інтенсивність міграційних процесів радіонуклідів у лісних масивах визначається комплексом біоценотичних та біогеохімічних факторів, таких як процес сорбції і десорбції, переміщення з поверхневим і внутрішньогрунтовым складом, біогенне перемішування, вплив складу рослинності, а також дифузія, дефляція та конвективний перенос. Аналіз розподілу радіонуклідів за профілем ґрунтів у сухих та свіжих лісорослинних умовах показав, що їх вміст у поверхневому горизонті лісової підстилки (AoL) незначний: запас  $^{137}\text{Cs}$  становить біля 1%  $^{90}\text{Sr}$  – 0,4,  $^{239+240}\text{Pu}$  – 0,8 від загального складу в ґрунті. Основна частина ізоотопів плутонію утримується ферментативним і гумусовим шарами підстилки. Їх наявність у листовому горизонті (AoL) обумовлена опаданням мертвої кори, якою вони адсорбувались. В цілому, у підстилці соснових насаджень знаходиться (50–90)% сумарного запасу радіоцезію, (40–75)% радіостронцію і до 99% ізоотопів плутонію. Отже, радіоактивність приземного шару атмосфери в основному визначається процесами вторинного підйому та перенесення радіоактивних частинок, що випали на поверхню землі. Пожежі в лісах, забруднених техногенними радіонуклідами, поряд з дефляційними процесами й антропогенними факторами, сприяють підвищенню радіаційного забруднення як приземного шару повітря в районах пожеж, так і атмосфери в цілому. В атмосферу може бути викинуто десятки тон РПЗ. Середній радіонуклідний склад димових частинок склав у %:  $^{134}\text{Cs}$  – 5,3,  $^{137}\text{Cs}$  – 54,1,  $^{90}\text{Sr}$  – 30,8,  $^{239+240}\text{Pu}$  – 0,4. Тривалість життя радіоактивної димової хмари у нижній тропосфері (до 1,5 км) менше тижня, у верхній тропосфері – місяць, у стратосфері – 1–3 роки.

Підраховано, що в середньому за рік в Україні виникає близько 3,5 тис. лісових пожеж, якими знищується більше 5 тис. га лісу. За минулі роки після Чорнобильської катастрофи у ЧЗВ виникло більше 40 великомасштабних лісових пожеж, а площа лісових масивів, що пройдена пожежею, перевищила 15 тис. га. Найбільша кількість лісових пожеж (65%) стається весною, 25% – восени і 10% – літом. Середні значення розподілу лісових пожеж складають: низові – 55%, верхові – 30%, перехідні і підземні – 15%. Основними

причинами виникнення пожеж на території ЧЗВ є навмисний підпал (47%) і необережне поводження з вогнем (26%). Кількість лісових пожеж на забруднених  $^{137}\text{Cs}$  територіях з рівнем радіоактивного забруднення менше 5  $\text{Кі}/\text{км}^2$  склала 68%, від 15 до 40  $\text{Кі}/\text{км}^2$  – 23%, и 9% на території з рівнем радіоактивного забруднення більше 100  $\text{Кі}/\text{км}^2$ .

Натуральні дослідження, що проводились у польових умовах у ЧЗВ на різних відстанях (7 та 15 км) від центру лісової пожежі можна розглянути більш детально на рисунках. На рис.1 наведено зовнішній вигляд димових частинок у повітрі, що були відібрані на різних віддальх від місця лісової пожежі, а на рис. 2 – їх розподіл за діаметром. На рис. 3 наведено зміни вмісту концентрації диму в атмосферному повітрі в усіх фазах лісової пожежі, а на рис. 4 розподіл об'ємної активності (концентрації) радіонуклідів у повітрі для різних фаз розвитку лісової пожежі. З даних наведених на рис. 4 видно, що об'ємна активність РПЗ в основному обумовлена  $^{137}\text{Cs}$ , що складає 82% загальної активності,  $^{90}\text{Sr}$  – 7%, а трансуранові елементи –  $<1,0\%$ . На рис. 5 наведено дані про кількість  $^{137}\text{Cs}$ , що виділився у повітря за повного згоряння в печі 1 кг лісового горючого матеріалу взятого в районі «Рудого лісу» і біля сіл Лельов і Сахани.

Отже, на основі проведених експериментальних досліджень в натуральних (польових) умовах в ЧЗВ було вивчено закономірності поведінки лісових горючих матеріалів (далі – ЛГМ) та розповсюдження РПЗ під час вогневих випробувань, що дало можливість провести тестування моделей процесів виникнення і розвитку лісової пожежі, міграції РПЗ в атмосферному повітрі та оцінки радіоекологічних наслідків. Такий аналіз і оцінка впливу техноприродних загроз на рівень екологічної безпеки ЧЗВ, вирішення якої дасть змогу підвищити ефективність системи екологічного управління зазначеної території.

Для вирішення екологічної безпеки ЧЗВ також дуже важливо розробити системи моніторингу і менеджменту. Тому розроблено концепцію побудови технічної системи екологічного моніторингу ЧЗВ на основі НВЧ радіометра, що зможе забезпечити раннє виявлення небезпечних подій і ситуацій на території, що контролюється, та вчасно проводити превентивні заходи.

Запропонована система виявлення та сигналізації про лісові пожежі призначена для дистанційного контролю параметрів пожежної, радіаційної та метеорологічної обстановки; прогнозу та забезпечення можливості швидкого реагування і регулювання пожежонебезпечної та радіаційної обстановки; видачі рекомендацій з локалізації та ліквідації пожеж. В організаційно-технічному плані система побудована за принципом розподіленого багаторівневого інформаційно-вимірювального комплексу, що функціонує в реальному масштабі часу. На відміну від відомих засобів дистанційного контролю (телевізійні, інфрачервоні та ін.), НВЧ радіометр дозволяє отримувати інформацію про пожежонебезпечну обстановку незалежно від погодних умов, часу доби, умов освітленості, орієнтації та потужності димового шлейфу, а також визначати положення кромки, що горить, і протяжності активної зони горіння.

Система складаються з трьох рознесених у просторі пунктів: одного центрального і два винесених, розташовані у вершинах рівностороннього трикутника із стороною 10 км. Архітектура центрального пункту системи має 3-рівневу структуру. Нижній рівень побудований на основі контролерів, що виконують функції збору й обробки інформації. Система ділиться офісну і технологічну.

Одним з найбільш важливих заходів є необхідність створення вітчизняної мобільної лабораторії для комплексної оцінки та прогнозування надзвичайних ситуацій для забезпечення оперативного контролю радіаційного і радіологічного стану довкілля. 1

Основним завданням таких МЛК є оперативний контроль радіаційної обстановки та контроль рівнів радіоактивного забруднення в атмосферному повітрі, ґрунті, воді, продуктах харчування, кормах тощо.

Базовий варіант МЛК повинен включати наступні основні підсистеми 1) комплексного наземного радіаційного контролю; 2) експресного наземного радіологічного контролю; 3) дистанційного комплексного повітряного (якісного і кількісного) контролю параметрів радіаційного та хімічного забруднення навколишнього середовища з урахуванням впливу метеопараметрів; 4) контактного контролю і виміру радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища; 5) супутникової навігації; 6) оперативного зв'язку; 7) бортовий обчислювальний комплекс.

Важливе значення має система менеджменту еколого-радіаційних небезпек ЧЗВ, що дає змогу забезпечити інформаційно-технічну підтримку ступеня обґрунтованості прийняття управлінських рішень в критичних ситуаціях.

### **Список використаних джерел:**

1. <https://atom.org.ua/?p=151>
2. <https://eco-live.com.ua/content/ekolog%D1%96chn%D1%96-nasl%D1%96dki-katastrofi-na-chaes>
3. <https://ua.boell.org/uk/2011/02/07/biotichni-naslidki-chornobilskoyi-katastrofi>
4. Азаров С. І., Сидоренко В. Л., Серета Ю. П. Оцінка можливого токсичного ураження при гасінні пожеж у Чорнобильській Зоні відчуження. Проблеми техногенної безпеки в Україні та світі (до 30-ї річниці аварії на Чорнобильській АЕС): зб. наук. праць міжнар. наук.-прак. конф. (Запоріжжя, 1 березня 2016 р.). Запоріжжя, 2016. С. 13 – 20
5. <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/ekologo-tekhnogenni-problemi-v-ukraini-scho-potrebuyut>
6. [http://ir.nusta.edu.ua/jspui/bitstream/doc/1135/1/1074\\_IR.pdf](http://ir.nusta.edu.ua/jspui/bitstream/doc/1135/1/1074_IR.pdf)
7. Сидоренко В. Л., Серета Ю. П., Азаров И. С. Применение авиационной системы для патрулирования и мониторинга лесных пожаров в Чернобыльской зоне. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы: сб. матер. II Междунар. заоч. науч.-прак. конф. (Беларусь, Минск, 28 июня 2018 г.). Минск, 2018. С. 151 – 155.
8. <https://nubip.edu.ua/node/46878>

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ПОЛІМЕРНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПРИГНІЧЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ АЕРОЗОЛІВ В КОМПЛЕКСІ НБК-ОУ

*Краснов В. О., Носовський А. В., Павлюченко М. І.  
ІПБ АЕС НАН України*

Після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р, одним з першочергових було питання локалізації радіоактивних речовин, а саме запобігання поширенню радіоактивних речовин в навколишнє середовище. Нанесення локалізуючих захисних полімерних покриттів на промисловому майданчику почалися з травня 1986 р. [1].

Дослідженнями було встановлено, що основний вклад у радіоактивне забруднення повітряного середовища і прилеглої території дає винос радіоактивних аерозолів з «розвалу» 4-го блока, а основним чинником виносу є ежекторний ефект, який виникає при обтіканні аварійного блока пануючим північно-західним вітром. Локалізація цього джерела стала одним із основних завдань ліквідації аварії. Локалізація викидів із зруйнованого реактора здійснювалась сухими та рідкими матеріалами, які були скинуті у «розвал» реактора та оцінка їх ефективності [1, 2, 3, 4].

Після зведення захисної споруди - об'єкт «Укриття» (ОУ) були проведені роботи по спорудженню стаціонарної установки пилопригнічення (СПП), яка призначалася для нанесення пилопригнічуючих сумішей на поверхню «розвалу» 4-го блоку Чорнобильської АЕС. Робота СПП розпочалася в кінці 1989 р. Нанесення захисного покриття виконувалось щорічно шляхом зрошування пилопригнічуючих сумішей із спеціальних форсунок, які встановлені через люки в легкій покрівлі і проходки в трубному накаті в підпокрівельний простір (ПП) ОУ.

Але поза полем дії форсунок залишалось більше половини поверхні ПП ОУ. Тому було прийнято рішення про модернізацію існуючої системи пилопригнічення (МСПП). Пуско-налагоджувальні роботи і випробування МСПП були завершені у кінці грудня 2003 р. В 2005 р. завершена дослідно - промислова експлуатація, а в 2006 р. МСПП введена в промислову експлуатацію [5-9].

На початок 2015 р., за результатами досліджень було встановлено, що значення контрольованих параметрів знаходяться значно нижче значень експлуатаційних меж більш ніж на 1-2 порядки, а захисне полімерне покриття для характерних матеріалів ПП ОУ, таких як бетон, метал, пластикат має товщину плівки від 20 мкм до 600 мкм і в подальшому не збільшується [10]. Тому високі темпи нарощування плівки щорічно в три цикли пилопригнічення трьома колекторами були досить надлишковими.

В зв'язку з цим гостро постало питання щодо оптимізації роботи МСПП – зменшення кількості локалізуючої суміші при умові збереження стану плівкового покриття і запобігання його руйнування.

В 2015 р. ІПБ АЕС НАНУ було розроблено стандарт підприємства СТП 3.031.-2015 [11], який поширюється на проведення досліджень з оцінки стану захисного полімерного покриття в підпокрівельному просторі ОУ ЧАЕС для оцінки його захисних (експлуатаційних) властивостей.

Стандарт встановлює правила щодо:

- збирання, вивчення та аналізу інформації по дослідженню динаміки концентрації та випадіння радіоактивних аерозолів (РА) в підпокрівельному просторі ОУ і навколо нього;

- збирання, вивчення та аналізу даних по  $\alpha$ ,  $\beta$  - поверхневому забрудненню полімерного покриття в контрольних точках;

- відбору зразків-свідків полімерного покриття в підпокрівельному просторі ОУ;

- лабораторних досліджень товщини захисного полімерного покриття та оцінки його фізико-механічних характеристик і захисних властивостей;

- комплексного аналізу даних та короткотермінового прогнозу (не менш ніж на 1 рік) динаміки зміни концентрації радіоактивних аерозолів у повітрі та поверхневого забруднення полімерного покриття у підпокрівельному просторі ОУ, складання звіту;

- періодичності оцінки стану захисного полімерного покриття в підпокрівельному просторі об'єкту «Укриття».

У відповідності з СТП, починаючи з 2015 р. і по цей час, щорічно проводяться роботи з оцінки стану захисного полімерного покриття в підпокрівельному просторі ОУ і по результатам досліджень видаються рекомендації про терміни проведення зрошування захисним покриттям міжконтрофорсних поверхонь та поверхонь «розвалу» підпокрівельного простору ОУ. Виявлення процесів руйнування захисного покриття визначається за рівнем підвищення активності радіоактивних аерозолів всередині та зовні ОУ за рахунок процесів дефляції.

Надалі, при частковому розбиранні нестабільних конструкцій ОУ передбачається, що МСПП буде демонтована, а її функції перейдуть до мобільної системи пилопригнічення [12].

### **Список використаних джерел:**

1. Мамаев Л. А., Галкин Г. А., Храбров С. Л., и др. Локализация радионуклидов на территории ЧАЭС // Чернобыль'88: Доклады I Всесоюзного научно-технического совещания по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС / Под ред. Е. И. Игнатенко. Т.7 Локализация последствий аварии на блоке № 4, промплощадке Чернобыльской АЭС и прилегающих территориях ч. I. Чернобыль, 1989.- С. 226 - 235.

2. Огородников Б. И. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986 – 2006 гг.: монография /Б. И. Огородников, Э. М. Пазухин, А. А. Ключников; НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. – Чернобыль (Киев. обл.): Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. – 456 с.

3. Отчет о состоянии безопасности объекта «Укрытие». SIP-P-PM-22-460-SAR-124-01. 28.11.2006.



4. Самойленко Ю. Н., Черноученко В. М. Применение полимерных покрытий для улучшения радиационной обстановки при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС // Чернобыль`88. Доклады I Всесоюзного научно-технического совещания по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС / Под общей редакцией д.т.н. Е. И. Игнатенко. Т.7 Локализация последствий аварии на блоке № 4, промплощадке Чернобыльской АЭС и прилегающих территориях ч. II. Чернобыль, 1989.- С. 152 - 184.

5. Богатов С. А., Евстратенко А. С., Симановская И. Я. Повышение безопасности объекта «Укрытие» путем расширения системы пылеподавления // МНТЦ «Укрытие» НАН Украины – Сборник Проблемы Чернобиля. Чернобыль – 2001.- Вип. 8. – С. 35 - 38.

6. Рабочий проект МСПП // SIP 05-4-008-279-016-ПЗ, SIP UKN 01 10GEN 02 043.

7. Программа проведения пуско-наладочных работ и испытаний системы пылеподавления объекта “Укрытие” ГСП ЧАЭС после её модернизации по контракту SIP-05-4-008 (Д4) // ДП ПНУ ОАО «ЮТЭМ»: SIP UPN 05 10 TRP 00 001. 2003 г. - 16с.

8. Дополнения к «Программе проведения пуско-наладочных работ и исследований системы пылеподавления объекта «Укрытие» ГСП ЧАЭС после её модернизации по контракту SIP-05-4-008 (Д4)

9. Руководство по приготовлению рабочих составов марок АК-510 и АК-511. Контракт № SIP05-4-011. SIP AOS2 04 2 MSP 00 01. Славутич, 2005.

10. Протокол робочої наради з питань виконання пилопригнічення на об'єкті «Укриття» Чорнобильської АЕС від 23.12.2014р. м.Київ.

11. СТП 3.031-2015 «Оцінка стану захисного полімерного покриття в підпокрівельному просторі об'єкту «Укриття»». Славутич, 2015. 11 с.

12. Супровід введення МСПП в експлуатацію. Матеріали з оцінки безпеки МСПП. SIP AOS2 10 4 SMT 00.02. 2006 року - SIP. Support of MSPP commissioning. Materials on MSPP safety assessment. SIP AOS2 10 4 SMT 00 02. 2006

## **ПРОГРАМА МОНІТОРИНГУ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ І ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДО ПОЧАТКУ РОБІТ З ДЕМОНТАЖУ НЕСТАБІЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»**

*Краснов В. О., Носовський А. В., Павлюченко М. І.  
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль,  
07270, Україна*

*С. О. Кондратенко, С. Ф. Сверчков  
Державне спеціалізоване підприємство «Чорнобильська АЕС»*

У рамках науково-дослідної роботи за темою: «Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК-ОУ (аспекти ядерної та радіаційної безпеки)» в 2018 р. спеціалістами ІПБ АЕС відповідно до «Вихідних вимог ...» Державного спеціалізованого підприємства «Чорнобильська АЕС» (ДСП ЧАЕС) розроблена «Програма моніторингу паливовмісних матеріалів (ПВМ) ОУ (ядерна та радіаційна безпека ОУ)» (далі – «Програма ...»). Структурна схема «Програми ...» представлена нижче на рисунку.

Необхідність вивчення питання моніторингу поведінки і контролю ПВМ на весь період знаходження їх в ОУ визначена документом «Стратегія вилучення ПВМ та поводження з РАВ» 2000 р. Система моніторингу поведінки паливовмісних матеріалів (ПВМ) разом з системою контролю ядерної безпеки інтегрованої автоматизованої системи контролю (ІАСК) повинна забезпечувати дані для:

- оцінки стану ПВМ з метою визначення необхідності виконання превентивних заходів, спрямованих на зниження небезпеки розповсюдження радіоактивності;

- достовірного прогнозування довгострокової поведінки ПВМ (яке потрібне для розробки та прийняття остаточного рішення щодо стратегії вилучення ПВМ).

Установлена в проектне положення Арка нового безпечного конфайнмента (НБК-ОУ) над об'єктом «Укриття» (далі – об'єкт) призвела до змін надходження води (за рахунок атмосферних опадів), вентиляції приміщень, режиму температури та вологості в об'єкті. Указане може вплинути на швидкість деградації ПВМ і, відповідно, на ядерну і радіаційну безпеку (ЯБ і РБ) об'єкта.

На даний час повних достовірних даних про те, як зміна режиму температури і вологості після насування Арки НБК впливає на швидкість деградації ПВМ, не існує. Якість, обсяги і повнота даних про ПВМ об'єкта (хімічні, радіохімічні, фізико-механічні властивості, деградацію) та їх стійкість до руйнування є недостатньо вивченими, що не дає змоги для прогнозування їх поведінки з плином в часі.

Моніторинг ПВМ дозволить отримувати інформацію про негативні тенденції поведінки ПВМ, які погіршують ядерну і радіаційну обстановку і проводити превентивні заходи для зниження ризику від несприятливих наслідків погіршення стану ПВМ.

**ПРОГРАМА МОНІТОРИНГУ ПАЛИВОВІСНІСНИХ МАТЕРІАЛІВ ОУ  
(ЯДЕРНА ТА РАДІАЦІЙНА БЕЗПЕКА ОУ)**

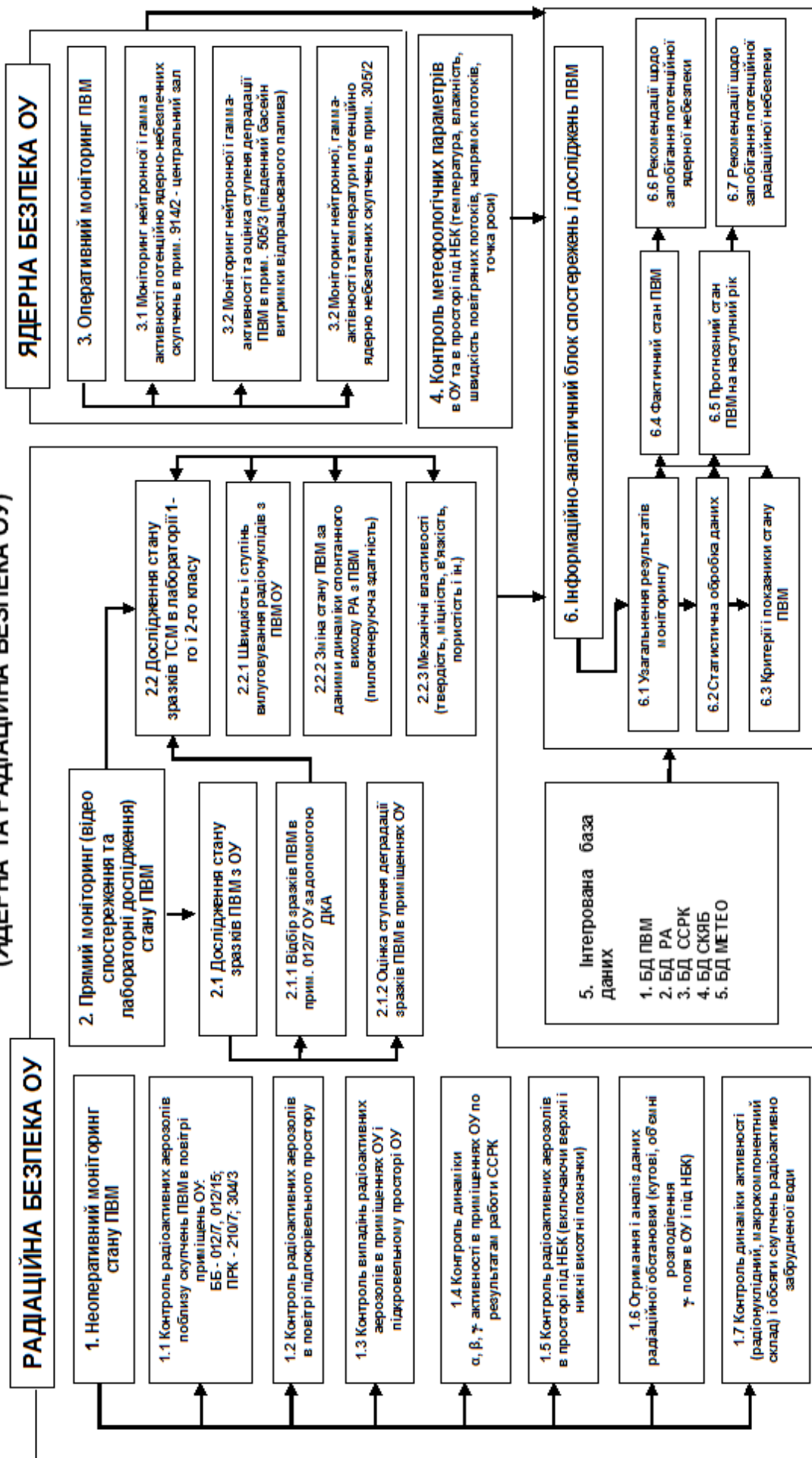


Рис. Структурна схема моніторингу паливовіснїсних матеріалів об'єкта «Укриття»

Отримані дані в ході моніторингу ПВМ мають важливе практичне значення, як для обґрунтування безпеки робіт персоналу, що задіяний в роботах по експлуатації НБК, так і для персоналу, який буде в найближчому майбутньому здійснювати роботи з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта Укриття. Розуміння цих факторів дозволить обґрунтовано вибрати найбільш оптимальні та безпечні технології демонтажу, найбільш оптимальні засоби захисту органів дихання та вибрати безпечні режими роботи персоналу.

Пройшло більше 2-х років з початку затвердження та погодження «Програми ...», проте на даний час проводяться деякі роботи щодо необхідного оперативного контролю. Роботи, що безпосередньо пов'язані з моніторингом ПВМ не розпочиналися через відсутність фінансування.

Автори вважають необхідним ініціювати початок робіт в 2021 році з реалізації «Програми ...» з продовженням робіт з моніторингу ПВМ в наступних роках.

#### **Список використаних джерел:**

1. Програма науково-технічного супроводу на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК-ОУ. Затверджено: Директор-технічний (головний інженер) А. О. Білик. 20.12.2016.

2. Програма моніторингу паливовмісних матеріалів (ПВМ) ОУ (ядерна та радіаційна безпека ОУ). Затверджено на засіданні НТР Чорнобильської АЕС 06.09.2018. Погоджено: ДІЯРУ. Лист вих. № 24-15/8580 від 11.07.2019.

## АНАЛІЗ І КЕРУВАННЯ НИЗЬКИМ ВИКИДОМ ПОВІТРЯ ІЗ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА В ОТОЧУЮЧЕ СЕРЕДОВИЩЕ

*Круковський Павло\*, Склярєнко Дмитро\*, Дядюшко Євгеній\*,  
Кондратенко Сергій\*\*, Кузьменко Володимир\*\**  
*Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, вул. Марії Канніст, 2а,  
Ел. адреса: kruk\_2@ukr.net*  
*\*\*ДСП Чорнобильська АЕС м. Славутич Київської області, Україна 07101,  
Ел. адреса: kondratenko@chnpp.gov.ua*

**Annotation.** The article presents the results of the continuation of the previous work [1] when using the model of the hydraulic state of the NSC, developed by the Institute of Technical Thermophysics for the analysis and control of unorganized air exchange of the main volume of the NSC with the environment according to the data of a new portion of operational measurements No. 4 for the time period 1.11–1.12.2020. The results of the previous work [1] included a description of the developed model and the results of analysis and control of the unorganized air exchange of the NSC into the environment using the old portion of measurements No. 2 for the period from 17.01-14.02.2020. The model made it possible to determine the area of leaks and for the first time show the continuous dynamics of changes in the consumption of fugitive air (low emission) from the main volume of the NSC for the specified period at an arbitrary direction and speed of the wind.

The use of a new sample of NSC operational parameters (pressure drops, ventilation system costs, wind direction and speed) made it possible to validate the developed model with respect to previously found leakage areas. The model was applied for optimal air control in places of air leaks under the western and eastern walls of the NSC into the environment at arbitrary directions and speeds and wind. The results of applying the model also showed the possibility of achieving a certain energy efficiency of the ventilation system of the main volume of the NSC.

Для забезпечення безпеки персоналу, населення та навколишнього середовища Новий Безпечний Конфайнмент (НБК) Чорнобильської АЕС має зовнішню і внутрішню оболонки, які не є повністю герметичними. Не повністю герметичними є також місця ущільнення під західною та східною стінами НБК і поверхнями будівельних конструкції, а також самі будівельні конструкції під цими стінами.

Оскільки в кільцевому просторі (КП) НБК підтримується надлишковий тиск (близько 20 Па), а в основному об'ємі (ОО) негативний тиск (близько -10 Па), то через зовнішню і внутрішню оболонки, а також скрізь зазори в стінах та будівельних конструкціях, які мають місце протікання (протічки) повітря всередину і за певних умов назовні НБК, які необхідно контролювати якомога точніше

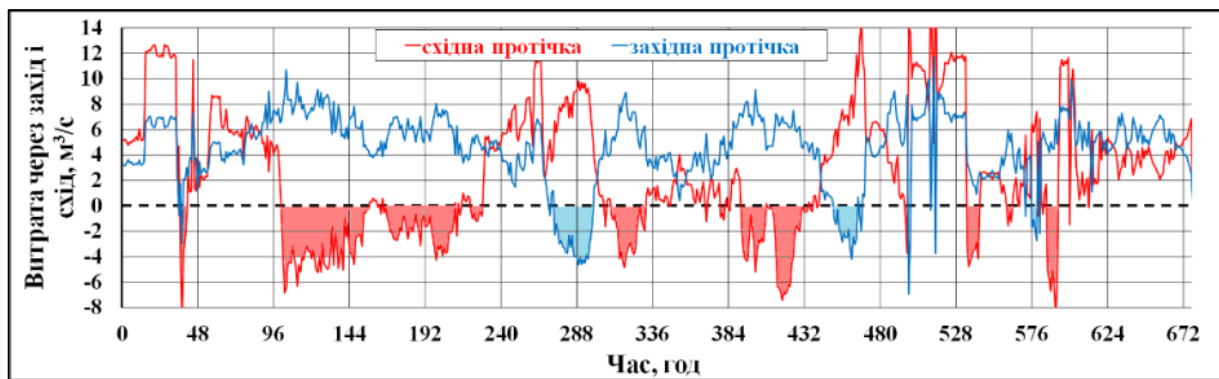
Витрати організованих потоків повітря (високі викиди) вимірюються, фільтруються і регулюються, в той час як неорганізовані потоки (низькі викиди), які становлять небезпеку для оточуючого середовища, не вимірюються, не фільтруються і слабо регулюються. В НБК є ряд приладів вимірювання перепадів тиску між внутрішніми об'ємами і оточуючим

середовищем для контролю і підтримки необхідних тисків в КП і ОО, але немає приладів для контролю низьких викидів повітря крізь західні і східні протічки за межі НБК.

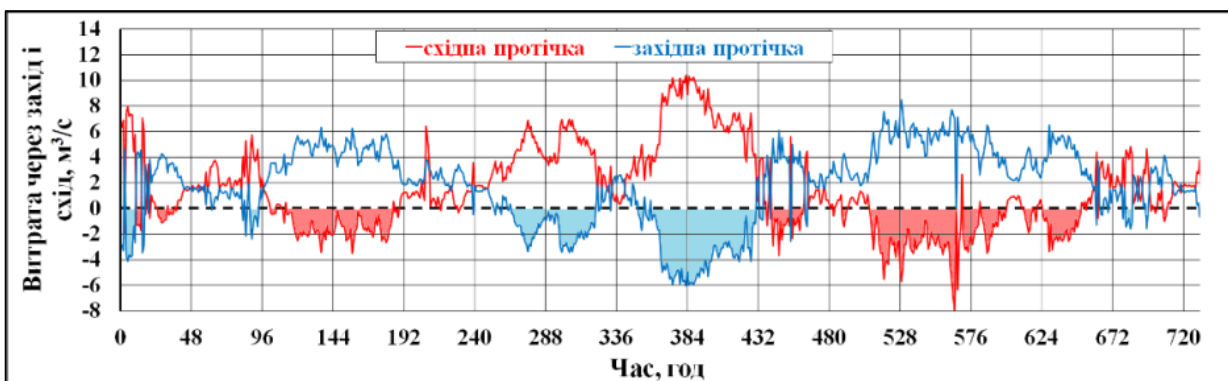
В роботі [1] описана комп'ютерна модель гідравлічного стану НБК, яка за допомогою експлуатаційних вимірювань перепадів тиску і витрат вентиляційних установок дозволяє безперервно визначати витрати повітря як в середину, так і за межі НБК при довільних напрямках і швидкостях повітря, яке обтікає НБК. Модель пройшла попередню апробацію за даними 677-и почасових вимірювань тисків і витрат вентиляційних установок на протязі місяця (вибірка №2) і дозволила розрахувати як умовні площі протічок повітря під західній і східній стінами НБК, так і безперервні (через кожен годину) витрати повітря через місця цих протічок [1].

**Метою роботи є валідація розробленої моделі гідравлічного стану НБК і подальше її застосування для аналізу і керування низьким викидом повітря із основного об'єму в оточуюче середовище через місця протічок для нової вибірки вимірювань експлуатаційних параметрів НБК з 1.11.2020 р. по 1.12.2020 р. (вибірка №4).**

Валідація розробленої моделі [1] з використанням вибірки №4 за критерієм середньоквадратичного відхилення розрахункових (модельних) перепадів тисків КП-ОО від вимірних підтвердила її адекватність гідравлічному стану НБК і вона була застосована для аналізу і керування низьким викидом повітря із основного об'єму в оточуюче середовище. На рис.1 показані залежності витрат повітря через західну і східну протічки від часу для попередньої вибірки №2 [1], і для нової вибірки №4.



а



б

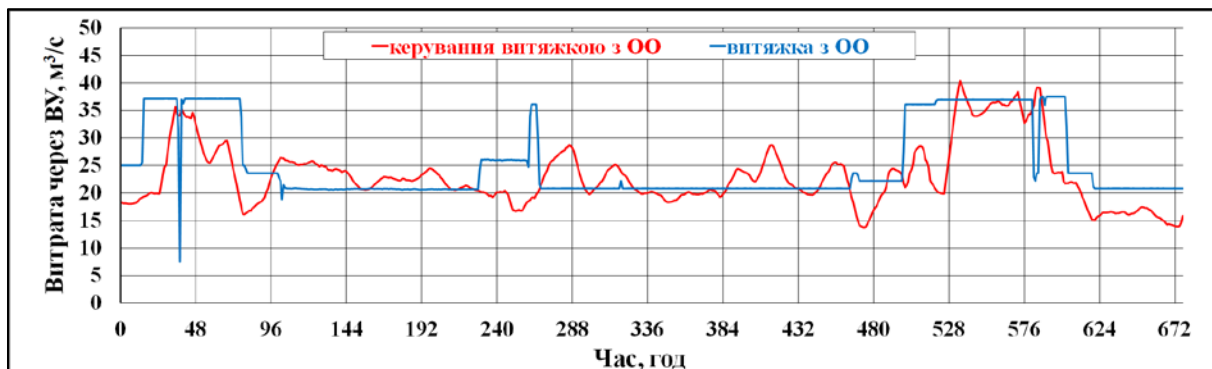
Рис. 1 - Залежності витрат повітря через західну і східну протічку (рис. а, б) від часу, - рис. а - для вибірки №2, б - для вибірки №4.

На рисунку витрати повітря, що лежать нижче нуля і заповнені відповідним кольором, показують викиди повітря за межі НБК. Сумарні витрати протічок повітря в оточуюче середовище із ОО за межі НБК у вибірках №4 і №2 та становлять 3,29 та 2,67 млн. м<sup>3</sup>/вибірку відповідно.

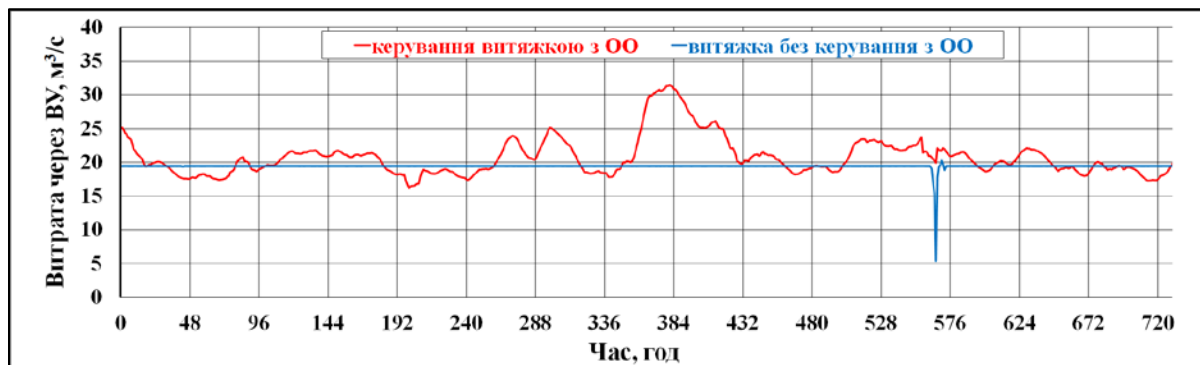
### Управління повітрообміном НБК. Енергоефективність системи вентиляції НБК

Головним шляхом зменшення і запобігання витоку неорганізованих потоків повітря з ОО в ОС через нещільності під стінами НБК є шлях оптимального керування витратами ВУ з ОО і можливо ВУ в КП. Розроблена модель дозволяє реалізувати таке керування, що показано нижче на рис. 2.

На рис.2 представлені результати роботи алгоритму автоматичного вибору значень витрати витяжної системи вентиляції ОО НБК для підтримання мінімальної витрати витяжної ВУ, при якій могли бути відсутні викиди повітря назовні (червона крива) і для порівняння крива без оптимального керування (синя крива), для вибірки №2 та №4.



а



б

Рис. 2 - Значення витрати витяжної системи вентиляції ОО НБК від часу: рис. а - для вибірки №2, б - для вибірки №4.

Алгоритм керування роботи ВУ ОО полягає в тому, що для кожного виміру вибірки даних автоматично виконує підбір такої мінімальної витрати витяжної ВУ, при якій будуть відсутні викиди повітря назовні через західні і східні місця протічок під стінами НБК. Якщо витрати витяжної ВУ стали максимальними, то зменшується витрата ВУ, що нагнітає повітря в ОО. Якщо витрати витяжної ВУ є максимальними і витрата ВУ, що нагнітає повітря в ОО, стала нульова, то може зменшуватись витрата ВУ, що нагнітає повітря в КП.

Підтримання мінімальної витрати витяжної ВУ, при якій будуть відсутні викиди повітря назовні через низький викид дозволяє також підвищувати енергоефективність ВУ в НБК.

Для прикладу, виключення низького викиду повітря (замальовані площі на рис.1) необхідно застосувати оптимальне керування витрати витяжної вентиляції ОО (сині криві на рис.2) замість застосованого на протязі обох вибірок керування (червоні криві на рис.2).

Таким чином, в результаті застосування розробленої моделі і алгоритму оптимального керування вентиляцією НБК для обох вибірок експлуатаційних даних дозволяє створювати такий гідравлічний стан НБК, при якому через місце протічок повітря під західною і східною стінами НБК з оточуючого середовища в ОО заходить витрата, але нічого не виходить. Також, модель може розраховувати не тільки інтегральне, а й тижневе, добове і погодинне радіаційне навантаження на оточуюче середовище в різних напрямках і силі вітру за умови постійного надходження від ЧАЕС в модель даних гідравлічного стану НБК та об'ємної концентрації радіоактивного аерозолі із ОУ в ОО НБК.

#### **Список використаних джерел:**

1. Круковський П. Г, Склярєнко 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.



## УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ ОПИСУ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНОЇ ТЕРИТОРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ МОЖЛИВИХ НАПРЯМКІВ

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

<sup>1</sup> *Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля,  
м. Северодонецьк, Україна,*

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

З використанням методу можливих напрямків Дж. Зойтендейка [1] була розроблена комп'ютерна програма «Випадкова точка», завдяки якій вирішується задача опису обмеженої за площею радіоактивно забрудненої території, яка полягає в способі пошуку рішень, на проміжку визначеному дослідником, неперервної обмеженої функції  $f(x)$ . В процесі реалізації способу відбувається знаходження деякої кусково-поліноміальної функції  $P(x) \in C_1(a,b)$ , яка найкращим чином наближує  $f(x)$  за підходом Чебишова [2]. Це дозволяє за допомогою зазначеної програми описати радіоактивно забруднену територію за точками, які визначені за підвищеною або зниженою концентрацією радіонуклідів.

Для реалізації задачі був створений масив інформації з вибіркою даних за 10 років, який найбільш повно характеризував територію, забруднену радіоізотопом водню – тритієм ( $^3\text{H}$ ). Враховуючи те, що водень є одним з найпоширеніших елементів, а рух радіоізоотопу можна відслідкувати, тоді новий спосіб дозволить дослідити забруднену територію з меншою кількістю необхідних вимірів та більшою точністю опису. У якості точок-джерел інформації були вибрані берези на радіоактивно забрудненій території, бо завдяки підсиленому руху соку в них навесні, можна отримати проби, за якими визначити точну концентрацію тритію у вільній воді рослин і, таким чином, відслідкувати міграцію радіоізоотопу на всій території.

За допомогою програми «Випадкова точка» [3] та способу опису радіоактивно забрудненої території [4] була реалізована задача зі створення моделі забруднення на деякій умовній поверхні схилу (області) яру, куди стікають дощові води з території, де розташоване підприємство, що працює з тритієм. Перевірка моделі відбувалася шляхом проведення ряду вимірювань концентрації тритію у соках рослин. Проте коли ми розглядаємо точки з різними значеннями концентрації при вирішенні зазначеної функції, неодмінно будуть виникати помилки наближення, які впливатимуть на точність опису радіоактивно забрудненої території.

У зв'язку з цим було розроблено ряд доповнень до способу опису радіоактивно забрудненої території:

1) З використанням теорії Коші та ряду тверджень щодо розкладання функцій за нев'язками, представлено та доведено теореми, які дозволять здійснювати функціональні перетворення, що лежать в основі розкладання за нев'язками для рішення задач опису забрудненої території.

2) Представлено алгоритм перетворення функцій з мінімізацією похибок шляхом розкладання шуканої функції в ряд нев'язок, коли вибирається вид нев'язки та встановлюється ряд обмежень з розкладанням отриманої функції в ряд Тейлора за ступенями.

3) Оптимізовано підхід Г. С. Теслера [5] до вирішення задач розкладання функцій за нев'язками та дробово-функціональних наближень, зокрема, вирішені задачі визначення коефіцієнтів та мінімізації кількості ітерацій для полегшення програмної реалізації підходу.

4) Представлено спосіб знаходження базових послідовностей ітераційних формул з модифікацією методу Чебишова для побудови ітерацій вищих порядків для випадку рівнянь, що використовуються для завдань, поставлених в роботі. Зокрема, застосування різних методів апроксимації функцій для отримання коефіцієнтів базових послідовностей на основі відомих розкладань. Такі розкладання можуть бути представлені в табличному вигляді, що при програмній реалізації дозволяє зекономити час на розрахунках.

У підсумку можна зазначити, що на основі запропонованого триває робота з реалізації цих доповнень до комп'ютерної програми «Випадкова точка» з подальшим втіленням на сайті проекту «Тритій на планеті Земля».

#### **Список використаних джерел:**

1. Зойтендейк Г. Методы возможных направлений. – М. : Издательство Иностранной литературы, 1963. – 178 с.

2. Чебышев П. Л. Вычисление корней уравнений // Чебышев П. Л. Полное собрание сочинений. – Москва – Ленинград, 1951. – Т. 5. – С. 7 – 25.

3. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 67750 «Комп'ютерна програма з реалізації способу опису забрудненої території «Випадкова точка» («Випадкова точка (Random point)»). Автори: Кряжич Ольга Олександрівна, Коваленко Олександр Васильович. Дата заявки: 12.07.2016. Дата реєстрації: 12.09.2016.

4. Коваленко О. В., Кряжич О. О. Спосіб опису екологічного стану території та його програмна реалізація «Випадкова точка» з використанням методу можливих напрямків // Вісник УжНУ. Серія: Математика і інформатика. – 2016. – №1 (28). – С. 60 – 71.

5. Теслер Г. С., Гелемб'юк Р. В. Побудова ітераційних формул для розв'язування систем диференціальних рівнянь з використанням розвинення функцій за нев'язками // Математичні машини і системи. – 2009. – № 2. – С. 68 – 75.

#### **Анотація**

**О. Кряжич, О. Коваленко**

*Удосконалення способу опису радіоактивно забрудненої території з використанням методу можливих напрямків*

Запропоновано ряд доповнень до розробленого способу опису радіоактивно забрудненої території, що дозволяють більш точно виконувати опис забрудненої території радіоізотопом водню – тритієм. Перевірка моделі

забруднення відбувалася шляхом проведення ряду вимірювань концентрації тритію у соках рослин досліджуваної території.

В роботі було представлено алгоритм перетворення функцій з мінімізацією похибок шляхом розкладання шуканої функції в ряд нев'язок, оптимізовано підхід до вирішення задач розкладання функцій при вирішенні задачі визначення коефіцієнтів та мінімізації кількості ітерацій для полегшення програмної реалізації підходу, а також представлено спосіб знаходження базових послідовностей ітераційних формул з модифікацією методу Чебишова для побудови ітерацій вищих порядків для випадку рівнянь.

На основі запропонованого триває робота з реалізації доповнень до комп'ютерної програми «Випадкова точка» з подальшим втіленням на сайті проекту «Тритій на планеті Земля».

## **Resume**

**O. Kryazhych, O. Kovalenko**

*Improvement of the method of description of radioactively contaminated territory by the method of possible directions*

A number of additions to the developed method of describing radioactively contaminated territory are proposed, allowing more accurate description of contaminated territory with hydrogen radioisotope – tritium. The pollution model was checked by conducting a number of measurements of the concentration of tritium in the sap of plants of the studied territory.

The paper presents an algorithm for the conversion functions minimizing errors by expanding the unknown function in a number of residuals, streamlined approach to solving problems decomposition of functions in solving the problem of determining the coefficients and minimize the number of iterations to facilitate software implementation of the approach, and presents a method of finding the base sequence of iterative formulas with modification Chebyshev's method for building higher-order iterations for the case of equations.

On the basis of the proposed work is underway to implement additions to the computer program "Random Point" with the subsequent implementation on the site of the project "Tritium on Planet Earth".

## УСПІХИ КОНДИЦІОНУВАННЯ РАВ

*Куба І. Ю., Власенко М. І., Балашевський О. С.,  
Рибалка В. Б.*

*ВП НТЦ ДП «НАЕК «Енергоатом» відділ експериментальних досліджень  
відділення науково-технічної підтримки у м. Одеса, місто Одеса,  
i.kuba@ntc.atom.gov.ua, rybalka\_valery@email.ua*

Переробка рідких радіоактивних відходів (РРВ), зокрема переведення у твердий стан з високою механічною та гідролітичною стійкістю впирається в проблему наявності в РРВ великої кількості баластних нерадіоактивних компонентів. Пряме отвердження РРВ з баластними солевими компонентами погіршує механічні та гідролітичні властивості РАВ, що отверджено. Це стосується будь-яких методів імобілізації: бетонування, склування та інших [1]. Проте відділення радіоактивних компонентів з РАВ зіштовхується з питаннями наявності в РРВ речовин, що утворюють комплексні сполуки з іонами, в тому числі, з іонами радіонуклідів. Метою даної роботи було проведення дослідження руйнування комплексоутворювачів та виділення (концентрування) іонів-аналогів радіонуклідів.

Запропонована концепція поводження з РРВ була вибудована за схемою, яка включає стадії:

- руйнування сполук комплексоутворюючих речовин – хімічними методами або нейтралізація цих комплексоутворювачів шляхом введення іонів елементів, які утворюють більш міцні комплексні сполуки, у порівнянні з радіонуклідами;
- концентрування радіонуклідів і очистка від «шкідливих» компонентів (сполук, що суттєво погіршують гідролітичну стійкість скла/бетону)-фосфоровмісних та сірковмісних речовин. Ця стадія може включати осадження радіонуклідів з неорганічними сполуками або з органічними з'єднаннями;
- відділення сконцентрованих радіонуклідів (осадження, фільтрування або центрифугування).

Усунення впливу речовин-комплексоутворювачів при виділенні радіонуклідів можливо здійснити двома способами: деструкцією (окисненням) комплексоутворювача [2] і витісненням з нього радіонуклідів, шляхом введення іонів, які утворюють з комплексоутворювачами більш стійкі сполуки. Серед таких комплексоутворювачів найчастіше застосовуються: ЕДТА, винна кислота, щавлева кислота, лимонна кислота, поліфосфати натрію та інші.

Найбільш міцні комплекси з радіонуклідами утворює етилендіамінтетраацетат натрію. Одночасно він є одним з найбільш стійких сполук у плані хімічної стійкості (виключаючи фосфати та поліфосфати).

Відомо, що один з найміцніших комплексів із ЕДТА утворює іон Fe (3+), логарифм константи стійкості якого  $\lg K_{\text{ст.}}(\text{FeY}^-) = 25$ . У той же час більшість металів утворюють комплекси з ЕДТА, в яких константа стійкості на 6-10 порядків менша. Це означає, що іони заліза можуть бути ефективно застосовані для витіснення всіх інших іонів у вигляді вільних. Однак

винятком є іони Co (+3), логарифм константи стійкості (CoEDTA)  $\lg K_{ст} (CoY^-) = 36$ . Обидва елементи у ступені окислення +3 можуть застосовуватися в якості «витіснювачів» усіх інших іонів з комплексів EDTA.

Для перевірки можливості витіснення іонів  $^{137}Cs$ ,  $^{90}Sr$ ,  $^{60}Co$ ,  $^{51}Cr$ ,  $^{57}Mn$ ,  $^{59}Ni$ ,  $^{65}Zn$ ,  $^{95}Zr$ ,  $^{94}Nb$ ,  $^{57}Mn$ ,  $^{45}Ca$ ,  $^{49}Ca$  і можливості окислювальної деструкції речовин, що утворюють комплексні сполуки виконані наступні серії експериментів:

1. Досліджено властивості комплексів  $Fe^{3+}$  ( $FeCl_3$ ) з реагентами (EDTA, винна кислота, щавлева кислота, лимонна кислота) і визначено можливості деструкції отриманих сполук для подальшого виділення  $Fe(3+)$  у вигляді гідроксиду-колектора для концентрування і виділення з розчинів іонів радіонуклідів.

2. Досліджено властивості комплексів  $Co^{2+/3+}$  ( $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ) з реагентами (EDTA, винна кислота, щавлева кислота, лимонна кислота) і визначено можливості деструкції отриманих сполук для подальшого виділення  $Co^{2+/3+}$  у вигляді гідроксиду-колектора для концентрування і виділення з розчинів іонів радіонуклідів.

Для деструкції використовували  $H_2O_2$  та  $KMnO_4$ . Концентрацію комплексу  $Fe^{3+}$  з (EDTA, винною, щавлевою, лимонною кислотами) та  $Co^{2+/3+}$  з (EDTA, винною, щавлевою, лимонною кислотами) вдалося зменшити на 3 порядки. Експерименти були проведені в об'ємах від  $100\text{ см}^3$  до  $5000\text{ см}^3$ .

У розчини після відділення гідроксиду заліза та гідроксиду кобальту додали розчин жовтої кров'яної солі та розчин  $FeCl_3$ . Спостерігали виділення осаду берлінської блакиті  $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$  темно-синього кольору, який не змінювався з плином часу. Розчинення осаду не спостерігали. Це дозволяє стверджувати, що ефективне виділення іонів цезію співсаженням на гексацианофераті заліза після руйнування комплексів EDTA – можливе.

Визначення відсотку сорбції Fe, Co, Sr, Cs з розчинів проводилось при різних значеннях рН, на силікатній кислоті в присутності борної кислоти та фосфат іонів, на силікаті кальцію та силікаті стронцію. Найвищий відсоток сорбції Sr досягнутий на силікаті кальцію в діапазонах рН від 5 до 12. Високі показники вилучення Fe та Co вдалось отримати на силікатній кислоті в присутності борної кислоти та фосфат іонів, було досягнуто відсотку сорбції в більш як 95% в діапазонах рН від 6 до 12. Відсоток сорбції Cs на вищезгаданих сорбентах не перевищував 20%, тому сорбція Cs проводилась на гексацианоферраті заліза і досягнуто вилучення більше ніж 90%, незалежно від встановленого рН. Ефективність Cs підтверджується [3].

Безфосфатне скло є пріоритетним в вирішенні проблеми переробки РРВ та захоронення РАВ, а тому під час осадження з розчинів РРВ важливим є момент відділення фосфатів. Нами було визначено відсоток утворення осаду: силікату стронцію, силікату кальцію та фосфату кальцію в залежності від рН, що дозволило визначити показники рН при яких відбувається ефективне відділення від фосфат іонів. Як видно з Рис. 2 найефективнішим діапазоном рН для цього є рН від 2 до 6.

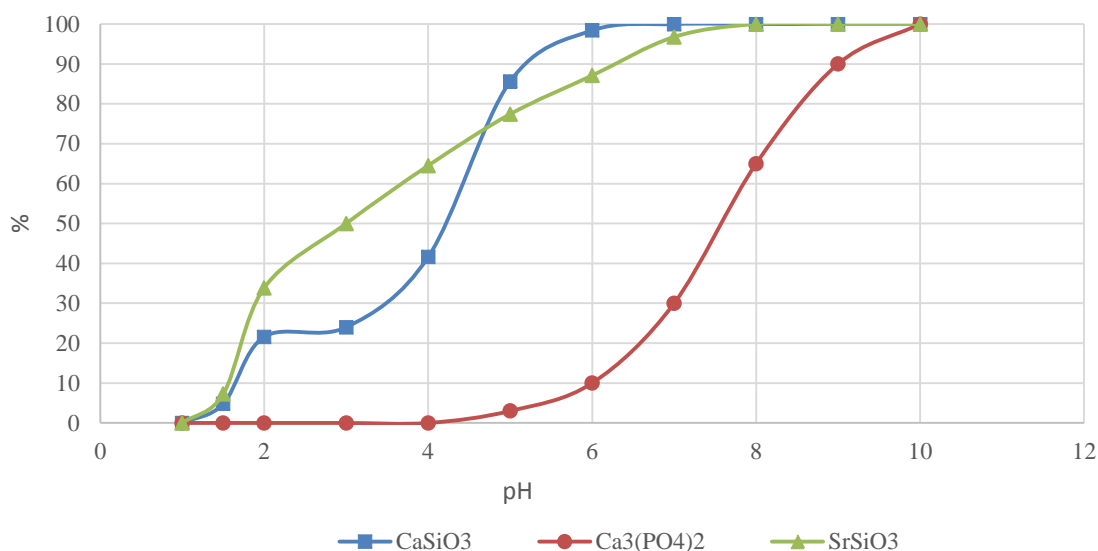


Рисунок 2. Залежність кількості утвореного осаду від рН розчину.

В проведеному ряді дослідів по руйнуванню комплексів з ЕДТА щавлевої, лимонної та винної кислот з іонами  $Fe^{+3}$ ,  $Co^{2+/3+}$ , у всіх випадках вдавалось осадити іони  $Fe^{+3}$ ,  $Co^{2+}$  та  $Co^{3+}$  і отримати повністю знебарвлені розчини з кількістю вихідних комплексоутворювачів на рівні похибки вимірювання титрометричного метода аналізу. Способом прямої реагентної обробки вдається повне руйнування такого міцного комплексу як ЕДТА з  $Fe^{3+}$  та  $Co^{2+/3+}$  і очищення розчину від  $Fe(3+)$  на рівні 95 – 99%. Метод прямої реагентної обробки показав високу ефективність у зниженні вмісту органічних кислот в дезактивуючих та миючих засобах.

Досліди по осадженню та співосадженню показали, що шляхом комбінування сорбентів та співосадження, можна видалити 90% і більше радіонуклідів Fe, Co, Sr, Cs одностадійно. Відмінність в осадженні фосфатів та силікатів в залежності від рН дає змогу розділити ці компоненти та отримати осад, а в подальшому і скло з мінімальним вмістом фосфатів. Використання силікатів та силікатної кислоти в якості сорбентів є також прийнятним для подальшої обробки, а саме включення в скляну матрицю, так як силікати являються склоутворюючими елементами. Використання силікату стронцію дозволяє отримати високі показники сорбції заліза та кобальту. Осадження радіоактивного стронцію відбуватиметься у вигляді силікату стронцію, що дозволить зменшити вміст радіоактивного стронцію на 90 і більше процентів.

### Висновки:

Отримані результати надають можливість вводити радіонукліди в матриці для отвердження у вигляді таких сполук, які, по-перше, по суті є складовою частиною матриць скла або бетону і тому лише покращують гідролітичну стійкість отверджених РАВ. А по-друге, відсутність речовин-комплексоутворювачів покращує утримання радіонуклідів у бетоні, а

відсутність баластних солей – гідролітичну стійкість скла. Додатково метод кондиціонування, як метод концентрування радіоактивної складової – дозволить суттєво зменшувати об'єми РАВ.

**Список використаних джерел:**

1. Смирнов А. Д. «Сорбционная очистка воды». Изд. "Химия", 1982. — 168 С.
2. Glaze W. H. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation / W. H. Glaze, J.-W. Kang, D. H. Chapin // Ozone Science & Engineering. — 1987. — Vol. 9. — P. 335–352.
3. Сборник методик по определению радиоактивности окружающей среды. Под ред Г.А. Середы, М.: Гидрометеиздат, 1972, 40 с.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЛАНДШАФТНИХ ПОЖЕЖ В ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ НА ОСНОВІ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ

*Кузьменко Ю. І., Гавловська Л. В., Лев Т. Д.  
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,  
вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028,  
Україна e-mail: yu.kuzmenko@gmail.com*

Представлені результати моделювання поширення пожежі в Чорнобильській зоні відчуження в районі Копачі - Чистогалівка з 08 по 13 квітня 2020 р. Для моделювання поведінки пожеж була використана найбільш поширена напівемпірична модель Ротермела. Вихідні дані для моделювання включали декілька вхідних растрових шарів з даними про моделі палива, вологість мертвого та живого палива, швидкості вітру на висоті середини полум'я та його напрямки, топографічні характеристики та координати вихідних джерел загоряння отримані шляхом аналізу даних супутникових спостережень MODIS та VIIRS і конвертовані в растровий шар з розміром комірки 25 м. За результатами моделювання отримані карти поширення пожежі (периметри за різні часові проміжки) і швидкостей поширення вогню ROS. Було визначено середні швидкості розповсюдження пожежі, які в різні дні становили від 27 до 35 см/хв. Сумарні площі вигорання в межах лісів – 10,5 км<sup>2</sup>, в межах луків – 17,5 км<sup>2</sup>. Визначені запаси Cs<sup>137</sup> в межах периметру пожеж склали 6160 МБк, запаси Sr<sup>90</sup> – 3640 МБк. Результати проведеного моделювання співставленні з даними супутникового моніторингу, а також з результатами інших досліджень.

Ключові слова: зона відчуження, ландшафтні пожежі, поширення пожеж, модель Ротермела.

The results of modeling the spread of fire in the Chornobyl Exclusion Zone in the area of Kopachi - Chistogalivka from 08 to 13 April 2020 are presented. The most common semi-empirical model of Rothermel surface fires was used to model the behavior of fires. The initial data for modeling include several input raster layers, which contained data on fuel model, fuel moisture, wind midflame velocity and direction, topographic characteristics - terrain slope and aspect, digital elevation model (DEM). The coordinates of the fire starting location were obtained by analyzing the data of satellite observations MODIS and VIIRS and converted into a raster layer with a cell size of 25 m. According to the simulation, maps of fire spread (perimeters for different time intervals) and ROS fire velocities were obtained. The average rates of fire spread, which on different days ranged from 27 to 35 cm/min were calculated. The burnt areas in forests - 10.5 km<sup>2</sup>, in meadows - 17.5 km<sup>2</sup>. The identified reserves of Cs<sup>137</sup> within the perimeter of the fires amounted to 6160 MBq, reserves of Sr<sup>90</sup> – 3640 MBq.

The results of the simulation are compared with the data of satellite monitoring, as well as with the results of other studies.



Природні пожежі в Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ), які щорічно знищують і пошкоджують рослинність на радіоактивно забруднених територіях, є важливим фактором вторинного перерозподілу радіонуклідів шляхом атмосферного переносу внаслідок конвекційного підйому забруднених частинок і наступного осадження на великій відстані від місця пожежі. Це впливає на екологічний стан навколишнього середовища. Для розрахунку атмосферного переносу радіоактивних аерозолів в результаті пожеж необхідно вміти прогнозувати поведінку пожеж, зокрема швидкості і периметри розповсюдження вогню відповідно до погодних умов, рельєфу місцевості і наявних горючих матеріалів (палива) для підтримання вогню.

Мета даного дослідження є моделювання поширення природних ландшафтних пожеж в ЧЗВ за умов неоднорідної підстильної поверхні, впливу метеорологічних умов: вологості, кількості опадів, швидкості і напрямку вітру.

Об'єктом моделювання була взята група пожеж, яка відбувалася в районі Копачі - Чистогалівка з 08 по 13 квітня 2020 р.

Методика моделювання була заснована на моделі Ротермела [1], яка успішно використовується вже багато років в Національній системі оцінки пожежної небезпеки США (National Fire Danger Rating System) NFDRS адаптованої для двомірного випадку і реалізована в середовищі GRASS GIS.

Загальний вигляд моделі Ротермела

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$$

$R$  - швидкість розповсюдження вогню в м/с;  $I_R$  - інтенсивність реакції, кВт/м;

$\xi$  - коефіцієнт поширення теплового потоку;  $\phi_w$  - коефіцієнт вітру;  $\phi_s$  - коефіцієнт нахилу;  $\rho_b$  - об'ємна густина паливного шару, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  - ефективне число нагріву;  $Q_{ig}$  - кількість тепла необхідного для спалювання 1 кг палива, кДж/кг.

Вихідні дані:

Для моделювання поведінки пожеж було підготовлено декілька вхідних растрових шарів, які включали дані про місцевість, вітер, паливо та вологість. Необхідні для розрахунку ухили поверхні, які впливають на швидкість розповсюдження вогню, а також аспекти, від яких залежать напрямки, в яких буде відбуватись поширення пожежі, були отримані з растрової карти цифрової моделі місцевості Японського національного космічного агентства JAXA з роздільною здатністю 30 м на 1 піксел в районі Екватора. Всі ці шари були отримані з електронних карт, які були спеціально підготовлені і перетворені на формати підтримувані системою GRASS GIS, шляхом інтерполяції приведені до єдиного масштабу і єдиної метричної системи координат UTM, дотримання якої вимагають розрахункові модулі системи r.ros і r.spread [2].

Інформація про джерела пожеж для нашого розрахунку була отримана шляхом аналізу даних супутникових спостережень MODIS та VIIRS, отриманих на сайті Fire Information for Resource Management System (FIRMS) NASA [3]. Всього було ідентифіковано близько 800 джерел загоряння.

Моделювання відбувалося за двоетапною процедурою. Для кожного дня спочатку моделювалися швидкості розповсюдження пожежі з урахуванням особливостей вітрового режиму і підстильної поверхні. Потім розраховувалися периметри розповсюдження за визначений часовий проміжок з похвилинним кроком.

При проведенні моделювання ми робили окремі розрахунки для кожного з 829 джерел загоряння використовуючи карту місцевості високої роздільної здатності зі стороною комірки 25 м.

Результати моделювання поведінки пожежі в ЧЗВ за період 08-13 квітня з основним осередком в районі Чистогалівка – Копачі представлені на рис.1. В цілому вони узгоджуються з іншими результатами, зокрема з даними представленими в звіті УкрГМІ [4], але є і певні розбіжності.

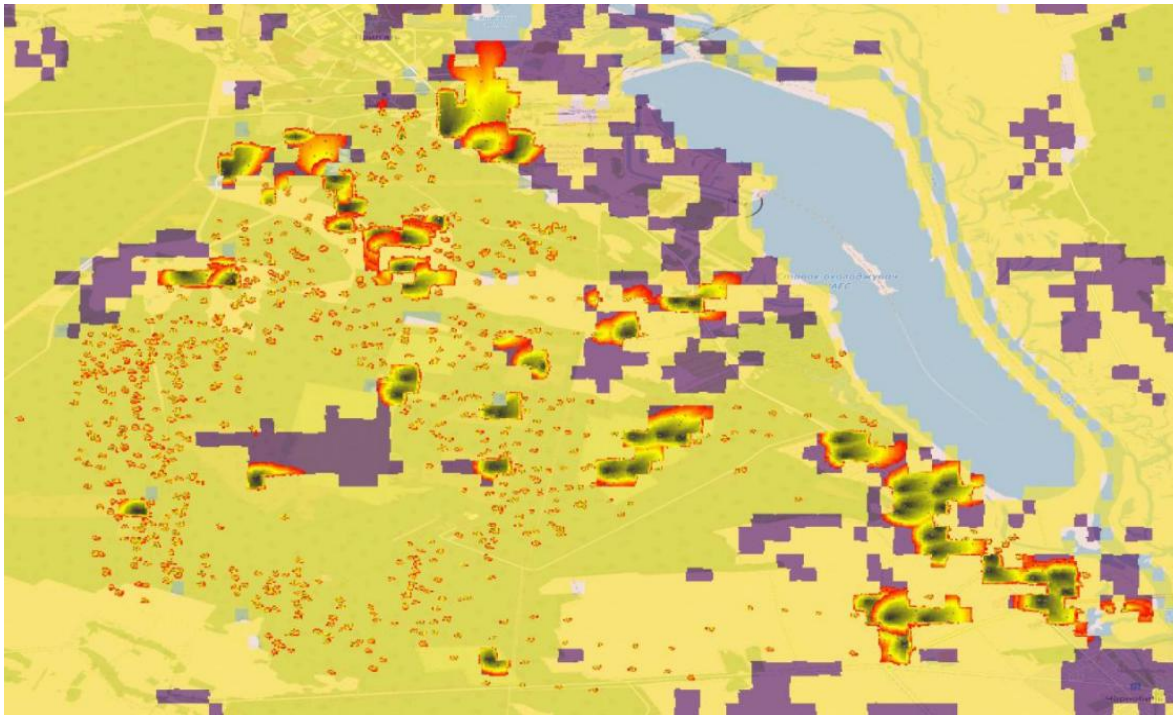


Рис.1 - Результати моделювання поширення пожеж в 10 км ЧЗВ 08-13 квітня 2020 р.

Однією з причин цього може бути наявність верхових пожеж, які мали місце в цей період згідно даних Регіонального Східноєвропейського центру моніторингу пожеж [5], які не були враховані нами при моделюванні внаслідок обмежень самої моделі.

В цілому співвідношення площ пожеж за результатами моделювання між лісовими угіддями і трав'янистою рослинністю порівняно з даними УкрГМІ витримується. Загальна кількість вигорілих луків за результатами нашого моделювання складає 17,5 км<sup>2</sup>, за даними УкрГМІ - 33,5 км<sup>2</sup>, лісів за результатами нашого моделювання 10,5 км<sup>2</sup>, за даними УкрГМІ - 26,0 км<sup>2</sup>.

Середні швидкості розповсюдження пожежі в напрямку найбільшого розповсюдження (вперед) в різні дні становили від 27 до 35 см/хв. Запаси  $Cs^{137}$  в межах периметру пожеж склали 6160 МБк, запаси  $Sr^{90}$  – 3640 МБк. Запаси  $Cs^{137}$  та  $Sr^{90}$  визначалися за щільністю радіоактивного забруднення території згідно Атласу[6].

Результати проведеного моделювання і їх порівняння з даними супутникового моніторингу, а також результатами досліджень опублікованих в [3] підтверджують можливість використання моделі Ротермела, як математичної основи для моделювання розповсюдження ландшафтних пожеж для території ЧЗВ.

Проведені розрахунки дозволили визначити основні характеристики пожеж: швидкості розповсюдження вогню, площі периметрів, а також визначити запаси радіоактивного цезію в межах ділянок загорання, які могли приймати участь в формуванні радіоактивних викидів внаслідок конвективного підйому при пожежі.

#### **Список використаних джерел:**

1. Rothermel R. C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels / R. C. Rothermel // USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper INT-115. – Ogden, 1972.

2. Кузьменко Ю. И. ГИС-подход к решению задачи прогнозирования развития природных пожаров в Чернобыльской зоне отчуждения на основе модели Ротермела / Ю. И. Кузьменко, Т. Д. Лев, О. Г. Тищенко, В. Н. Пискун, Л. В. Гавловская // Ядерна енергетика та довкілля. – 2020. – Вип.2. – С.79 - 94.

3. Fires in Ukraine in the exclusion zone around the Chernobyl power plant: Latest measurement results and assessment of environmental and health consequences. Information note n°5 // IRSN. – 5 May 2020. – Режим доступу: [https://www.irsn.fr/EN/newsroom/News/Pages/20200505\\_Fires-in-Ukraine-in-the-Exclusion-Zone-around-chernobyl-latest-news-and-consequences.aspx](https://www.irsn.fr/EN/newsroom/News/Pages/20200505_Fires-in-Ukraine-in-the-Exclusion-Zone-around-chernobyl-latest-news-and-consequences.aspx)

4. Процак В. П. Оцінка динаміки виносу радіонуклідів за межі зони відчуження повітряним шляхом під час пожежі 02 – 20.04. 2020 р. / В. П. Процак, О. В. Войцехович, Г. В. Лаптев // Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України. – Режим доступу: <https://uhmi.org.ua/msg/fire2020/analytical.pdf>.

5. Зібцев С. В. Прес реліз Регіонального Східноєвропейського центру моніторингу пожеж щодо площ пожеж у зоні відчуження, 29.03 – 16.04.2020 / С. В. Зібцев, В. В. Миронюк. – Режим доступу: <https://nubip.edu.ua/node/75436>.

6. Табачний Л. Я. та ін.. Атлас Україна. Радіоактивне забруднення. ТОВ «Інтелектуальні Системи ГЕО», 2002, 2008.

## РЕМОНТ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА В УМОВАХ АЕС ЗА ДОПОМОГОЮ СТЕНДУ ІНСПЕКЦІЇ І РЕМОНТУ ПАЛИВА (СІРП)

*Євген Кулик, начальник відділу інженерного центру  
ВП «Атомремонтсервіс» ДП «НАЕК «Енергоатом»  
м. Славутич  
e.kulik.atom@gmail.com*

**Анотація** Презентація стосується питання ремонту ядерного палива, яке впроваджено на українських АЕС в рамках державної політики диверсифікації постачання енергетичних джерел. Презентація включає інформацію щодо палива типу ТВЗ-W/WR виробництва «Westinghouse», яке дозволяє виконувати його ремонт та обладнання для його ремонту, яке використовує і удосконалює ВП «Атомремонтсервіс» ДП «НАЕК «Енергоатом». Ремонт паливної збірки показано в основних етапах. Описано досвід ВП «Атомремонтсервіс» з першого в Україні ремонту ТВЗ, який пройшов у 2018 р. на енергоблоці № 3 ВП ЮУАЕС, до сьогодні, коли ВП «Атомремонтсервіс» виконав модифікацію обладнання СІРП для виконання унікальної роботи з відновлення експлуатаційних характеристик неопромінених паливних збірок поза умовами енергоблоку. Зроблені висновки щодо актуальності напрямку ремонту і його розвитку в майбутньому.

## REPAIR OF NUCLEAR FUEL UNDER NPP CONDITIONS WITH THE USE OF THE FUEL INSPECTION AND REPAIR EQUIPMENT (FIRE) WORKSTATION

**Annotation:** This presentation addresses the issue of repair of nuclear fuel, which is used by the nuclear power plants of Ukraine as part of the process of implementation of the national policy to diversify the nuclear fuel supply. The presentation includes information on the fuel assemblies of the type WFA (WFA-R) manufactured by Westinghouse and featuring the repair capabilities, and on the equipment used and upgraded by the Separate Division of the National Nuclear Energy Generating Company “ENERGOATOM” for this purpose. It shows the main stages of the fuel assembly repair. It also describes the experience gained by the SD ARS over the period of time starting from the first re-composition of a FA performed at Unit 3 of SUNPP back in 2018 and to date, when the SD ARS staff performed a unique work effort to restore the performance properties of non-irradiated fuel assemblies outside of operational unit following the modification of the FIRE workstation. The presentation also draws conclusion regarding the viability and prospects of nuclear fuel repair, and development of this activity in the future.

## **АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЯДЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩАХ З ВИСОКОАКТИВНИМИ ВІДХОДАМИ**

*Купріячук С. В., Безмилов В. М.,  
Михайлов О. В., Шаблій Т. О.\**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль, вул. Кірова  
36а, s.kuprianchuk@ispnpp.kiev.ua,*

*\*Національний технічний університет України “Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ.*

Вилучення паливовмісних матеріалів (ПВМ) є одним із головних завдань виводу АЕС із експлуатації. Для безпечного захоронення та контролю ПВМ після вилучення необхідно виконувати низку технологічних операцій. Однією із основних операцій при поводженні з ПВМ є характеристика та визначення кількості матеріалів що діляться, що є основою для формування паспорта на партію ПВМ.

Тому, метою даної роботи є аналіз існуючих методів визначення кількості ядерних матеріалів у гетерогенних середовищах з високоактивними відходами, які можуть бути використані для характеристики ПВМ при перетворенні ОУ на екологічно безпечну систему.

В даній роботі проаналізовані методи та системи визначення кількості плутонію та його альфа активності, що були створені в Центрі ядерних досліджень Карлсруе (КfК, Німеччина) [1-2], які використовуються при знятті з експлуатації АЕС та характеристиці ядерних матеріалів.

В цьому ж Центрі разом з Інститутом нейтронної фізики та реакторних технологій (КfК-INR) була створена установка для визначення кількості плутонію та його альфаактивності. Принцип роботи установки полягав у пасивному нейтронному випромінюванні, яке реєструвалося за допомогою 50 детекторів, що були розташовані навколо бочки з відходами. В основному, нейтроне випромінювання виникає в результаті спонтанного ділення в парних ізотопах Pu і Cm та ( $\alpha$ , n)- реакції.

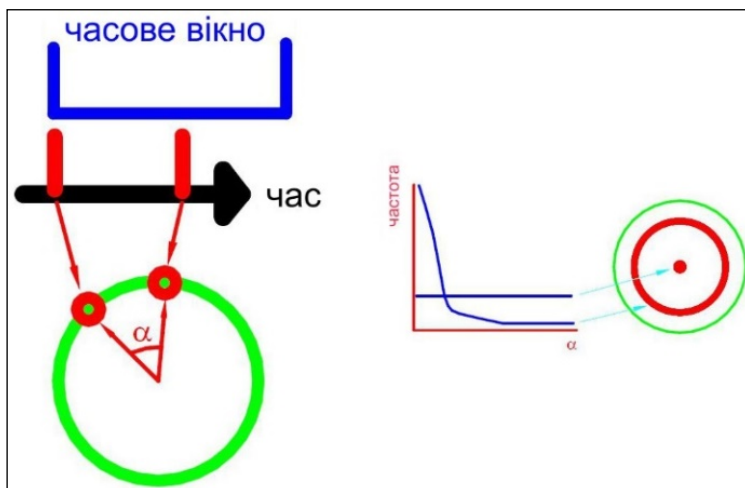
Раніше для визначення кількості ядерних матеріалів був розроблений метод зсувного реєстру. Даний метод використовували при характеристиці тільки бочок з горючими відходами. Ця вимірювальна система відповідала всім нормативним вимогам та могла визначати вміст плутонію масою більше 1 мг. Проте, дана методика не давала необхідних результатів для гетерогенних відходів.

В основному для аналізу даних використовувалися дві системи збору даних лічильник швидкості нейтронних імпульсів і лічильник множинності. Тому була розроблена нова система збору даних (LCA - local correlation analysis) [3], яка дозволяє краще і точніше визначити положення джерела в бочці з гетерогенними відходами.

Одним з основних моментів для розробки нової системи вимірювань було застосування методу збігів, що спрямований на краще визначення локалізації джерел. Таким чином, щоб побачити різницю розподілу між кільцеподібним

джерелом та джерелом в центрі бочки, потрібно враховувати кут, утворений між центром бочки і двома детекторами, які викликали збіг даних.

На Мал. 1 показана схема принципу роботи системи LCA. Тобто, кожний імпульс встановлюється на вході вимірювальної системи LCA у вигляді тригера. Саме на вході сигнал постійно «опитується» та буферизується, після чого вхід знову відкривається для нового сигналу. Тактова частота налаштовується на тривалість імпульсу дискримінатора в 6 мксек. Коли проміжна пам'ять заповнюється, проходить її зчитування.



Мал. 1. Принцип роботи LCA

Вся інформація доступна для оцінки з використанням системи вимірювання LCA, а на додаток до попередніх методів обробки даних можуть застосовуватися інші алгоритми.

Для аналізу даних використовують наступні алгоритми:

- аналіз просторових кореляцій;
- час кореляції;
- час перебування нейтронів;
- швидкість рахунку збігів;
- мультиплетна структура;
- мультиплетна структура, що залежить від розташування детекторів.

Оскільки вся важлива інформація доступна в вимірювальній системі, на додаток до визначення просторової кореляції можуть бути виконані наступні оцінки:

- визначення часу кореляції;
- визначення часу перебування теплових нейтронів в вимірювальній системі;
- метод збігів по методу зсувного реєстру зі змінним часовим вікном;
- метод ТСА зі змінним часовим вікном;
- метод ТСА для обраних гарячих точок.

За допомогою цієї вимірювальної системи можна знаходити суттєві відмінності між симетрично розташованими розподілами джерел. Даний метод може точно локалізувати (до  $\pm 5$  см) точкове джерело навіть в бетонній бочці.

Оскільки, дані методи можуть визначати кількість плутонію менше 1 мг та його розташування з похибкою до 5 см, то можемо припустити, що скупчення

ПВМ - це гетерогенні відходи та ці методи можуть бути використані для характеристики ПВМ.

Таким чином в даній роботі проведені експериментальні розрахунки відповідно до відомих характеристик ПВМ ОУ для можливої реалізації описаного методу при характеристиці ПВМ в майбутньому, а саме: проведені розрахунки ймовірного положення джерела в бочці, використовуючи дані нейтронної авторадіографії ПВМ.

#### **Список використаних джерел:**

1. <https://www.kte-karlsruhe.de/en/projekte/wiederaufarbeitungsanlage-karlsruhe/>
2. <https://www.kte-karlsruhe.de/en/unternehmen/historie/>
3. W. Eyrich; W. D. Klotz; H. Würz: Zerstörungsfreie Plutoniumbestimmung in Abfallgebinden der Eurochemic in Mol KfK-3369, Juli 1982

### **ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINATION OF NUCLEAR MATERIALS IN HETEROGENEOUS ENVIRONMENTS WITH HIGH LEVEL WASTE**

**Abstract:** The removal of fuel-containing materials (FCM) is one of the main tasks in NPP decommissioning. Several technological operations must be performed for safe disposal and control of FCM after its removal. One of the main operations in FCM treatment is the characterization and determination of the number of fissile materials, and based on the obtained data, a passport for the batch of FCM is formed.

Therefore, this work aims to analyze the existing methods for determining the amount of nuclear materials in heterogeneous environments and heavy waste, which can be used to characterize FCM in the conversion of SO (Shelter Object) into ESS (ecologically safe system).

This paper analyzes the methods and systems for determining the amount of plutonium and alpha activity created at the Karlsruhe Nuclear Research Center (KfK, Germany) and used in the decommissioning of nuclear power plants and characterization of nuclear materials.

Previously, a shift register method was developed to determine the number of NMs (nuclear materials). This method was used to characterize only drums with combustible waste. This measuring system met all regulatory requirements and could determine plutonium content weighing more than 1 mg. However, this technique did not give the necessary results for heterogeneous waste.

Two data acquisition systems were used for data analysis, a neutron pulse velocity counter and a multiplicity counter. Therefore, a new data collection system (LCA - local correlation analysis) was developed, which allows better and more accurate determining the source's position in the drum with heterogeneous waste.

With this measuring system, one can find significant differences between the distributions of symmetrically located sources. This method can accurately locate (up to  $\pm 5$  cm) a point source even in a concrete barrel.

Thus, in this paper, experimental calculations are performed by the known characteristics of the FCM SO for a possible implementation of this method in the FCM characterization in the future.



## ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ БЕЗПЕЧНИЙ СТАН ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» В ПЕРІОД ЕКСПЛУАТАЦІЇ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙМЕНТА

Кутіна І. <sup>2)</sup>, Бертхольд А. <sup>1)</sup>, Веселов Є. <sup>2)</sup>, Кондратьєв С. <sup>2)</sup>,  
Кюхлер Л. <sup>1)</sup>, Склярєнко В. <sup>2)</sup>

1) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Німеччина, м. Берлін

2) Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки (ДНТЦ ЯРБ), Україна, м. Київ

### Анотація:

Будівництво нового безпечного конфайменту (НБК) над об'єктом «Укриття» (ОУ), що розташований над зруйнованим 4-м блоком Чорнобильської АЕС завершено. НБК спроектовано з врахуванням граничних умов щодо поточних та потенційних небезпечних впливів з боку ОУ. Відповідно, мають бути встановлені критерії безпечного стану ОУ, зокрема, критерії безпечного стану скупчень паливовмістних матеріалів (ПВМ).

У тезах представлені результати аналізу факторів, які визначають безпечний стан ОУ під час експлуатації НБК, зокрема, розробки методичних рекомендацій щодо встановлення критеріїв прийнятності/неприйнятності стану скупчень ПВМ з точки зору безпеки, а також представлені плани подальших досліджень зазначених факторів.

**Ключові слова:** об'єкт «Укриття», новий безпечний конфаймент, паливовмістні матеріали, критерії безпеки, моніторинг

### Annotation:

Construction of the New Safe Confinement (NSC) above the Object Shelter (OS) over destroyed Chornobyl NPP unit 4 has been completed. The NSC design is based on boundary conditions for current and potential hazardous impacts from the OS. Accordingly, criteria for the safe state of the OS have to be established, in particular, criteria for the safe state of fuel containing material (FCM) accumulations.

The abstract presents the results of the analysis of factors that determine the safe state of OS during the operation of the NSC, in particular, the development of methodological recommendations for the establishment of acceptance/non-acceptance criteria of FCM accumulations from the point of view of safety, as well as plans for further research of these factors.

**Key words:** Shelter, New Safe Confinement, fuel-containing materials, safety criteria, monitoring

У 2019 році в рамках міжнародного Плану здійснення заходів (ПЗЗ) на ОУ зруйнованого 4-го енергоблоку Чорнобильської АЕС завершено будівництво НБК. Термін експлуатації НБК становить не менше 100 років [1]. У цей період



необхідно підтримувати безпечний стан ОУ всередині НБК, зокрема, безпечний стан ПВМ. Також в цей час передбачається виконати демонтаж нестабільних конструкцій ОУ, вилучення ПВМ, інші заходи по перетворенню ОУ в стан, при якому буде забезпечена довгострокова безпека залишків радіоактивних матеріалів [2].

На сьогодні критерії безпечного стану ОУ та, зокрема, неорганізованих скупчень ПВМ, при знаходженні ОУ під НБК, однозначно і систематично не визначені.

В рамках двостороннього співробітництва організацій «Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit mbH» (GRS) і «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» (ДНТЦ ЯРБ) виконується цикл робіт з дослідження факторів, які визначають безпечний стан ОУ під НБК.

На першому етапі циклу робіт виконаний аналіз факторів, що визначають безпечний стан ОУ в складі НБК [3], за результатами якого було визначено підхід щодо встановлення умов і критеріїв безпечного стану ОУ під НБК.

На наступному етапі були розроблені методичні рекомендації щодо встановлення критеріїв прийнятності/неприйнятності стану ПВМ з точки зору безпеки, а також щодо обсягів моніторингу ПВМ з метою контролю, наскільки стан ПВМ відповідає встановленим критеріям [4].

Надалі планується виконання досліджень процесів в ОУ, пов'язаних з поширенням радіоактивності від ПВМ, зокрема, визначення залежностей перенесення радіоактивності в повітрі ОУ від характеристик пилу на скупченнях ПВМ і повітропотоків в приміщеннях ОУ.

Граничні умови по впливу ОУ на середовище в основному об'ємі НБК, з використанням яких спроектований НБК, включають обмеження поточних і потенційних впливів ОУ, зокрема: обмеження викиду радіоактивних речовин з ОУ в основний об'єм НБК, обмеження виходу забрудненої води з ОУ, запобігання критичності в скупченнях ПВМ.

Найбільші ризики пов'язані з викидом радіоактивних речовин з ОУ. Проектним параметром, що характеризує обмеження викиду радіоактивних речовин з ОУ в основний об'єм НБК, є об'ємна активність радіонуклідів в повітрі основного об'єму НБК. Допустимий викид в навколишнє середовище буде не перевищено при роботі системи вентиляції основного об'єму НБК без фільтрів, якщо об'ємне забруднення повітря не перевищує  $40 \text{ Бк/м}^3$  [4].

У поточному стані ПВМ поширення радіонуклідів відбувається шляхом підйому і поширенню дрібнодисперсного пилу (аерозолів) в повітрі і шляхом поширення розчинних форм ПВМ з водою. З огляду на небезпеку поточних негативних впливів найбільш критичними характеристиками стану ПВМ є: інтенсивність деструкції ПВМ і відповідного утворення пилу (аерозолів), а також характеристики пилу (аерозолів), зокрема, дисперсність; інтенсивність вилуговування радіонуклідів.

Існують також небезпеки потенційного негативного впливу ПВМ, зокрема: виникнення критичності; значні переміщення скупчень ПВМ, в тому числі, в результаті обвалення конструкцій в приміщеннях, де знаходяться скупчення ПВМ.

Надаються методичні рекомендації по встановленню критеріїв безпечного стану ПВМ за такими параметрами:

– об'ємна активність і дисперсність радіонуклідів в повітрі основного об'єму НБК, біля скупчень ПВМ;

– кількість і характеристики пилу на скупченнях ПВМ;

– питома активність і хімічний склад води, що проходить через скупчення ПВМ;

– щільність нейтронного потоку в скупченнях ПВМ і біля них;

– наявність води в скупченнях ПВМ;

– геометричні конфігурації скупчень ПВМ.

За цими параметрами також надаються рекомендації щодо обсягів моніторингу ПВМ, враховуючи критерії безпечного стану ПВМ [5].

Планується проведення досліджень для визначення залежностей перенесення радіоактивності в повітрі ОУ від характеристик пилу на скупченнях ПВМ і повітропотоків в приміщеннях ОУ, які будуть включати:

– систематизацію та аналіз існуючих даних і прогнозних оцінок, які впливають на перенесення радіоактивності від скупчень ПВМ в повітрі ОУ;

– аналіз основних процесів відділення аерозолів і пилу від різних типів ПВМ на основі існуючих даних;

– аналіз моделей і отриманих результатів досліджень поширення радіоактивності в повітрі ОУ;

– аналіз практичного застосування результатів досліджень для подальшої експлуатації системи НБК-ОУ.

#### **Список використаних джерел:**

1. Стратегія перетворення об'єкта «Укриття».
2. Стратегія вилучення ПВМ та поводження з РАВ. SIP-PMU P7.
3. Аналіз факторів, що визначають безпечний стан об'єкта «Укриття» в складі нового безпечного конфайнмента.
4. Технологічний регламент об'єкта «Укриття реактора блоку № 4 Чорнобильської АЕС». 1Р-ОУ.
5. Розробка методичних рекомендацій з моніторингу стану паливовмісних матеріалів при експлуатації нового безпечного конфайнмента.

# ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАЛИВНИХ ШАРІВ ДЛЯ РІШЕННЯ ЗАДАЧІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ФРОНТУ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ В ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ РОТЕРМЕЛА

*Лев Т. Д., Кузьменко Ю. І., Гавловська Л. В., Піскун В. М.  
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,  
вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна  
e-mail : tatianalev46@gmail.com*

Досліджена і застосована технологія ідентифікації (параметризації) паливних моделей із використанням системи FCCS (Fuel Characteristic Classification System), яка узагальнює і класифікує характеристики палива в природних ландшафтах і розраховує потенційну поведінку під час пожежі з урахуванням вхідних змінних середовища. Для території Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) було створено спеціалізоване геоінформаційне забезпечення, що включає актуальні карти рослинного покриву і базу даних з інформацією, що містить всі необхідні вхідні параметри для FCCS. Для території ЧЗВ створена карта стандартних паливних моделей з параметрами, які необхідні для моделі горіння і розповсюдження пожежі Ротермела. На основі змодельованих в FCCS довжин полум'я та швидкостей розповсюдження вогню за умов стандартного екологічного сценарію визначено відповідності між паливними шарами і стандартними моделями палива.

**Ключові слова:** зона відчуження, паливні моделі, геоінформаційний аналіз, система класифікації, характеристики палива.

The technology of identification (parameterization) of fuel models has been studied and applied using the FCCS (Fuel Characterization Classification System), which summarizes and classifies the characteristics of fuels from natural areas and calculates potential fire behavior taking into account environmental parameters. A specialized geographic information support for the Chernobyl Exclusion Zone (ChEZ) has been created, which contains up-to-date vegetation maps and a database containing all the necessary input parameters for the FCCS. A map of fuel layers with the parameters necessary for calculating the spread of fire according to the Rothermel model for the ChEZ has been created. In accordance with the structure of the FCCS classification system and the technology of data processing and identification, a category of layers, consisting of 20 fuel models, was identified and analyzed for the territory of the ChEZ. Based on the FFT simulated flame length and fire spreading rate under a standard environmental scenario, the transitions in the fuel layers were determined by standard fuel models. Models of the categories were defined: GS1, TL3, TL4, TL5, TL6, where the main fire carrier in the GS fuel models is grass and shrub combined, and in the TL fuel models - dead wood fuel.

Розвиток пожежі, як правило, відбувається в неоднорідному середовищі, яке представлене безліччю типів природних горючих матеріалів з різними властивостями. Динаміка розвитку пожежі значною мірою обумовлена: впливом різних атмосферних процесів, складом і станом горючих матеріалів в середовищі поширення вогню. У даний час існує велика кількість моделей поведінки природних пожеж, які спрямовані на максимально точний опис процесів, що впливають на динаміку лісових пожеж. Це пов'язано з наявністю великого різноманіття характеристик горючого матеріалу і локальних природних умов [1,2]. Система FCCS являє собою програмний комплекс, який узагальнює і класифікує характеристики палива в природних умовах і розраховує потенційну поведінку вогню під час пожежі і потенціал небезпеки на основі вхідних змінних середовища [1-3]. У систему класифікації характеристик палива FCCS входить база даних з глобальним набором паливних шарів (<https://www.landfire.gov/fccs.php>) [1-3]. Набір даних був розроблений на основі різних просторових змінних, заснованих на продуктах супутникового спостереження Землі і базах даних з палива, і складається з глобальної карти паливного шару і бази даних, яка включає параметри кожного паливного шару, які впливають на поведінку і наслідки пожежі. Всього було створено і параметризовано 359 паливних шарів, які можуть бути введені в FCCS для отримання потенціалів загоряння, поведінки поверхневих пожеж і вуглецевої біомаси для кожного паливного шару. У FCCS паливні шари являють собою структуру і склад палива з природних джерел і можуть відповідати широкому діапазону характеристик палива в шести горизонтальних шарах палива, званих підшарами.

Еталонні паливні шари FCCS були складені на основі опублікованої літератури, серій фотографій палива, наборів даних про інші види палива і думок експертів. Мультиорганізаційна програма LANDFIRE<sup>1</sup> (LF) по паливу пов'язана з іншими програмами з картографії та з даними досліджень пожежної безпеки та навколишнього середовища ([https://www.landfire.gov/lf\\_remap.php](https://www.landfire.gov/lf_remap.php)).

Паливні шари FCCS відображені в LF і попередньо завантажені в додаток «Fuel and Fire Tools (FFT)» [7]. Паливний шар може являти собою будь-який масштаб, який вважається в основному однорідним. Оскільки паливні шари FCCS не залежать від масштабу, їх легко нанести на карту, і результати розрахунків можуть бути легко включені в геопросторовий аналіз.

Залежно від категорії або виду пожежі (верхова пожежа - горять крони дерев; поверхнева, низова пожежа - горить лісова підстилка, підлісок; ґрунтова, торф'яна - торф, тліючі залишки, деревне сміття і т.д.) - структуровані паливні шари. Кожен паливний ресурс складається з шести шарів, які включають деревний навіс, чагарники, трав'янисту рослинність, деревне паливо, сміття-лишайник-мох і наземне паливо. Паливні шари далі діляться на категорії та підкатегорії, паливні відсіки, що представляють поширені види палива, які доступні в довідковій бібліотеці FCCS. Паливну

---

<sup>1</sup> LF є повністю інтегрованою національною інформаційною системою даних, що розробляє і поліпшує дані про рослинність та паливі

модель<sup>2</sup> можуть налаштувати відповідно до реальних умов на майданчику. Система FCCS видає наступні результати:

1) характеристики палива в залежності від рівня палива, шару, категорії і підкатегорії;

2) параметри поведінки поверхневого вогню (тобто інтенсивність реакції, *швидкість поширення і довжину полум'я*);

3) оцінки пожежонебезпеки FCCS поведінки поверхневої пожежі, поведінки коронної пожежі, і доступні види палива.

Система FCCS дозволяє: 1) систематизувати дані про паливо разом з числовими вхідними даними для поведінки пожежі, ефектів пожежі та динамічних моделей рослинності, 2) розраховувати характеристики палива, звертаючись до існуючих описів паливних шарів (прототипи паливних шарів), використовуючи загальну інформацію, таку як екорегіон, форма рослинності і тип покриття.

Алгоритм підготовки та створення паливних моделей для ЧЗВ з використанням системи класифікації FCCS включає наступні кроки обробки та ідентифікації даних:

1. Вибір наземного біома (terrestrial biome), який здійснюється відповідно до карти, що використовується в FCCS і представленої на інформаційному ресурсі (<http://www.theglobaleducationproject.org/earth/global-ecology.php#3> ). Для території України (Українське Полісся) вибираємо біом, рівний 4 - (temperate broadleafforest - помірний широколистяний і вічнозелений ліс).

2. Вибір Європейського регіону з Глобальної карти паливних моделей [6], розташованої на ресурсі: <http://store.pangaea.de> .

3. Засобами ГІС «ArcGIS 10.2» виділяється дослідний регіон ЧЗВ з використанням регулярної сітки з кроком 250x250 м і глобальної карти паливних моделей, конвертується в універсальний формат для роботи з настільною ГІС MapInfo.

4. Проводиться аналіз Бази даних з параметрами паливних моделей і визначається зв'язуючий унікальний елемент. Цим елементом є номер паливної моделі (JOINVALUE).

5. У відповідності з категорією і структурою паливних шарів [6] для кожної обраної паливної моделі (JOINVALUE) для території ЧЗВ підбираються параметри з Бази даних.

FCCS узагальнює і розраховує характеристики палива для кожного шару, категорії і підкатегорії паливного шару. Характеристики включають відсоток покриття, глибину (в футах або дюймах), загальне навантаження палива (т/акр), навантаження живого палива (т/акр), навантаження мертвого палива (т/акр), індекс площі палива аналогічно індексу площі листа (фут<sup>2</sup>/фут<sup>2</sup>), коефіцієнт укладання, щільність дерева (число/акр), висота дерева до живої крони (фут) і діаметр дерева на висоті грудей (фут). Ґрунтуючись на

---

<sup>2</sup> Паливна модель - це набір числових значень, який описує тип палива для математичної моделі і параметри якого можна змінювати в моделі палива

характеристиках палива і вхідних змінних навколишнього середовища FCCS прогнозує поведінку пожежі на поверхні, включаючи інтенсивність реакції в британських теплових одиницях на квадратний фут за хвилину (БТО/фут<sup>2</sup>/хв), швидкість поширення (фут/хв) і довжину полум'я (фут).

Щоб врахувати велику мінливість проективного покриття різними ярусами лісових насаджень (CC- CrownCoverage), відсоток покриття CC був розділений на три класи: 0-40% (клас а), 40-70% (клас в) і 70-90% (клас с) [2]. Значення 40% було присвоєно, тому що це граничне значення, яке використовується в FCCS, щоб вирішити, чи може відбутися поширення пожежі по навісу [3]. Поріг в 70% був призначений для поділу решти існуючого навісу на дві рівні частини.

Після визначення просторового розподілу паливних шарів для кожного шару палива (дерева, чагарники, трави, деревні види палива, підстилка і ґрунтові види палива) був призначений набір параметрів, що впливають на поведінку і наслідки пожежі.

У відповідності з викладеною структурою системи класифікації FCCS і технологією обробки та ідентифікації даних, для території ЧЗВ була виділена і проаналізована категорія шарів, що складається з **20** паливних моделей. У табл. 1 представлено розподіл паливних моделей за класами і за площами в % від території ЧЗВ. З таблиці видно, що лісова рослинність становить близько 56%, а трав'яна рослинність - близько 44% станом на 2009 р (VegetationContinuousFieldsYearlyL3 Global 250m, <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod44.php>).

Таблиця 1

Розподіл площ території ЧЗВ з ідентифікованими паливними моделями

Паливна модель	Назва паливної моделі	Клас та % покриття кроною	Площа, кв.км	% від усєї площі
4010	Культури: пшениця, ячмінь	-	122,9	3,9
4017	Культури: бульби	-	1,13	<1
4020	Мозаїчні культури / Рослинність: пшениця	1 кл;12,4	832,02	26,7
4027	Мозаїчні культури / Рослинність	1 кл;13,6	7,58	<1
4037	Мозаїчна рослинність / Культури: бульби	1 кл;15,4	9,63	<1
4150	Негуста рослинність	-	8,81	<1
4180	Куці-трави, що регулярно підтоплюються	-	0,17	<1
4030a	Мозаїчна рослинність / Культури: пшениця	1 кл;9,6	365,46	11,7

Паливна модель	Назва паливної моделі	Клас та % покриття кроною	Площа, кв.км	% усієї площі	від
4030b	Мозаїчна рослинність / Культури: пшениця	2 кл; 52,3	22,37	<1	
4061a	Широколистяні листяні дерева	1 кл; 24,2	153,88	4,9	
4061b	Широколистяні листяні дерева	2 кл; 56,0	142,40	4,57	
4061c	Широколистяні листяні дерева	3 кл; 73,4	1,53	<1	
4091a	Вічнозелені хвойні дерева	1 кл; 22,4	312,81	10,2	
4091b	Вічнозелені хвойні дерева	2 кл; 59,0	619,97	19,86	
4091c	Вічнозелені хвойні дерева	3 кл; 74,1	0,76	<1	
4100a	Мішані широколистяні та хвойні дерева	1 кл; 26,7	58,15	1,86	
4100b	Мішані широколистяні та хвойні дерева	2 кл; 59,6	377,6	12,13	
4100c	Мішані широколистяні та хвойні дерева	3 кл; 73,6	3,82	<1	
4110a	Мозаїчні дерева-чагарники/трави	1 кл; 17,0	75,88	2,43	
4110b	Мозаїчні дерева-чагарники / трави	2 кл; 55,8	0,35	<1	

Використовуючи Глобальну карту рослинного покриву (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod04.php>, Європейську частину) і зв'язану з картою Базу даних параметрів паливних моделей (через номер паливної моделі), була створена карта паливних шарів з категоріями і підкатегоріями, забезпечених параметрами для паливних моделей. Класифікаційна карта паливних шарів (20 шарів) для території ЧЗВ представлена на рис. 1.

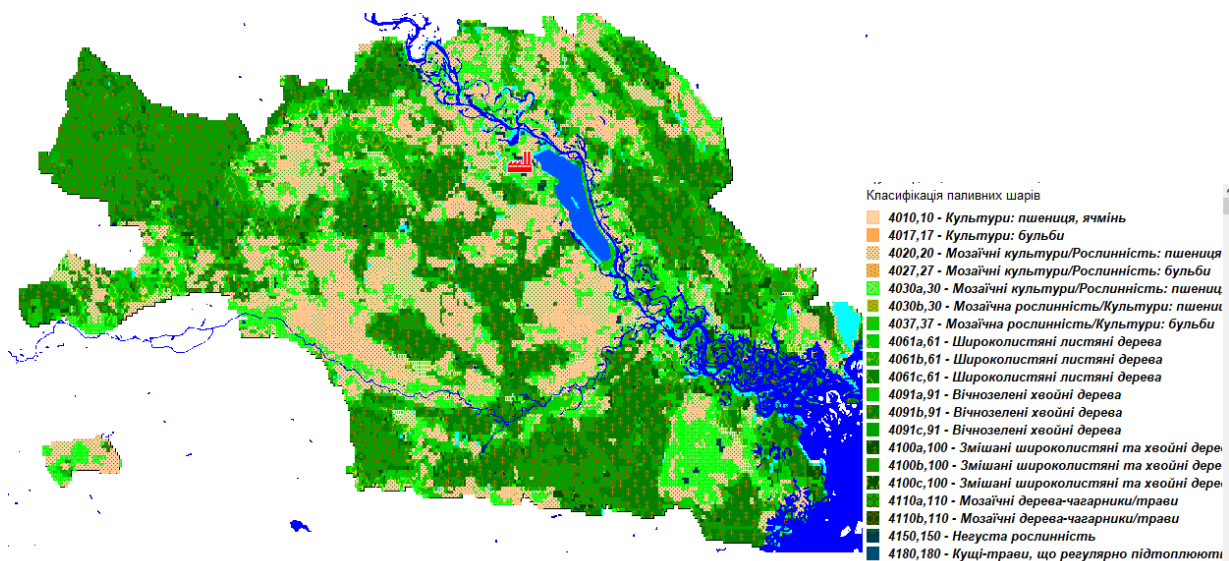


Рис. 1. Класифікація паливних шарів з використанням системи FFT, де 4 - означає наземний природний біом - лісова зона, а наступні цифри - назва і структура паливних шарів.

В рамках кожного розрахунку паливного шару (fuelbed), FFT визначає статичний перехід до однієї з 13 оригінальних моделей палива системи прогнозування поведінки вогню (FBPS) [8] і однієї з 40 стандартних паливних моделей поведінки вогню [9].

Перехід до однієї з 13 оригінальних моделей палива FBPS спочатку розраховується на основі групування типів рослинності і найбільш близької відповідності прогнозованої **швидкості поширення вогню R** (фут/хв.) і **довжині полум'я FL** (фут), які були попередньо розраховані в системі VENAVE v3.0 із використанням сценарію вологості D2L2 [12] і швидкості вітру на висоті середини полум'я 4 милі на годину і ухилом поверхні 0 відсотків, після чого вони порівнювалися з аналогічними значеннями, розрахованими для паливних шарів в системі FCCS 2.2. Пропонований перехід до стандартних 40 паливних моделей є лише рекомендацією, оскільки існує кілька стандартних моделей, які можуть передбачати поведінку під час пожежі, аналогічну будь-якому паливному шару FCCS.

**Алгоритм переходу до паливних моделей FBPS проводився наступним чином. Швидкість поширення і довжина полум'я характеризують клас пожежі (табл.1) при дотриманні умов - дві третини висушеного трав'янистого, сухого мертвого палива, швидкість вітру на висоті середини полум'я становить 4 милі/год, і нульовий ухил.**

Таблиця 2

Визначення характеристик класу для прогнозованої поведінки пожежі

Характеристика пожежі	класу	Швидкість поширення вогню R (фут/хв)	Довжина полум'я Fl(фут); 1 фут = 0.3048 m
Дуже низький		0-2	0-1
Низький		2-5	1-4
Середній		5-20	4-8
Високий		20-50	8-12
Дуже високий		50-150	12-25
Екстремальний		>150	>25

Прогнози поведінки пожежі спочатку групуються в три основні категорії на основі співвідношення швидкості поширення (R)<sup>3</sup> і довжини полум'я (FL)<sup>4</sup> і присвоюється паливна модель на основі їх прогнозованого FL або R [3]:

Ліс: співвідношення  $<3$ : 1 (т. Е.  $R = 3 FL$ ); модель =8,  $Fl < 2$ фут;

Низький чагарник і обрізки деревини або сміття:  $3: 1 \leq$  співвідношення  $<6$ : 1; модель =8,  $Fl < 2$ фут;

Трава: співвідношення  $\geq 6$ : 1; модель = 2,  $R < 36$  фут/мін.

<sup>3</sup> R - Швидкість поширення вогню на поверхні (R; фут/хв) - розраховується як відношення джерела тепла до поверхневого тепловідводу палива.

<sup>4</sup> FL - Довжина полум'я (FL; фут) - визначається як відстань між кінчиком полум'я і середньою точкою глибини полум'я біля основи полум'я.



Перехід за допомогою FCCS до стандартних паливних моделей відповідає процедурі, яка була визначена Скоттом і Бурганом [9]. Перший крок - перехід на одну з 13 оригінальних моделей, як зазначено вище (табл.1). Другий крок - обчислення відхилення прогнозованих R і FL у розрахунках за паливними шарами FCCS та моделями палива, що використовуються в BehavePlus [12], які були оцінені у сценарії D2L2, та швидкості вітру 4 милі/год. FCCS обчислює коефіцієнт співвідношення величини кожного прогнозного значення FL та R досліджуваного паливного шару до еталонних паливних моделей FBPS, і вказує на номер однієї з 40 стандартних моделей палива згідно матриці переходів, що була розроблена Скоттом і Бурганом [9].

У багатьох випадках FCCS вибирає одну із декількох близьких за параметрами моделей. Тому рекомендується розглянути альтернативні моделі, порівнюючи FFT та виходи BehavePlus, які можуть забезпечити кращий збіг поведінки вогню в діапазоні очікуваних паливних та погодних умов.

За описаними вище алгоритмами нами були опрацьовані 20 паливних шарів, які були визначено у межах ЧЗО, відповідно до глобального набору даних паливних шарів [6]. Для кожного паливного шару в систему FFT були введені відповідні унікальні набори параметрів, які пов'язані з паливними шарами і проведено розрахунки потенціалу вогню і прогнозу поведінки поверхневої пожежі. В результаті співставлень згідно співвідношень в табл. 1 для кожного паливного шару з глобального набору також було визначено так звані переходи (crosswalks) до однієї з 13-ти моделей FBPS і однієї з 40 стандартних моделей. За результатами розрахунків були побудовані карти паливних моделей для ЧЗО (рис.2), яка в подальшому може бути використана для розрахунків поведінки пожеж в системах GRASS GIS і FlameMap. Були визначені моделі категорій: GS1, TL3, TL4, TL5, TL6.

Наведемо характеристику паливних моделей з використанням даних з глобального набору 40 стандартних моделей:

GS1(модель 2) - Кущі мають висоту близько 1 фути, низька трава. Швидкість поширення помірна; довжина полум'я мала. Основним носієм вогню в паливних моделях GS є трава і чагарник разом узяті; обидва компонента важливі для визначення поведінки при пожежі.

Основним носієм вогню в паливних моделях TL є мертве деревне паливо. Живе паливо, якщо присутній, мало впливає на поведінку під час пожежі

TL3(модель 8) - Помірна підстилка хвойних порід. Швидкість поширення дуже низька; довжина полум'я низька.

TL4(модель 8) - Помірне навантаження, включаючи збиті колоди невеликого діаметра. Низька швидкість поширення; довжина полум'я мала.

TL5(модель 8) - Підстилка для хвойних порід з високим навантаженням. Швидкість поширення низька; довжина полум'я мала.

TL6(модель 8) - Підстилка широколистяних порід. Помірне навантаження, менш комп

актна. Швидкість поширення помірна; довжина полум'я мала.

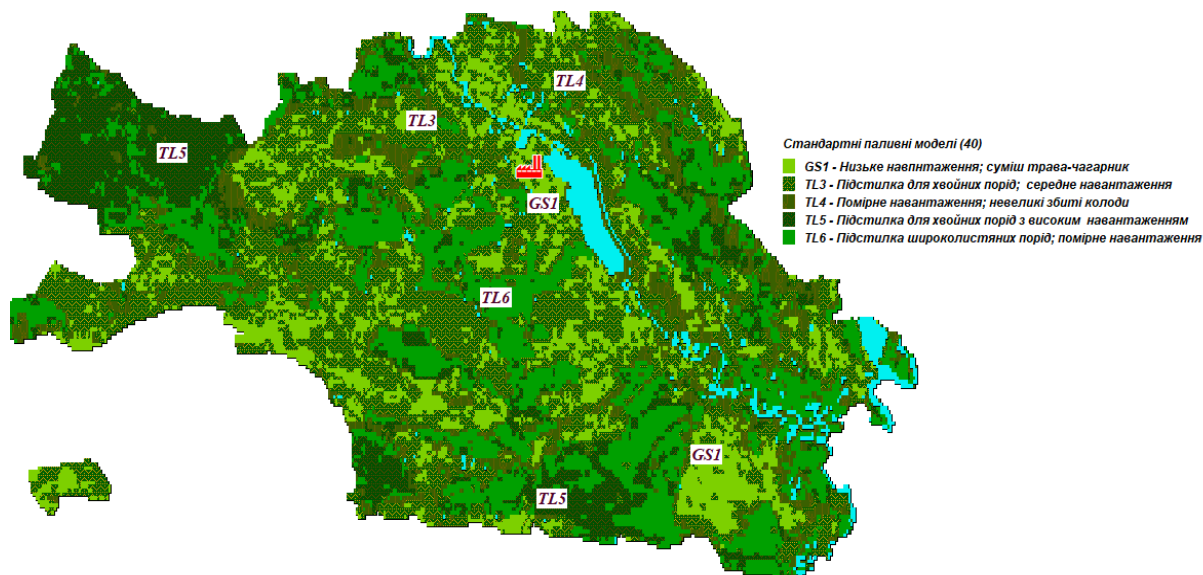


Рис. 2. Карта стандартних паливних моделей для території ЧЗВ (40).

Таким чином, для території ЧЗВ побудована карта паливних шарів з параметрами, необхідними для системи класифікації паливних моделей FCCS з метою ідентифікації номера паливної моделі, як вхідної інформації для прогнозу і поширення лісових пожеж за моделлю Ротермела. Були використані: Глобальні Бази даних характеристик паливних шарів (Global Fuelbed Dataset) і Глобальна карта рослинного покриву відкритого доступу (Global LandCoverage, 2009 р).

Отримані дані та побудовані картографічні покриття вимагають подальшої актуалізації та верифікації з використанням сучасних даних космічного зондування Землі (ДЗЗ) для території ЧЗВ.

#### Список використаних джерел:

1. Richard C. Rothermel. How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires / United States Department of Agriculture Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, UT 84401 General Technical Report INT-143 June 1983
2. M Lucrecia Pettinari (2015): Global Fuelbed Dataset. Department of Geology, Geography and Environment, University of Alcalá, Spain, PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.849808>
3. Susan J. Prichard, David V. Sandberg, Roger D. Ottmar., Fuel Characteristic Classification System Version 3.0: Technical Documentation. General Technical Report .PNW-GTR-887/ United States Department of Agriculture Forest Service.- December 2013
4. Richard C. Rothermel. A Mathematical Model For Predicting Fire Spread In Wildland Fuels/USDA Forest Service Research Paper INT-115. January 1972 - 48 p
5. Cynthia L. Riccardi, Susan J. Prichard, David V. Sandberg, and Roger D. Ottmar. Quantifying physical characteristics of wildland fuels using the Fuel Characteristic Classification System/ Can. J. For. Res. 37: 2413–2420 (2007)/ doi:10.1139/X07-175

6. M. Lucrecia Pettinari and Emilio Chuvieco. Generation of a global fuel data set using the Fuel Characteristic Classification System./ *Biogeosciences*, 13, 2061–2076, 2016. doi:10.5194/bg-13-2061-2016
7. Public LANDFIRE Reference Database DATA DICTIONARY SECTION I: DATA TABLES Version 1.0 29 August 2012/<https://www.landfire.gov/lfrdb.php>
8. Anderson, Hal E.; Aids to Determining Fuels Models for Estimating Fire Behavior. Gen. Tech. Rep. INT-122. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT. 22 p.
9. Joe H. Scott, Robert E. Burgan. Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel’s Surface Fire Spread Model/ General Technical Report RMRS-GTR-153 June 2005
10. Mark A. Finney. FARSITE: Fire Area Simulator—Model Development and Evaluation. Research Paper RMRS-RP-4 Revised March 1998, revised February 2004. DOI: <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-4>.
11. Mark A. Finney. An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities. In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. 2006. *Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings*. 28-30 March 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 213-220.
12. P.L. Andrews, C.D. Bevens, R.C. Seli. BehavePlus fire modeling system version 3.0 user's guide June 2005. [http://fire.org/downloads/behaveplus/2.0.2/bp2\\_overview.pdf](http://fire.org/downloads/behaveplus/2.0.2/bp2_overview.pdf) .

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЮ ВИЛУГОВУВАННЯ ЗРАЗКІВ ОСКЛОВАНИХ РРВ МЕТОДОМ ПОДРІБНЕННЯ

*Македон В. В., Власенко М. І.,  
Балашевський О. С., Рибалка В. Б.*

*ВП НТЦ ДП «НАЕК «Енергоатом» відділ експериментальних досліджень  
відділення науково-технічної підтримки у  
м. Одеса, місто Одеса,  
rybalka\_valery@email.ua, v.makedon@ntc.atom.gov.ua.*

Дана робота була виконана з метою відпрацювання високочутливого експресного методу визначення гідролітичних властивостей скла, приданого для розробки скломатриць для іммобілізації радіоактивних відходів. Важливими якостями методики мають бути експерсніс визначення гідролітичних характеристик, чутливість та можливість врахування гідролітичних властивостей різних інших фаз, що можуть утворюватися при кристалізації скломаси.

У випадку тестування монолітних зразків (пластин) неможливо визначити гідролітичну стійкість скла, що має включення інших фаз, тому що значна частина фаз може не контактувати з середовищем, що вилуговує компоненти скла. Для вирішення цієї проблеми нами обраний варіант дослідження гідролітичної стійкості з використанням подрібнення зразків.

Згідно з ГОСТ Р 52126-2003 [1] «Відходи радіоактивні. Визначення хімічної стійкості затверділих високоактивних відходів методом тривалого вилуговування» можливо подрібнення зразків для подальшого дослідження, такий підхід у свою чергу дає можливість оцінити гідролітичні властивості різних фаз скла. Відповідно до ГОСТ Р 52126-2003 Подрібнені зразки використовують в наступних випадках:

- при неможливості відбору проб правильної геометричної форми (що ускладнює або унеможлиблює розрахунки площі відкритої геометричної поверхні);

- при низькій швидкості вилуговування радіонуклідів і компонентів скляної матриці (що робить можливим досягнення достатніх для вимірювання концентрацій елементів у розчині за заданий час).

При наявності цих проблем слід застосовувати штучне збільшення відкритої поверхні зразків подрібнення матеріалу і відбором відповідної фракції або зміною відношення площі поверхні зразка до його об'єму.

Відповідно до ГОСТ Р 52126-2003 середовище для вилуговування може бути таким: Середовищем для вилуговування є дистильована вода з питомою електричною провідністю не нижче 5 мкСм/см, що відповідає за якістю ГОСТ 6709 [2], водні розчини з хімічним складом, аналогічним хімічним складом підземних (грунтових) вод в зоні розташування передбачуваного сховища затверділих радіоактивних відходів.»

На наш погляд такі підходи, є занадто м'якими і не дають повної інформації стосовно хімічної стійкості скла. Оскільки по ГОСТ Р 52126-2003

Стандарт не розповсюджується на затверділі відходи, що знаходяться в умовах довготривалого зберігання та захороненні в глибоких геологічних формаціях, тому метод, встановлений даним стандартом, не враховує геохімічні та гідрологічні умови та не придатний для кількісної оцінки довготривалої стабільності відходів, що знаходяться в реальних умовах захоронення. Тому ми використали класичний метод, що використовується на виробництві скла [3]. Для більшої інформативності метод модифіковано та використано більш жорсткий підхід як до середовища тестування, так і до часу проведення іспитів.

Таким чином випробування проводили на зразках хімічного, харчового (коричневого №1 і зеленого №2) та свинцевого скла в дистильованій воді та розчинах 2н NaOH, 1н Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> та 2н H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> на протязі 4 годин при температурі 96-98°C.

### Результати та їх обговорення

Результати дослідження відображенні на графіках (Рис.1) залежності ступеню вилугування монолітного та подрібненого зразку. З даних графіків видно, що порядок гідролітичної стійкості є однаковим для всіх видів розчинів, в яких проводили дослідження. Відсутність лінійної кореляції цілком можливе внаслідок особливостей хімічного складу окремих зразків та жостких умов випробувань.

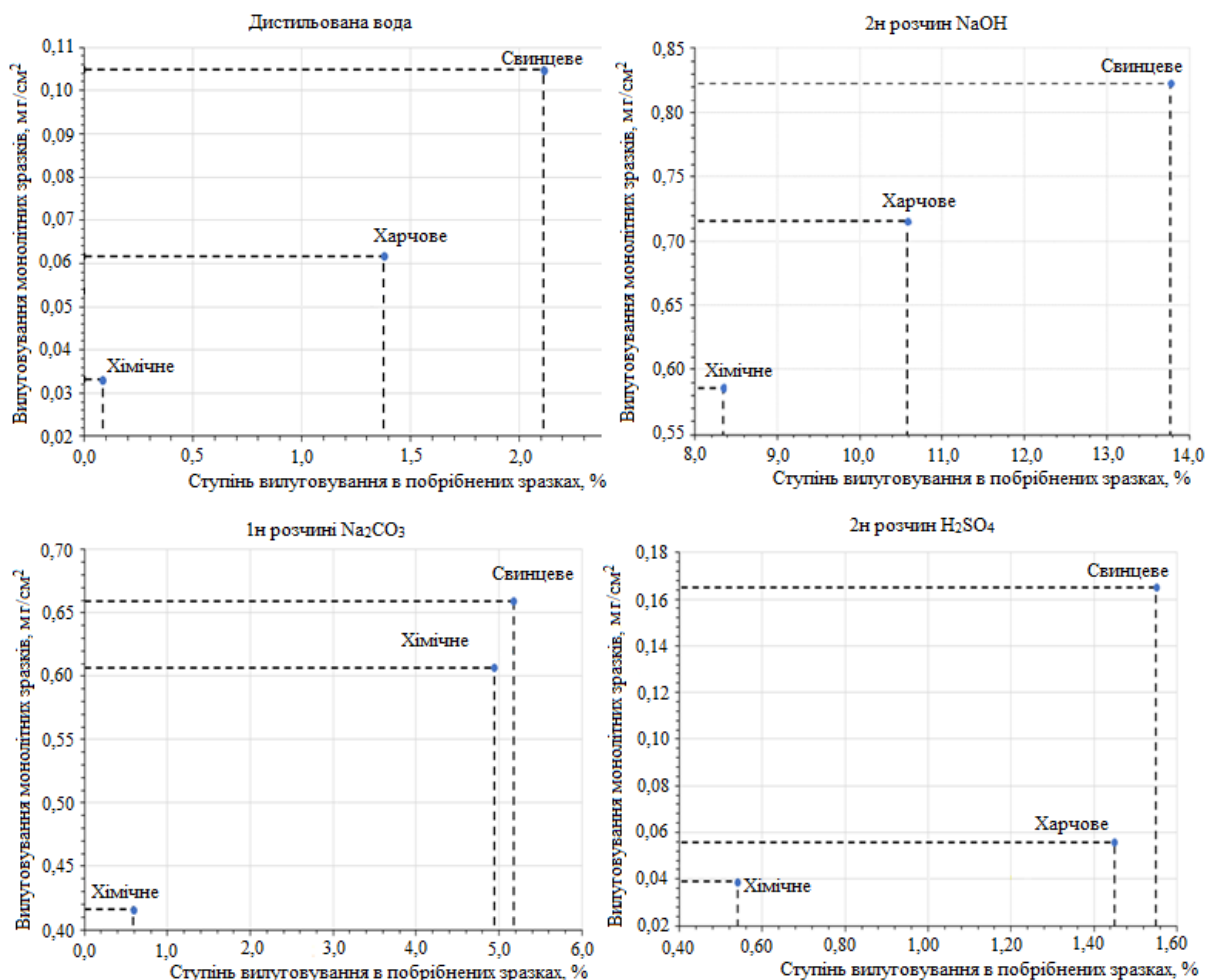


Рис.1 Графіки залежності ступеню вилугування монолітного та подрібненого зразку в різних розчинах.

## **Оцінка чутливості тестування гідролітичної стійкості з використанням дроблення.**

Приймаємо, що частинки подрібнених зразків являють собою сферу. Площа поверхні сфери  $S=\pi D^2$ . Об'єм сфери  $V=(4/3)*\pi R^3$ .

В роботі використовувалися зразки більше 0,3 мм і менші 0,5 мм.

$D=0,3$  мм,  $S=0,28$  мм<sup>2</sup>;  $D=0,4$  мм,  $S=0,50$  мм<sup>2</sup>,  $D=0,5$  мм,  $S=0,78$  мм<sup>2</sup>.

Прийmemo як середньої величини діаметр 0,4 мм тоді площа поверхні 0,50 мм<sup>2</sup>.

При густині скла  $\rho = 2,55 \div 2,6$  мг/мм<sup>3</sup>. Маса однієї сфери діаметром 0,4 мм буде рівна 0,169 мг.

Виходячи з цього отримуємо, що наважка зразку масою 2г буде включати в себе:  $2000 \text{ мг} / 0,169 \text{ мг} = 11800$  сфер.

При цьому загальна площа поверхонь сфер:  $11800 * 0,50 \text{ мм}^2 = 5900 \text{ мм}^2$ .

Втрата при вилуговуванні склали 0.25%, що в свою чергу дорівнює:  $2000 \text{ мг} * 0,25 / 100 = 5 \text{ мг}$ , що становитиме до загальної площі частинок скла:  $5 \text{ мг} / 5900 \text{ мм}^2 = 8,5 * 10^{-4} \text{ мг/мм}^2 = 8,5 * 10^{-7} \text{ г/мм}^2 = 8,5 * 10^{-5} \text{ г/см}^2$ .

Чутливість аналітичних ваг і ретельність виконання процедур дозволяє визначати втрати на 1,5-2 порядки менші, що в цілому дає чутливість методики контролю гідролітичної стійкості на рівні  $10^{-6} \text{ г/см}^2$ .

Згідно з принципом Ле-Шательє при підвищенні температури на кожні 10°C швидкість реакції збільшується в 2-4 рази. Приймаємо коефіцієнт рівний  $K=3$ . Враховуючи те, що наші дослідження проводилися при температурі 96-98°C, збільшення швидкості реакції відбувалося 8 разів, тобто  $K_{\text{заг}} = 3^8 = 9 * 9 * 9 * 9 \approx 6500$  раз, отримуємо що швидкість протікання реакції збільшилась в 6500 разів за добу.

У нашому випадку дослідження відбувалися протягом 4 доби, що відповідає 1/6 частині доби, отримуємо збільшення швидкості реакції:  $6500 : 6 \approx 1100$  раз.

Враховавши це та перерахувавши втрати при вилуговуванні отримаємо:

$8 * 10^{-5} \text{ г/см}^2 / 1100 = 8 * 10^{-8} \text{ г/см}^2$  при втраті маси 0,25 % від загальної маси.

Відповідно при втраті маси 1% вилуговування буде на рівні  $3,2 * 10^{-7} \text{ г/см}^2$

Таким чином важливим для нас є той факт, що повний цикл дослідження якостей скла по такому методу може бути проведено за 2-3 доби замість декількох місяців.

### **Висновок:**

Показано, що метод дослідження подрібнених зразків дозволяє дослідити зразки різної форми, враховувати гідролітичні властивості окремих включень іншого хімічного складу, що виникають внаслідок нерівномірної кристалізації, локального перерозподілу концентрацій компонентів скла, тощо.

Також даний метод дозволяє проведення повного циклу плавка скла - дослідження вилуговування за 2-3 доби, що значно скорочує час дослідження на відміну від дослідження монолітних зразків.

### **Список використаних джерел:**

1. ГОСТ Р 52126-2003. Отходы радиоактивные. Определение химической устойчивости отвержденных высокоактивных отходов методом длительного

выщелачивания – Москва: в-во ГОССТАНДАРТ РОССИИ 2003. - 8 с.

2. ГОСТ 6709-72 Вода дистиллированная. Технические условия – Москва: в-во Стандартиформ 1974. - 12с.

3. Учебник для узов: В 2т. / За заг. ред. И.И. Китайгородский. - М.; Л. : Гос. в-во легкой пр-ти, 1939. - Т. 1 : Технология стекла / Упоряд. О.К. Ботвинкин и др. – 583 с.

4. ISO 719-85 Стекло. Гидролитическая стойкость стеклянных гранул при 98 °С. Метод испытания и классификация – Москва: в-во Калужська типография стандартов 1987. - 12с.

# ОБГРУНТУВАННЯ КОНСЕРВАТИВНОГО РОЗПОДІЛУ ІЗОТОПНОГО СКЛАДУ В ТВЗ ВВЕР-440 ДЛЯ АНАЛІЗУ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ПАЛИВА

*Мамчич Юлія Русланівна*

*tatciculia41@gmail.com*

*Секретаріат Комітету з питань енергетики  
та житлово-комунальних послуг*

**Анотація.** В статті представлено обґрунтування консервативного розподілу ізотопного складу в ТВЗ ВВЕР-440 для аналізу ядерної безпеки систем зберігання палива, із застосуванням принципу «burnup-credit» без зниження існуючого рівня ядерної безпеки.

Розроблені моделі, підходи та рекомендації для задання ізотопного складу при використанні глибини вигорання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), як фактору безпеки при аналізі безпеки систем поводження з відпрацьованим паливом реакторів ВВЕР-440 для зниження надлишкового консерватизму, відповідно до якого все паливо вважається свіжим. Це дозволяє більш реально оцінити розмножуючі властивості опроміненого палива та, виходячи з цього, максимально заповнити систему поводження з паливом та зменшити необхідну кількість додаткових поглиначів для підтримки регламентованого рівня підкритичності. Завдяки цьому знижується вартість поводження з ТВЗ та кількість радіоактивних відходів ядерної установки в цілому.

**Ключові слова:** вигорання палива, консервативне значення, ізотопний склад, відпрацьоване паливо, HELIOS, SCALE, WIMS.

**Вступ.** Поводження з ядерним паливом є ключовим питанням аналізу безпеки для багатьох країн, що працюють з атомними електростанціями або виведеними з експлуатації. У сфері аналізу ядерної безпеки на даний час знайшов застосування так званий кредит на вигорання («burnup-credit»), що дозволяє реалізувати більш економічно ефективно поводження відпрацьованим паливом та враховує збільшення підкритичності відпрацьованого палива внаслідок вигорання.

**Актуальність теми.** Згідно вимог безпеки під час поводження з ядерним паливом нормативного документа України (НП306.2.221-2019), аналіз безпеки (критичності) систем зберігання та поводження з ЯП виконується з використанням консервативних підходів «Опромінене ядерне паливо чи відпрацьоване ядерне паливо розглядається як свіже, якщо Кеф під час вигорання зменшується, за винятком випадків, коли глибина вигорання використовується, як параметр ядерної безпеки». За цих умов для деяких систем зберігання та поводження з ЯП (неущільнені стелажі) критерій прийнятності  $K_{eff} < 0.95$  не виконується. Для аналізу безпеки таких систем необхідне використання принципу «burnup-credit», що допускається НП306.2.221-2019, але для застосування підходу необхідно обґрунтувати



початкові умови, перш за все ізотопний склад відпрацьованого палива.

**Об'єкт дослідження** – застосування підходу врахування глибини вигорання для аналізу безпеки (критичності) систем поводження з відпрацьованим ядерним паливом ВВЕР-440.

**Предмет дослідження** – аналіз зміни ізотопного складу та обґрунтування його консервативного розподілу в ТВЗ ВВЕР-440 для реалізації підходу burnup-credit.

**Методи дослідження** – детерміністичні методи аналізу та порівняння даних, отриманих з літературних джерел та розрахунків. Метод комп'ютерного моделювання нейтронно-фізичних процесів у активних зонах, системах зберігання і транспортування ВЯП. Для аналізу розрахунків ізотопного складу ВЯП використовуються моделі для комплексів HELIOS, SCALE та розроблені моделі WIMS.

**Мета та задачі дослідження** запропонувати підходи для формування консервативного розподілу ізотопного складу ВТВЗ ВВЕР-440 для подальшого використання аналізу безпеки систем зберігання палива.

**Досягнення поставленої мети забезпечується шляхом виконання послідовності дослідницьких завдань:**

– розробити розрахункову модель для розрахунку ізотопного складу відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) для коду WIMS і виконання з допомогою даної моделі розрахунку зміни ізотопного складу та оцінки розмножуючих властивостей;

– вибір та обґрунтування переліку ізотопів для подальшого врахування в розрахунках критичності;

– визначення консервативного просторового розподілу ізотопного складу у ВЯП для аналізу підкритичності систем поводження з ВЯП із застосуванням принципу “burnup-credit”.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що отримані розрахунки, рекомендації та висновки аналізу розрахунку ізотопного складу дозволять зменшити існуючий консерватизм або уточнити реалістичну оцінку.

**Практичне значення одержаних результатів** досліджень матимуть потенційно важливе значення для обґрунтування ядерної та радіаційної безпеки систем зберігання та транспортування ВЯП і економічної ефективності експлуатації ядерних установок.

Для визначення ізотопного складу відпрацьованих збірок були використано три програми - американський пакет програм SCALE і програма HELIOS і було розроблено розрахункову модель для програми WIMS.

**Розрахунковий пакет програм SCALE, модуль TRITON.** Структурно пакет програм SCALE складається з розрахункових модулів (розрахункових послідовностей), які об'єднують програми, необхідні для вирішення тієї чи іншої розрахункової задачі (аналіз критичності, радіаційної безпеки, теплопередачі, розподілу ізотопного складу в залежності від вигорання).

Для розрахунку ізотопного складу відпрацьованого палива в залежності від вигорання в даній роботі був використаний розрахунковий модуль

TRITON. До складу цього модуля входить розрахунковий код NEWT, який дозволяє моделювати спектр нейтронів для різних геометричних систем в двовимірній геометрії шляхом вирішення многогрупового рівняння переносу нейтронів методом дискретних ординат. Всі ТВЗ моделювалися потвельно, Рис.1 – Ефективна щільність циліндричного уранового сердечника, яким моделювалася паливна частина твела, визначалася виходячи з загальної ваги палива в ТВЗ.

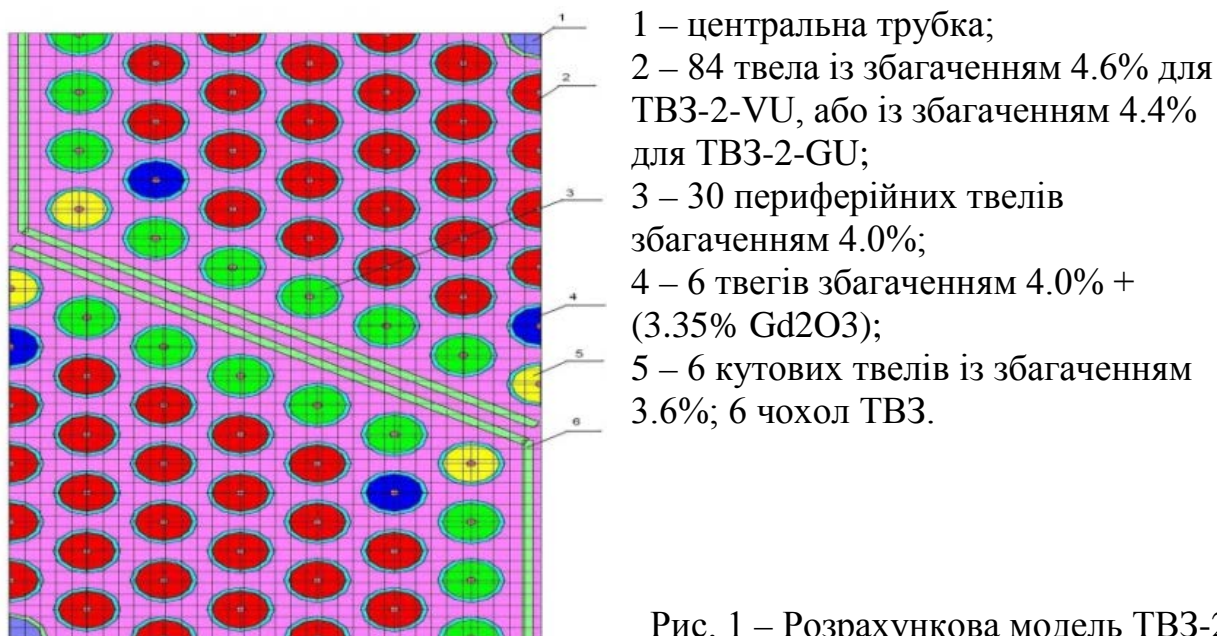


Рис. 1 – Розрахункова модель ТВЗ-2 ВВЕР-440, використана в модулі TRITON

**Результати розрахунків з використанням модуля TRITON.** За допомогою модуля TRITON було проаналізовано моделювання ізотопного складу ТВЗ-2 типу VU і GU для середніх параметрів ТВЗ в залежності від вигорання та часу витримки в БВ.

**Опис програмного коду HELIOS.** Код HELIOS призначений для виконання розрахунків просторово-енергетичного розподілу щільності потоку нейтронів паливних комірок ядерних енергетичних реакторів з урахуванням вигорання палива і вигоряючих поглиначів. Програма може розраховувати геометричну модель ТВЗ будь-якої складності: нерегулярно розміщені твели довільного радіуса і т.д. Рішення рівняння переносу нейтронів ґрунтується на методі зшивання струмів нейтронів для просторових елементів і ймовірності перших зіткнень всередині просторових елементів.

Розрахунок комірки виконується в двовимірній геометрії, що дозволяє адекватно моделювати геометрію і склад паливної збірки в поперечному перерізі (враховується місце розташування різних компонентів збірки таких, як: центральна трубка, тепловиділяючих елементів різного збагачення, тепловиділяючих елементів, що містять вигоряючий поглинач різної концентрації, чохол паливної збірки). Такий розрахунок дозволяє виконати просторово-енергетичну гомогенізацію ТВЗ і осередки будь-якого типу і

отримати для них малогруповий дифузійні константи в залежності від параметрів, що характеризують стан ТВЗ (температура, щільність теплоносія, концентрація борної кислоти, глибина вигорання і т.д.). Крім того, програма може використовуватися і для розрахунку ізотопного складу відпрацьованого палива. В даний час код HELIOS є однією з найбільш широко використовуваних у світовій практиці комп'ютерних програм, що застосовуються для всіх типів дослідних і енергетичних реакторів.

**Розрахункова модель ТВЗ-2 ВВЕР-440.** Нижче на рис.2 і 3 представлена розрахункова модель паливної касети ТВЗ і РК (в симетрії 60°), розроблена для програми HELIOS, і використовується в розрахунках за визначенням ізотопного складу відпрацьованого палива. Значення геометричних параметрів складових частин ТВЗ і матеріальний склад задавалися відповідно до даних, наведених в розділі 2. Ефективна щільність палива в твелах визначалася виходячи з загальної ваги і обсягу палива в ТВЗ. На зовнішній границі ТВЗ задаються дзеркальні граничні умови відображення нейтронів. На внутрішній границі задані умови періодичності.

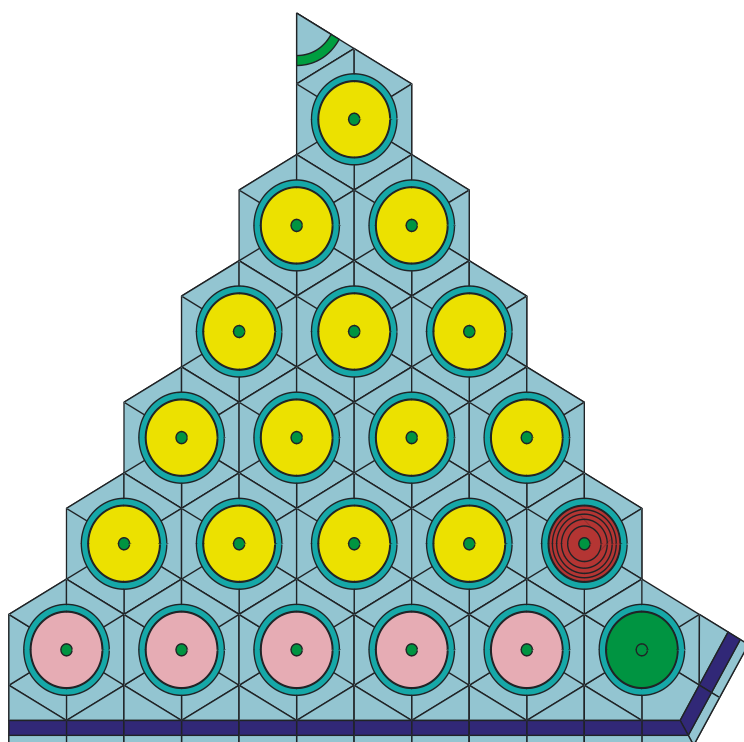


Рис. 2. Розрахункова модель ТВЗ-2 ВВЕР-440 тип VU, GU), реалізована в програмі HELIOS

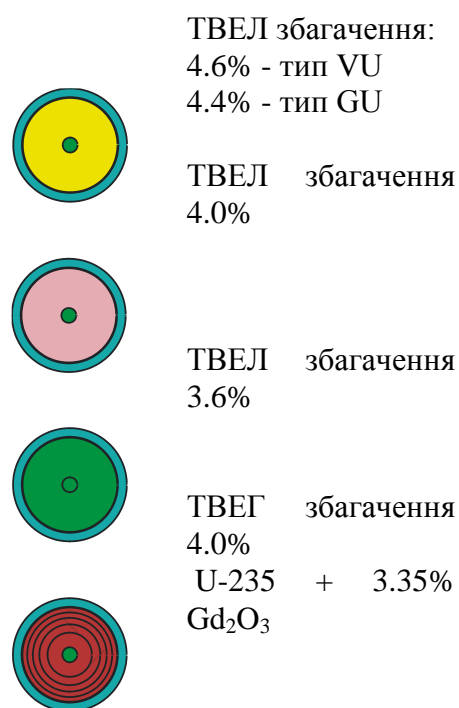


Рис. 3 – Типи твелів, які використовуються при створенні геометричної моделі ТВЗ-2 для програми HELIOS

**Результати розрахунків з використанням коду HELIOS.** Результати розрахунку усереднених по касеті ізотопів елементів та продуктів поділу, що діляться від глибини вигорання для ТВЗ-2 збагаченням 4.38% і 4.25%.

**Порівняння результатів визначення ізотопного складу відпрацьованих збірок за допомогою програм SCALE і HELIOS.**

Експериментальних даних придатних для повноцінного обґрунтування застосовності програм для розрахунку ізотопного складу відпрацьованих ТВЗ-2 реакторів ВВЕР-440 у відкритій літературі недостатньо. Крім того, опубліковані результати експериментальних робіт для палива реакторів ВВЕР-440 в більшості своїй відносяться до старих збірок більш низького збагачення і без використання вигоряючих поглиначів. Тому для оцінки коректності отриманих результатів доцільно проводити так звану кросс-верифікацію, зокрема, в рамках даної роботи було проведено порівняння результатів визначення ізотопного складу відпрацьованих збірок за допомогою програм SCALE та HELIOS.

На Рис. 4 – Рис. 13 наведені графіки зміни в залежності від вигорання різних ізотопів, таких, як U-235 (Рис. 4), U-238 (Рис. 5), U-236, Pu-239 (Рис. 6), Pu-240, Pu-241, Pu-242 (Рис. 7), Pu-238, Np-237 (Рис. 8), Gd-155, Gd-157 (Рис. 9) Gd-156 (Рис. 10), Ce-141, Eu-154 (Рис. 11), I-131, Xe-133 (Рис. 12), I-135, Xe-135 (Рис. 13) для обох типів ТВЗ-2 (VU і GU), отримані за допомогою програм SCALE і HELIOS.

Для більшості ізотопів спостерігається дуже гарний (в межах 3-4%) збіг результатів. Більш помітні відмінності (в межах 10% від максимального значення) спостерігаються для ізотопів Gd-155, Gd-157 (Рис. 9) на ділянці вигорання гадолінію (0-8 МВт\*добу/кг), а також для Pu-240, Pu-242 (Рис. 7) і Np-237 (Рис. 8) при великих глибинах вигорання (понад 40 МВт\*добу/кг).

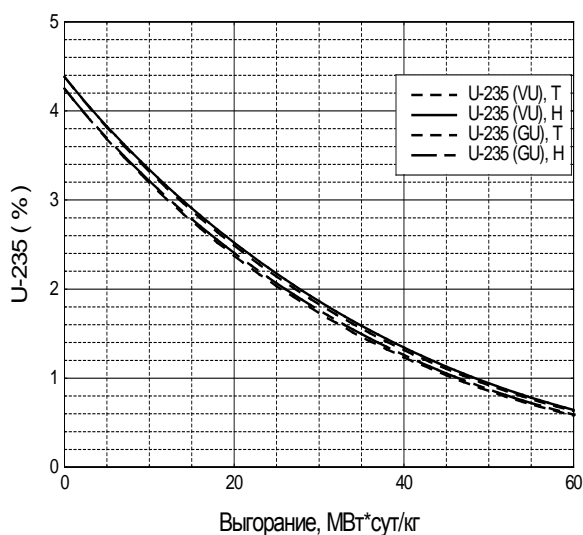


Рис. 4 – Зміна від вигорання концентрації U-235

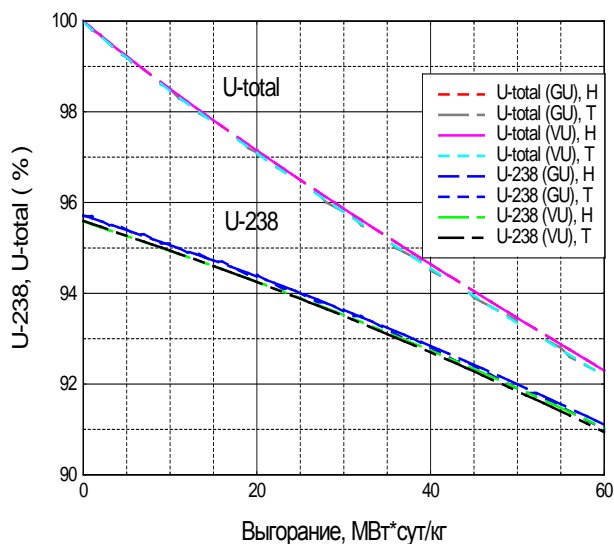


Рис. 5 – Зміна від вигорання концентрації U-238 і суми ізотопів урану

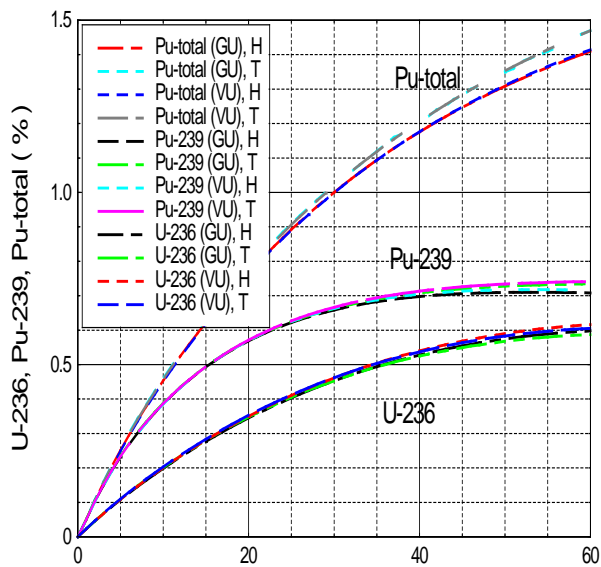


Рис. 6 – Зміна від вигорання концентрації U-236, Pu-239 і суми ізотопів плутонію

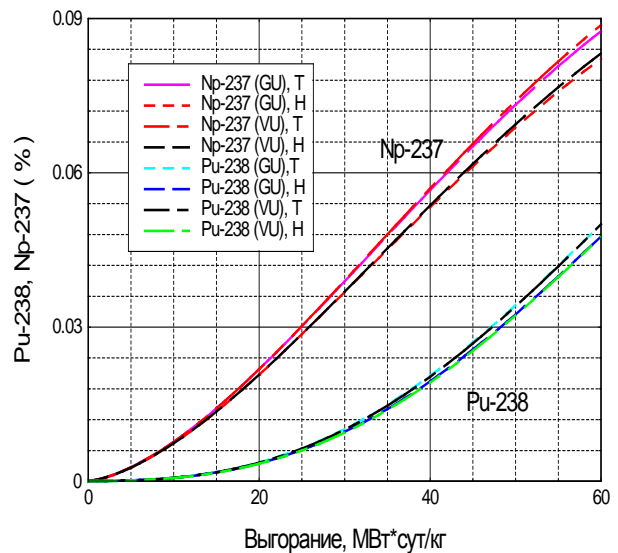


Рис. 7 - Зміна від вигорання концентрації Pu-240, Pu-241 і Pu-242

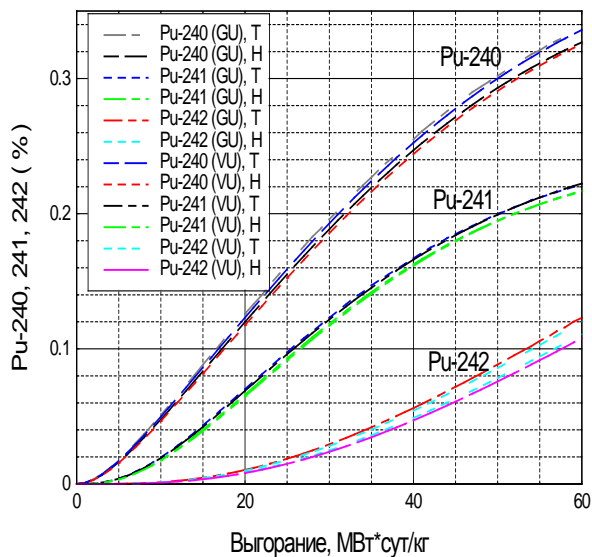


Рис. 8 – Зміна від вигорання концентрації Np-237 і Pu-238

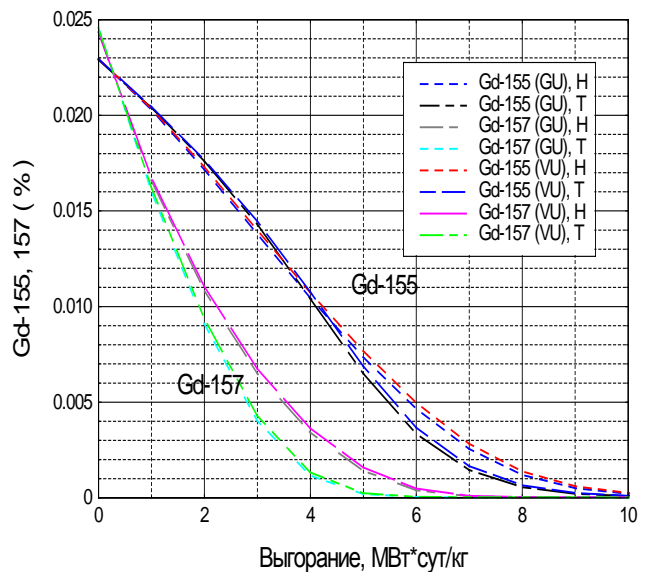


Рис. 9 – Зміна від вигорання концентрації Gd-155 і Gd-157



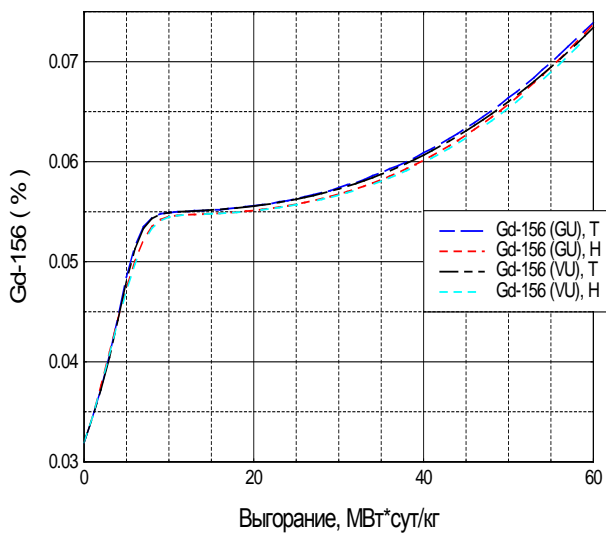


Рис. 10 – Зміна від вигорання концентрації Gd-156

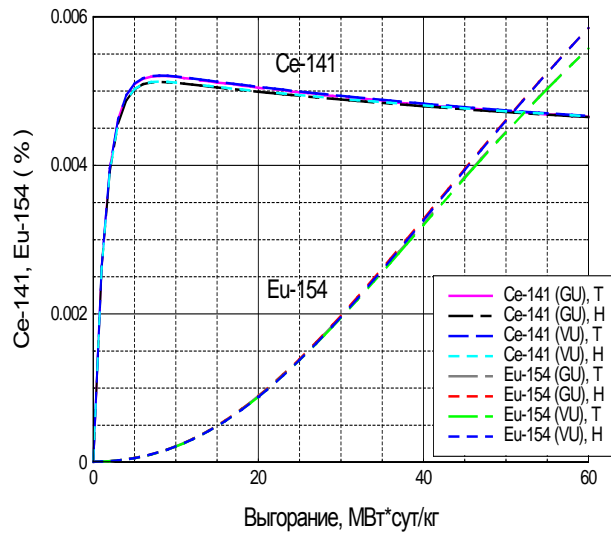


Рис. 11 – Зміна від вигорання концентрації Ce-141 и Eu-154

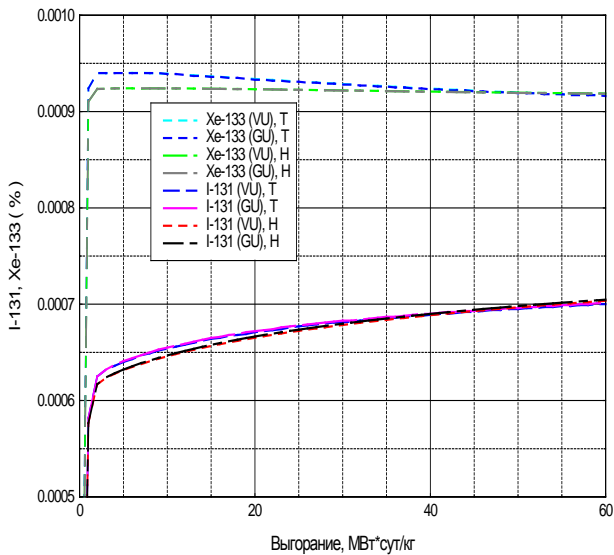


Рис. 12 – Зміна від вигорання концентрації I-131 і Xe-133

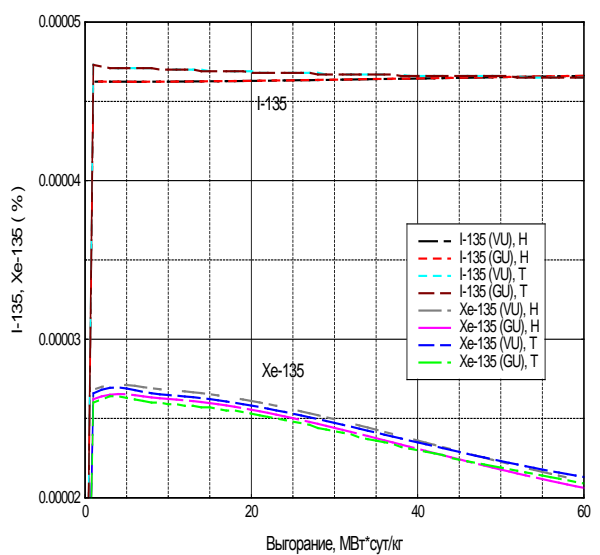


Рис. 13 – Зміна від вигорання концентрації I-135 і Xe-135

**Опис програмного коду WIMS.** Програмний продукт WIMS (Winfrith Improved Multigroup Scheme) — сімейство програмних кодів розрахунку чарунки реактора, яке дає змогу, ґрунтуючись на теорії перенесення нейтронів, розрахувати потік нейтронів залежно від енергії та положення в чарунці.

Транспортний код WIMSD-5B використовує метод ймовірності перших зіткнень для рішення дискретних по енергії і простору рівнянь переносу нейтронів, а також SN - метод дискретних ординат. Розрахункова схема коду WIMS заснована на теорії переносу нейтронів і дозволяє розрахувати залежність потоку нейтронів від енергії і положення в решітці. У програмі передбачено розрахунок наступних геометрій: гомогенне середовище; шарова решітка (включаючи пучки пластин); правильна решітка стрижнів; кластери в циліндричній геометрії; і циліндри в  $(r, z)$  геометрії.

**Розрахункова модель РК ВВЕР-440 в програмі WIMS.** Для виконання розрахунків по визначенню ізотопного складу відпрацьованого палива для РК 4.4% був розроблений вхідний файл до програми WIMS (Рис. 14). Значення геометричних параметрів складових частин РК і матеріальний склад задавалися відповідно до даних, наведених в розділі 2. Ефективна щільність палива в твелах визначалася виходячи з загальної ваги і обсягу палива в РК. Оскільки програма WIMS не дозволяє скомпонувати точне гексагональне розташування твел в касеті ВВЕР, в даній розрахунковій моделі використаний підхід конформного відображення гексагональної геометрії в круглу. При такому підході зберігаються всі параметри ТВЗ, що впливають на нейтронно-фізичні характеристики, зокрема, геометрія твел, матеріальний склад, уран-водне співвідношення.

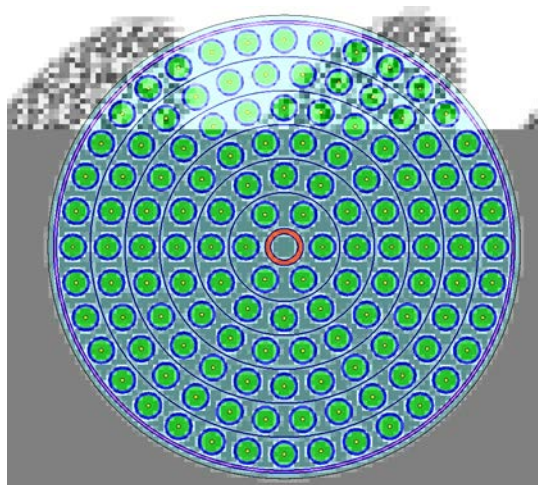


Рис. 14 – Розрахункова модель РК ВВЕР-440 для розрахунку ізотопного складу реалізована в програмі WIMS

**Валідація моделі у програмі WIMS.** На Рис. 15 - Рис. 16 наведені графіки зміни в залежності від вигорання різних ізотопів, таких, як U-235 (Рис. 15), U-236 (Рис. 16), Pu-239 (Рис. 17), Pu-240, Pu-241 (Рис. 18), Хе-135 (Рис. 19), які отримані за допомогою програмного коду HELIOS та розробленої моделі WIMS.

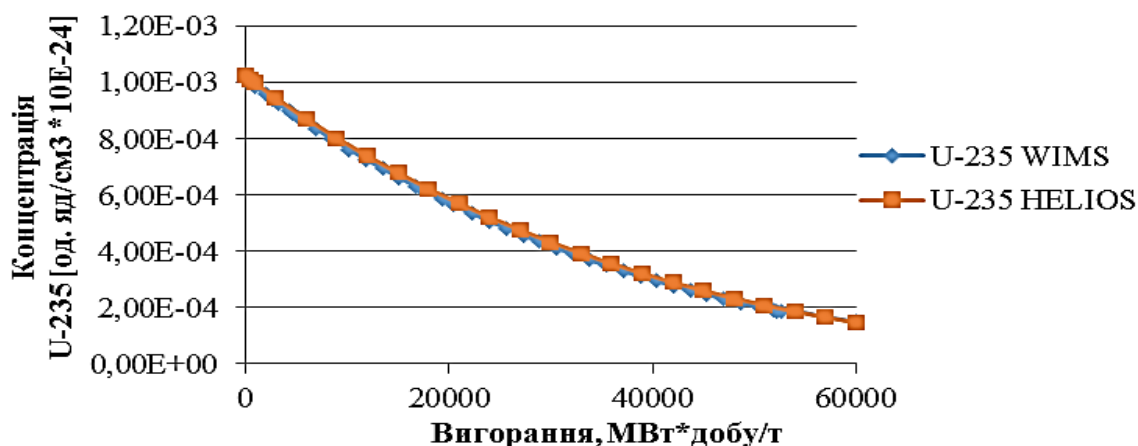


Рис. 15 – Зміна від вигорання концентрації U-235

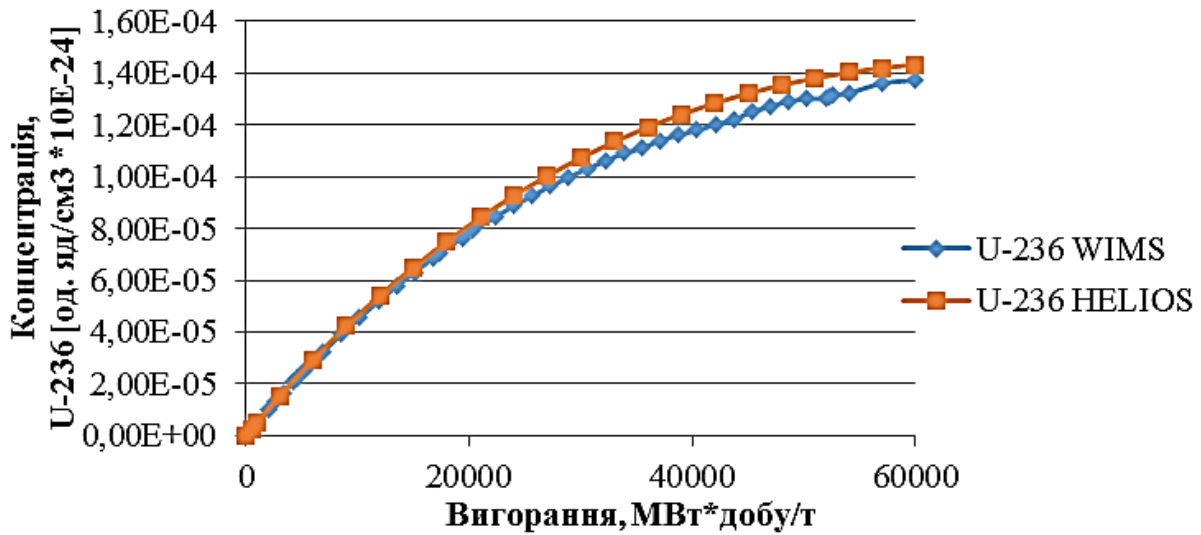


Рис. 16 – Зміна від вигорання концентрації U-236

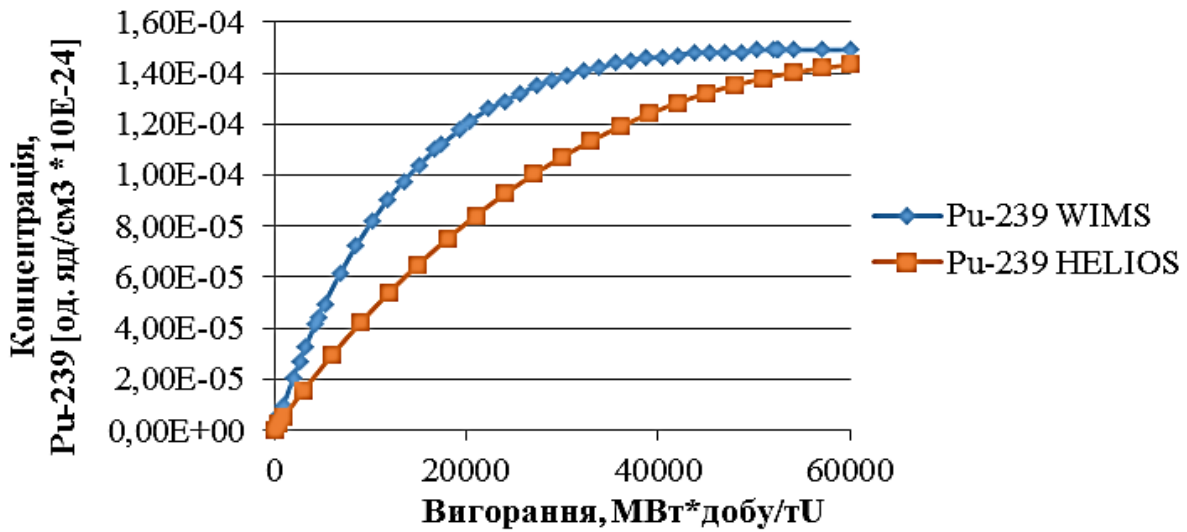


Рис. 17 – Зміна від вигорання концентрації Pu-239

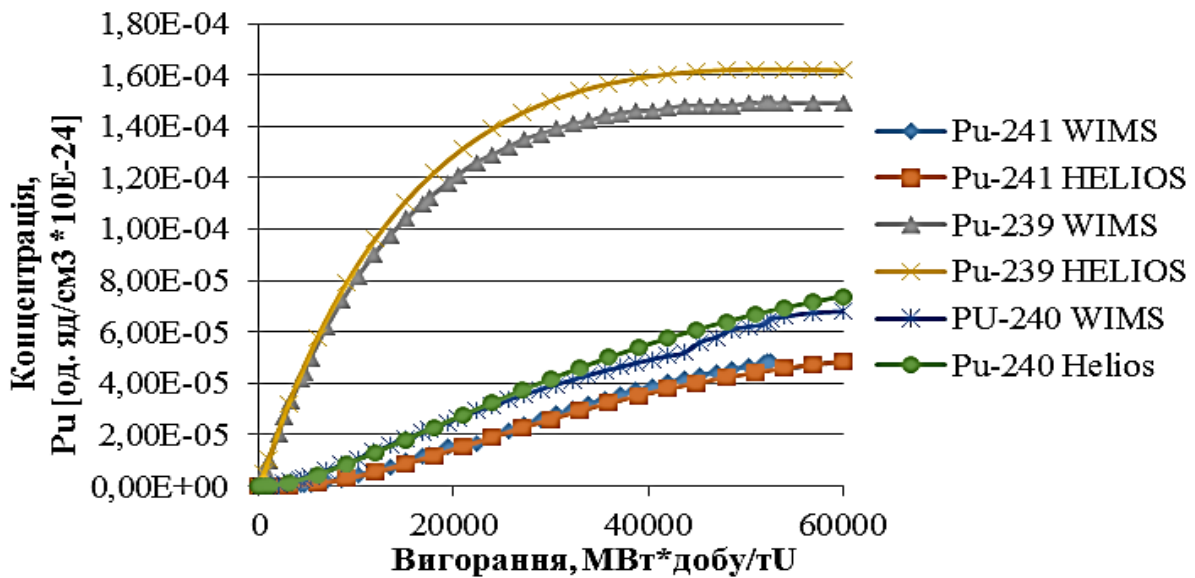


Рис. 18 – Зміна від вигорання концентрації Pu-240, Pu-239 та Pu-241



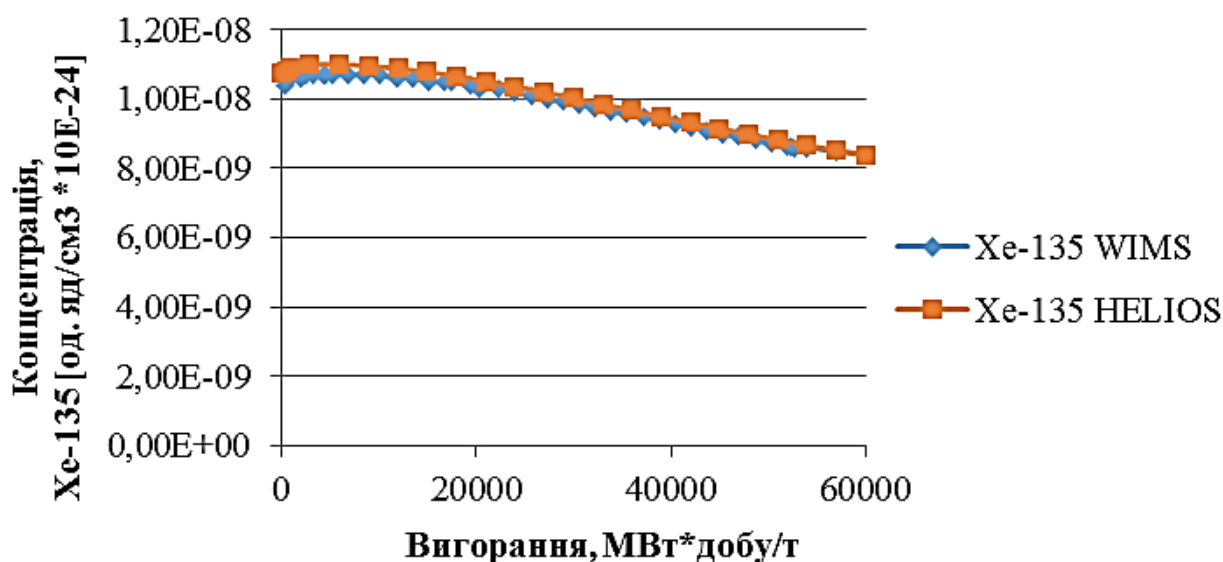


Рис. 19 – Зміна від вигорання концентрації Хе-135

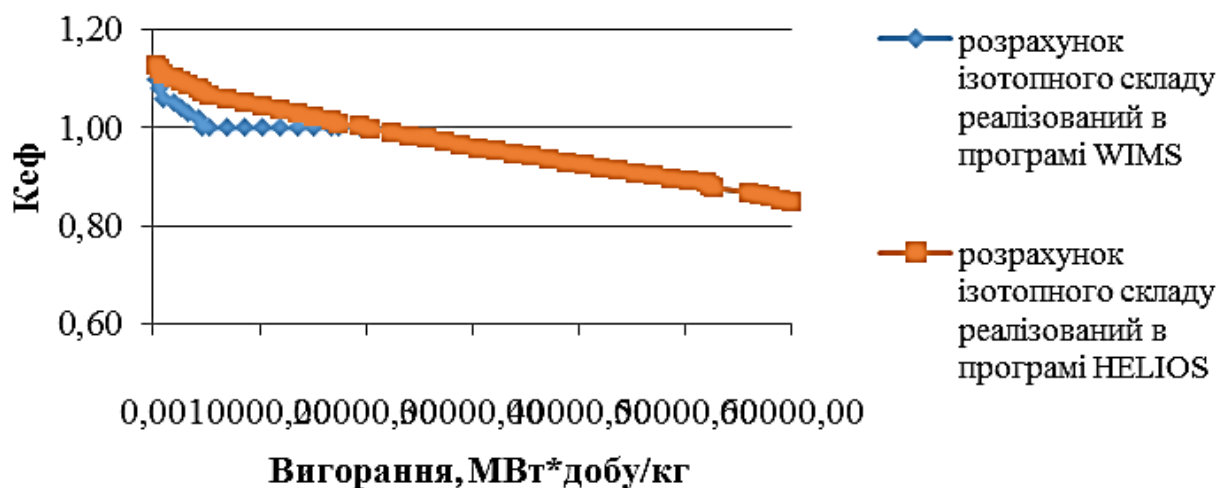


Рис. 20 – Зміна  $K_{\infty}$  з вигоранням в заданому діапазоні

Для більшості ізотопів (Рис. 15, Рис. 16, Рис. 18, Рис. 3.19) спостерігається дуже гарний (в межах 3-5%) збіг результатів. Більш помітні відмінності (в межах 10% від максимального значення) спостерігаються для ізотопів Рu-239 (Рис. 17). Тому, враховуючи вище зазначені факти, можна стверджувати, що валідація виконана успішно.

**Висновки з обґрунтування вибору розрахункового коду для визначення ізоотопного складу.** Отже, для визначення ізоотопного складу відпрацьованих збірок були проаналізовані 3 програми - американські пакети програм SCALE і код WIMS, та програма HELIOS, що розроблена фахівцями міжнародної компанії SCANDPOWER. Усі три коди мають переваги і недоліки.

SCALE – це найточніший код, еталонний розрахунок, але має суттєвий недолік - схема рахує довго і потребує великих витрат машинного часу. У пакеті розрахункових кодів SCALE реалізований метод Монте-Карло для рішення рівняння переносу нейтронів.

HELIOS і WIMS – спектральні коди, дрібносіткові програми для розрахунку детального розподілу щільності потоку нейтронів та для розрахунку ізотопного складу і підготовки НФК. Використовують метод ймовірності перших зіткнень.

Для програм WIMS розроблена та провалідована модель. Результати валідації вказують на те, що розраховані результати у програмному коді WIMS близькі до результатів, отриманих по програмам SCALE і HELIOS. Отже, можна використовувати ці розрахунки в 4 розділі для обґрунтування консервативного розподілу ізотопного складу.

**Визначення критерію  $\Delta K_{\text{еф}}$  по відношенню до якого буде обґрунтовуватись ізотопний склад.** При врахуванні глибини вигорання необхідно вибрати такий ізотопний склад, щоб забезпечити запас по  $K_{\text{еф}}(K_{\infty})$  по відношенню до реального значення  $K_{\text{еф}}$  на величину  $\Delta K_{\text{еф}}$ . Відповідно до підходу:

$$\Delta K_{\text{еф}} = \Delta K_{\text{еф}}^{\text{рознр.кода}} + \Delta K_{\text{еф}}^{\text{експ.пар.}} + \Delta K_{\text{еф}}^{\text{вигор.}}$$

$\Delta K_{\text{еф}}$  має в себе включати:

1) похибку розрахунку розрахункового коду. Невизначеність розрахунку розрахункового коду, приймаємо  $K_{\text{еф}}^{\text{рознр.кода}} = 0,04$ .

2) похибку розрахунку, що обумовлена впливом невизначеності експлуатаційних параметрів. Невизначеність в межах  $\Delta K_{\text{еф}}^{\text{експ.пар.}} = 0,05$ , прийнятна також для ВВЕР-440, так як збагачення паливної таблетки одне і теж, а діапазон зміни експлуатаційних параметрів для ВВЕР-1000 вище (температури, дельта густини теплоносія більші), і для ВВЕР-1000 вона буде більш консервативна. Отже, для нашого випадку цілком застосовна.

3) вплив невизначеності вигорання пропонується не через значення  $\Delta K_{\text{еф}}^{\text{вигор.}}$  ( $\Delta K_{\text{еф}}^{\text{вигор.}} = 0$ ), а через задання консервативного значення самого вигорання, а саме зменшивши саму величину вигорання на 10%, що відповідає точності розрахунку просторового розподілу енерговиділення та вигорання сучасних кодів відповідного призначення (БИПР-7, АНС, DYN3D).

Таким чином, величина критерію запасу  $\Delta K_{\text{еф}}$ :

$$\Delta K_{\text{еф}} = K_{\text{еф}}^{\text{рознр.кода}} + \Delta K_{\text{еф}}^{\text{експ.пар.}} = 0,04 + 0,05 = 0,09.$$

**Врахування нерівномірності розподілу вигорання у розрахункових оцінках ядерної безпеки систем поведження з відпрацьованим паливом при використанні принципу "burnup credit".** Паливо вигорає у касеті нерівномірно. Для врахування глибини вигорання при аналізі ядерної безпеки необхідно визначити вплив просторового розподілу глибини вигорання палива у ТВЗ на ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів системи поведження з ВЯП.

Розрізняють радіальний й аксіальний розподіл вигорання по ТВЗ. Як показують розрахунки систем поведження з відпрацьованим паливом реакторів ВВЕР, якщо прийняти радіальний й аксіальний розподіл вигорання рівномірним (тобто середню величину глибини вигорання) по ТВЗ, то такий підхід не є консервативним з точки зору ядерної безпеки [98]. Це означає, що при певному, нерівномірному, розподілі вигорання система поведження з

відпрацьованим паливом може характеризуватися більш високим коефіцієнтом розмноження нейтронів у порівнянні з такою ж системою, але заповненої касетами з деяким гіпотетичним, рівним для всього палива значенням вигоряння. Це задача відома, як задача визначення консервативного розподілу вигоряння.

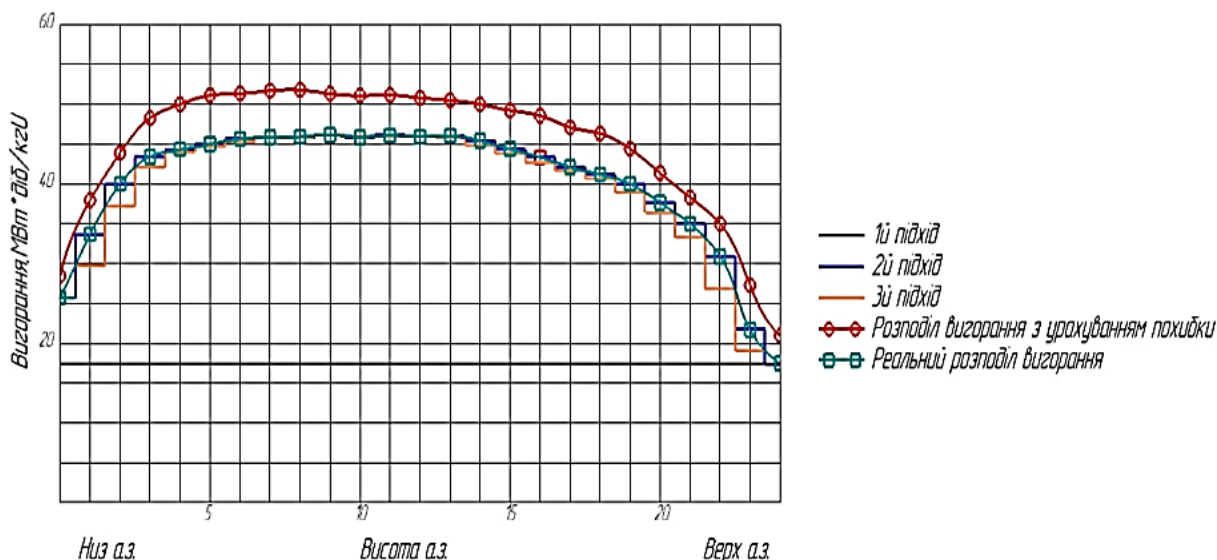


Рис. 15 – Аксіальний розподіл вигоряння по ТВЗ

Можна виділити три підходи (рис. 15) врахування реальної нерівномірності розподілу вигоряння по висоті ТВЗ від найбільш консервативного до найбільш реалістичного:

- 1) для кожної ВТВЗ вигоряння приймається незмінним по висоті і рівним значенню вигоряння у найменш вигорілому шарі ВТВЗ;
- 2) для ВТВЗ однакового збагачення формується консервативний розподіл вигоряння так, щоб величина вигоряння у кожному з його шарів дорівнювала найменшому вигорянню відповідних шарів цих ВТВЗ;
- 3) для кожної ВТВЗ приймається реальний профіль вигоряння з врахуванням похибки розрахунку.

Практична реалізація найбільш реалістичного, третього, підходу обмежується можливостями обчислювальних систем і є трудомістким завданням, пов'язаним з великою імовірністю помилки при введенні великих масивів вихідних даних.

У реальній ТВЗ вигоряння палива безперервно за довжиною ТВЗ. Тим часом, у розрахунковій моделі ТВЗ вигоряння представляється у вигляді набору дискретних значень глибини вигоряння. Отже, просторова дискретизація повинна якомога точніше відобразити реальний розподіл вигоряння, але при цьому не вносити додаткових похибок.

**Обґрунтування вибору ізотопів для врахування у аналізі безпеки відпрацьованого палива.** Зміна ізотопного складу палива при його вигорянні характеризується наступними процесами:

- зменшенням концентрації  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  внаслідок захоплення нейтронів і поділу;

- накопиченням і вигорянням подільних актинідів (наприклад,  $^{239}\text{Pu}$  та  $^{241}\text{Pu}$ );
- накопиченням і вигорянням поглинаючих нейтрони актинідів (ізотопи  $^{240}\text{Pu}$  та  $^{242}\text{Pu}$ );
- збільшенням концентрації продуктів поділу;
- зменшенням концентрації вигоряючих поглиначів (на основі Gd або Er), у випадку їх наявності у свіжому паливі.

Для аналізу критичності відпрацьованого палива необхідно визначити, які ізотопи будуть використовуватися при розрахунку ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів. Перелік ізотопів, які будуть враховуватися, залежить від їхніх НФК (перерізу нейтронної взаємодії) а, отже, впливу на критичність. Він також залежить і від можливості розрахункового коду з необхідною точністю визначати концентрації вибраних ізотопів, а також від наявності верифікаційного матеріалу (перш за все експериментального), який дозволить оцінити можливості розрахункового коду.

Ізотопний склад відпрацьованого ядерного палива, який визначається розрахунковим шляхом, буде залежати від:

- характеристик свіжого палива,
- умов експлуатації та часу витримки,
- розрахункового коду і бібліотек констант.

Сучасний напрямок розвитку ядерної енергетики характеризується використанням більш високого початкового збагачення палива за  $^{235}\text{U}$ , що дозволяє досягти у процесі експлуатації все більших значень глибини вигоряння палива. Зі збільшенням збагачення і глибини вигоряння виникає необхідність у переоцінці точності розрахункових кодів та ядерних даних, що використовуються для оцінки ізотопного складу і характеристик відпрацьованого ядерного палива, оскільки валідація більшості кодів була виконана для старих типів ТВЗ і менших початкових збагачень палива. Нерідко виникають ситуації, коли експериментальні дані для валідації відсутні і єдиним виходом є валідація на основі порівняльного аналізу різних розрахункових методів та даних.

Основні методи і підходи до врахування глибини вигоряння не залежать від розрахункових кодів, що використовуються. Однак, помилки і похибки результатів, отриманих з їх допомогою, залежать від обробки даних, закладених в бібліотеку НФК (наприклад, обробка резонансів, інтерполяції даних).

Сучасні коди (напр., HELIOS, SCALE, WIMS) можуть, а бібліотеки НФК дозволяють відслідковувати зміну концентрації понад 1000 нуклідів. Однак, така можливість є надмірною для виконання аналізу критичності зі врахуванням глибини вигоряння. Деякі нукліди розпадаються у відносно короткий час (від декількох секунд до декількох днів); деякі присутні у гранично малих кількостях або мають малий переріз поглинання, що робить їх несуттєвими для аналізу критичності. Отже, необхідно визначити набір нуклідів, які можуть адекватно представити поведінку відпрацьованого ядерного палива.

Для відбору нуклідів зазвичай використовують такі критерії:

1. нукліди повинні мати істотний внесок у поглинання теплових нейтронів у відпрацьованому паливі;

2. враховуються всі подільні нукліди;
3. нукліди повинні бути зафіксовані у паливній матриці (тобто, летючі елементи не розглядаються);
4. повинні бути наявні експериментальні дані аналізу ізотопного складу для порівняння з розрахунковою концентрацією обраних нуклідів.

Для категоризації нуклідів за поглинаючою здатністю на підставі наведених вище критеріїв необхідно провести оцінку частки поглинання у паливі. На підставі критерію 2 обов'язково повинні враховуватися ізотопи  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  та  $^{241}\text{Pu}$ . Критерій 3 дозволяє виключити з розгляду газоподібні нукліди і ті, що мають велику розчинність у воді. Останній критерій вимагає врахування тільки тих ізотопів, для яких існують експериментально отримані дані щодо концентрацію. Цей критерій дозволяє розширювати перелік ізотопів у випадку надходження нових даних аналізу ізотопного складу опроміненого палива.

Для проведення аналізу критичності відпрацьованого ядерного палива необхідно визначити, які зміни відбуваються у ізотопному складі і, відповідно, нейтронно-фізичних константах палива при збільшенні вигорання і збагачення, і як вони впливають на розмножуючі властивості відпрацьованого палива. Така задача розв'язується шляхом класифікації нуклідів за важливістю з точки зору величини впливу на розмножуючі властивості. Зазвичай, при аналізі критичності розглядається проміжок часу витримки від 2 до 100 років після вивантаження ТВЗ з реактора. Для оцінки важливості того чи іншого актиніду або продукту поділу у аналізі критичності використовується частка поглинання ним нейтронів. Класифікація за ступенем поглинання нейтронів визначається на підставі повного перерізу поглинання нейтронів у паливі та конструкції ТВЗ, і включає у себе процеси поділу і радіаційного захоплення.

Згідно оціночних розрахунків, наведених нижче, домінуючими поглиначами-актинідами (з часткою поглинання  $>10\%$ ) є:  $^{238}\text{U}$ , для якого характерна майже постійна частка поглинання при зростанні глибини вигорання (близько  $30\%$ );  $^{239}\text{Pu}$ , у якого частка поглинання зростає до глибини вигорання приблизно у  $50 \text{ МВт}\cdot\text{дб}/\text{кгU}$ , а потім залишається постійною (це пов'язано з постійним зростанням концентрації  $^{239}\text{Pu}$  у паливі ВВЕР до зазначеної глибини вигорання); і  $^{235}\text{U}$ , частка поглинання якого різко знижується зі збільшенням вигорання (Рис. 16).

Наступна група актинідів – із середньою поглинаючою здібністю (з часткою поглинання від 1 до  $10\%$ ) включає  $^{236}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  та  $^{241}\text{Am}$ . Частка поглинання цих нуклідів зростає дуже різко до глибини вигорання близько  $40 \text{ МВт}\cdot\text{дб}/\text{кгU}$ , і набагато повільніше за більш високих глибин вигорання (Рис. 17). Значимість решти актинідів (з часткою поглинання  $<1\%$ ) зазвичай зростає дуже різко на всьому діапазоні глибини вигорання і часу витримки.

Поглинання нейтронів у продуктах поділу відбувається на набагато більшій кількості нуклідів, ніж у актинідах. Внаслідок цього, категоризація продуктів поділу більшою мірою є умовною. Вплив на коефіцієнт розмноження нейтронів продуктів поділу набагато слабкіше, ніж актинідів. Навіть домінуючі нукліди ( $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{143}\text{Nd}$  та  $^{149}\text{Sm}$ ) кожний окремо мають частку поглинання мають частку поглинання  $<2\%$ . Однак, продуктів поділу існує

набагато більша кількість, ніж актинідів, і поглинання продуктами поділу в сумі становить 6-15% від загального поглинання паливі.

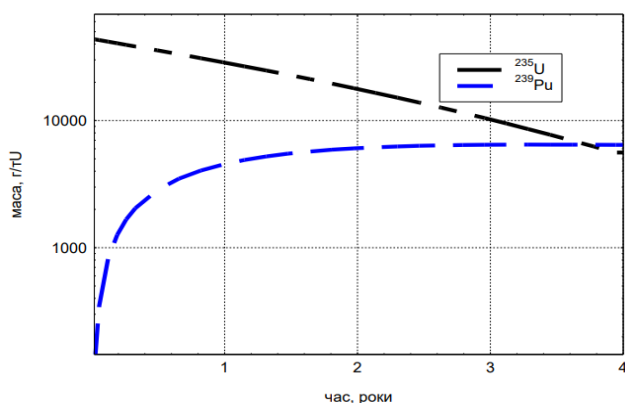


Рис. 16 – Зміна концентрацій  $^{235}\text{U}$  та  $^{239}\text{Pu}$  при опроміненні у реакторі протягом 3.8 років і подальшій витримці у басейні (у грамах на тонну урану)

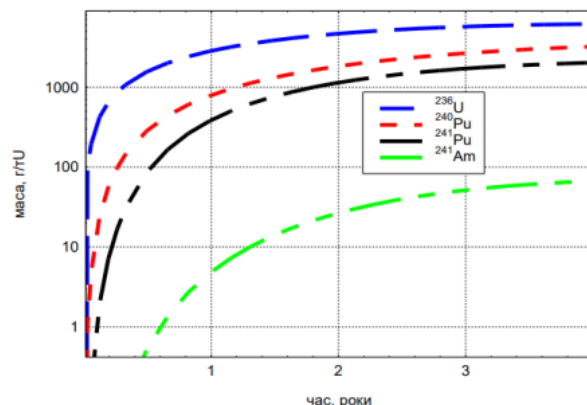


Рис. 17 – Зміна концентрацій  $^{236}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  та  $^{241}\text{Am}$  при опроміненні у реакторі (у грамах на тонну урану)

Більшість продуктів поділу мають постійне зростання поглинання зі збільшенням глибини вигорання. Лише у двох нуклідів значимість змінюється набагато повільніше, ніж у інших. Це -  $^{149}\text{Sm}$ , значимість якого залишається майже незмінною до глибини вигорання 30 МВт·діб/кгU, і  $^{147}\text{Sm}$ , значимість якого залишається майже постійною після глибини вигорання 50 МВт·діб/кгU. Повільна зміна значимості цих нуклідів пояснюється швидким накопиченням до рівноважного стану під час опромінення, після чого їх концентрація у паливі залишається постійною. Концентрація ж більшості інших продуктів поділу безперервно зростає під час опромінення.

Найбільше зростання значимості при збільшенні вигорання демонструє стабільний нуклід  $^{155}\text{Gd}$ . Його попередник,  $^{155}\text{Eu}$ , має час напіврозпаду 4.75 років, і тому  $^{155}\text{Gd}$  не досягає рівноважного стану навіть при глибині вигорання 70 МВт·діб/кгU. Ізотоп  $^{155}\text{Gd}$  є одним з найбільших поглиначів серед продуктів поділу у сильно вигорілому паливі. Інший стабільний нуклід,  $^{153}\text{Eu}$ , демонструє схожий, але менш виражений ефект, оскільки його попередник,  $^{153}\text{Gd}$  характеризується часом напіврозпаду 241.6 днів.

На підставі наведеного вище аналізу, найбільш консервативним для реакторів ВВЕР було прийнято врахування зниження сумарного вмісту ізотопів у ВТВЗ, що включає у себе вигорання, напрацювання і радіоактивний розпад наступних ізотопів:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ .

Зазначені нукліди роблять основний внесок у розмножуючі властивості у відпрацьованому паливі, які не летючі, і їхня концентрація з достатньою точністю може бути визначена за допомогою аналізу ізотопного складу палива.

**Приклад застосування даного підходу.** Для перевірки застосовності запропонованого підходу, розроблено розрахункову модель РК ВВЕР-440, розташованої в чарунці басейну витримки, для програмного коду WIMS для розрахунку Кеф (Рис.18).

Виконано розрахунок стану чарунки в басейні витримки Кеф:

– за результатами розрахунку з реалістичними ізотопами для вигорання 50 МВт·діб/кгU (на Рис. 18) представлений презентативний розподіл вигорання по ТВЗ для теперішнього сучасного паливного циклу ВВЕР-440, майже всі касети приблизно з таким вигоранням вивантажуються в басейн витримки) при  $T_{\text{кім}} = 293\text{K}$ ,  $C_{\text{бору}} = 0 \text{ K}_{\infty}$  становить 0,751.

– за результатами розрахунку з обраними ізотопами ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) для врахування у аналізі безпеки відпрацьованого палива,  $K_{\infty}$  становить 0,896.

З використанням запропонованого та реалістичного підходу обґрунтування консервативного розподілу ізотопного складу:

$\Delta K_{\infty}^{\text{запр.підход.}} - K_{\infty}^{\text{реаліст.}} = 0,896 - 0,751 = 0,145$ ,  
що свідчить про дотримання критерію запасу 0,09.

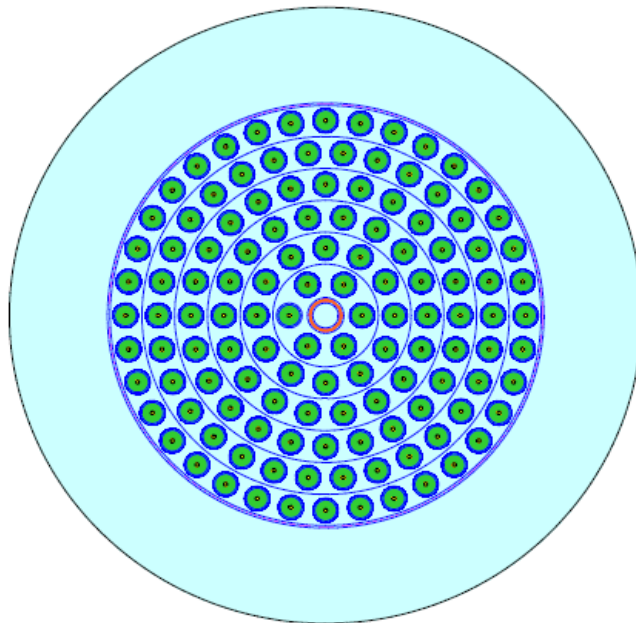


Рис. 18 – Розрахункова модель РК ВВЕР-440 для розрахунку Кеф басейну витримки реалізована в програмі WIMS

**Висновки по обґрунтуванню консервативного розподілу ізотопного складу в ТВЗ ВВЕР-440 для аналізу ядерної безпеки систем зберігання палива.**

Отже, при обґрунтуванні консервативного розподілу ізотопного складу в ТВЗ ВВЕР-440 для аналізу ядерної безпеки систем зберігання палива, із застосуванням принципу «burnup-credit» без зниження існуючого рівня ядерної безпеки в даній роботі застосований наступний підхід:

1) визначається критерій  $\Delta K_{\text{Кеф}}$  по відношенню до якого буде обґрунтовуватись ізотопний склад, який враховує похибки розрахункового коду, невизначеність експлуатаційних параметрів;

2) вибирається певна кількість ізотопів у складі ВЯП, які пропонується використовувати при аналізі ядерної безпеки ВЯП, в результаті пропонується використовувати при аналізі ядерної безпеки ВЯП вибраний набір ізотопів без врахування історії опромінення кожної ВТВЗ та зміни експлуатаційних параметрів;



3) враховується консервативний розподіл глибини вигорання, що призводить до заниження середньої величини вигорання у ТВЗ, і, відповідно, до ще більш консервативних результатів;

4) виконується розрахунок розмножуючих властивостей ядерного палива з обраним ізотопним складом.

Результати розрахунку свідчать про те, що даний підхід забезпечує консерватизм, який закладений при реалізації даного підходу та компенсує усі можливі неточності, невизначеності та похибку визначення коефіцієнта розмноження нейтронів.

#### **Список використаних джерел:**

1. Вимоги безпеки під час поводження з ядерним паливом (НП 306.2.221-2019), затверджені наказом Держатомрегулювання від 21.06.2019 № 269 (zareestrovani Min'yustom 30.07.2019 za № 833/33804) / Міністерство юстиції України, 2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0833-19#n15>

2. IAEA-TECDOC-1378, Practices and developments in spent fuel burnup credit applications, Proceedings of a Technical Committee meeting held in Madrid, 22–26 April 2002.

3. IAEA-TECDOC-1547, Advances in application of Burnup Credit to Enhance Spent Fuel Transportation, Storage, Reprocessing and Disposition, Proceedings of a Technical Committee meeting held in London, 29 August – 02 September 2005, May 2007.

4. J. C. Neuber, J.M. Conde Lopez, IAEA TR-41212. Burnup Credit Criticality Calculation Methods and Applications. International Workshop on Burnup Credit Criticality Calculation Methods and Applications, Beijing 25-28 October 2011.

5. The Database on Nuclear Power Reactors. URL: <https://www.iaea.org/pris/> (дата звернення: 20.01.2017).

6. Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, Title 10, Part 50 of the U. S. Code of Federal Regulations, Revised as of January 1, 2000

7. Норми радіаційної безпеки України; доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000) затверджені Міністерством охорони здоров'я України від 12.07.2000 № 116 (ДГН 6.6.1. - 6.5.061-2000) / URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0116488-00>



# ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ТЕХНОЛОГІЇ РЕЦИКЛІНГУ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНОГО МЕТАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕФЕКТУ САМОДЕЗАКТИВАЦІЇ

*Машиністов Віктор, Балакін Валерій*

*Національна металургійна академія України, просп. Гагаріна, 4, 49600,  
м. Дніпро, mashvic@i.ua*

*Коверя Андрій*

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»,  
просп. Д. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро, Koverya.A.S@ntu.one*

## **Анотація:**

Об'єкти з підвищеним рівнем забруднення радіонуклідами їх поверхні створюють ситуації існуючого небезпечного хронічного опромінення населення, що унеможлиблює їх подальше використання. Умовою їх повернення в господарський обіг є зниження рівня випромінювання з їх поверхні до допустимого. В роботі обґрунтований підхід і описаний приклад, що дозволяє отримувати з радіоактивно забрудненого металу безпечний в радіаційному відношенні метал шляхом плавлення з подальшим перетворенням джерела іонізуючого випромінювання відкритого типу, на поверхні якого знаходяться радіонукліди, в джерело закритого типу. Запропонований метод характеризується високими техніко-економічними показниками і може бути використаний для інших твердих об'єктів, забруднених радіонуклідами. Технологія рециклінгу ґрунтується на природних законах і дозволяє отримати безпечні в радіаційному відношенні матеріали, які придатні для використання без будь-яких обмежень.

**Ключові слова:** радіоактивно забруднений метал, утилізація, опромінення, іонізуюче випромінювання, дезактивація, ліміт дози.

**Вступ.** При експлуатації радіоактивно-ядерних об'єктів, а також під час ремонту, модернізації або демонтажу їх обладнання, утворюється значна кількість радіоактивно забрудненого металу (РЗМ). Великі об'єми металу, забрудненого природними радіонуклідами, накопичуються і в інших виробничих сферах, зокрема, на газонафтопереробних підприємствах. Забруднення металу має місце також при аваріях на АЕС з викидом радіоактивних речовин в навколишнє середовище, а також при ліквідації їх наслідків.

Успішне вирішення проблеми рециклінгу РЗМ дозволить багаторазово його використовувати в промисловому виробництві. Додатково це буде сприяти зниженню об'ємів гірничорудного виробництва і витрат на нього, що призведе до значного зменшення кількості відходів, які накопичуються.

**Основний матеріал.** Поверненню РЗМ в промислове використання перешкоджає наявність у ньому радіонуклідів в концентраціях, що перевищують допустимі значення. Створюване при їх розпаді іонізуюче випромінювання (ІВ) є потенційно небезпечним для біологічних об'єктів.

Для того, щоб об'єкт, забруднення якого радіонуклідами призвело до підвищення рівня ІВ з його поверхні, можна було утилізувати, необхідно забезпечити його радіаційну безпеку відповідно до вимог Норм радіаційної безпеки України (НРБУ-97) [1], в основі яких лежать рекомендації Міжнародної комісії з радіологічного захисту (МКРЗ). Узагальненим критерієм радіаційної безпеки техногенного джерела ІВ є індивідуальна річна ефективна доза зовнішнього опромінення індивідуума, що знаходиться в зоні дії випромінення цього джерела, яка не повинна перевищувати встановленого ліміту дози (ЛД). Для будь-якої особи з населення числове значення річного ЛД складає 1 мЗв/рік, а для виробничого персоналу – 20 мЗв/рік, причому протягом календарного року розподіл дози не регламентується. В даному дослідженні враховані рекомендації, викладені в публікації [2], які систематизують і доповнюють вказівки по контролю опромінення від джерел ІВ, розроблені після введення в дію НРБУ-97.

Як приклад, розглянемо ситуацію, яка складається при аварії на АЕС з викидом радіонуклідів в навколишнє середовище. Внаслідок аварії відбувається забруднення радіонуклідами всіх елементів навколишнього середовища на території, прилеглої до АЕС: атмосфери, земної поверхні, споруд, рослинності, води та ін. Ці об'єкти є вторинними джерелами ІВ, яке може опромінювати людей. З метою аналізу можливих шляхів надходження ІВ до окремого індивідуума від забруднених об'єктів виберемо один, наприклад, фрагмент РЗМ. Індивідуальна ефективна доза, яка формується цим джерелом  $E^{оп}$ , є додатковою до дози  $E^ф$ , створюваної радіаційним фоном. У загальному випадку доза опромінення будь-якої людини  $E^{оп}$  дорівнює сумі ефективної дози зовнішнього опромінення всіма джерелами ІВ за календарний рік ( $E^{зов}$ ) і очікуваної ефективної дози внутрішнього опромінення, зумовленої надходженням радіонуклідів з даного джерела в організм людини за той же період часу ( $E^{внутр}$ ) [3]:

$$E^{оп} = E^{зов} + E^{внутр}. \quad (1)$$

Таким чином, ефективна індивідуальна річна доза є сумою двох складових, обумовлених абсолютно різними механізмами радіаційного впливу на організм людини. Величина ефективної дози  $E^{оп}$  є кількісною мірою радіаційної небезпеки, що надходить від розглянутого забрудненого радіонуклідами об'єкта. Для вжиття заходів щодо забезпечення радіаційної безпеки окремого джерела ІВ необхідно оцінити внесок в дозу  $E^{оп}$  кожного з можливих шляхів впливу цього джерела випромінення на окремо взятую людину.

При зовнішньому опроміненні, ІВ, яка створене джерелом, що знаходиться поза тіла людини, проникає через шкіру і впливає на його внутрішні органи і тканини. Розпад радіонуклідів супроводжується випусканням ІВ різних видів (альфа-, бета- і гамма-випромінення). Відповідно, доза зовнішнього опромінення може мати три складові –  $E_\alpha$ ,  $E_\beta$  і  $E_\gamma$ .

Внутрішнє опромінення обумовлене радіонуклідами, що надходять в організм людини інгаляційним шляхом разом з повітрям, а також пероральним шляхом при прийомі їжі і води. Як наслідок, доза внутрішнього опромінення є сумою інгаляційної  $E_{\text{інг}}$  і пероральної  $E_{\text{пер}}$  складових.

З урахуванням викладеного, вираз (1) набуває вигляду:

$$E^{\text{оп}} = E_{\alpha} + E_{\beta} + E_{\gamma} + E_{\text{інг}} + E_{\text{пер}}. \quad (2)$$

Ефективну дозу, яка є розрахунковою величиною, неможливо виміряти і, отже, контролювати. Тому при вирішенні практичних завдань вимірюють похідні (вторинні) радіаційні фактори, значення яких відповідає величині відповідної складової ефективної дози. До таких похідних контрольованих факторів, як впливає з (2), відносяться:

- потужність дози гамма-випромінення і щільність потоку альфа-і бета-частинок для зовнішнього опромінення;

- об'ємна або питома активність радіонуклідів у повітрі, що вдихається, в споживаній воді та їжі при внутрішньому опроміненні.

Для кожного з факторів радіаційного впливу встановлюються відповідні похідні нормативи – допустимі рівні. Вони розраховуються за різними моделями таким чином, щоб при дії одного фактору не був перевищений його ліміт. При одночасному впливі декількох факторів повинна виконуватися умова, відповідно до якої сума відносин значення кожного фактору до значення його ліміту не перевищувала одиниці [3]. Значення ліміту кожного фактору встановлюються нормативними документами.

У даній задачі вихідним джерелом ІВ є радіонукліди, що знаходяться на поверхні РЗМ. Проникаюча здатність ІВ різних видів характеризується довжиною їх вільного пробігу в речовині. З усіх видів ІВ гамма-випромінення становить найбільшу небезпеку при зовнішньому опроміненні людини, оскільки його пробіг в повітрі дорівнює сотням метрів, і воно здатне проникнути всередину організму на велику глибину і впливати на внутрішні органи. У той же час ІВ, представлене альфа- і бета-частинками, здатне подолати в атмосфері відстань тільки в кілька сантиметрів. Отже, практично доданок  $E^{\text{зов}}$  в вираженні (1) формується тільки гамма-випроміненням.

Так як об'єкт, який розглядається – це відкрите джерело ІВ, то під впливом атмосферних явищ радіонукліди безконтрольно можуть переходити до складу інших джерел ІВ, наприклад, в атмосферу, підстилаючу поверхню, ґрунтові води та ін. Оскільки метал не є речовиною для вживання, то забруднюючі його радіонукліди не можуть потрапити в організм людини. Тому доданок  $E^{\text{внутр}}$  в виразі (1), який враховує внесок внутрішнього опромінення в дозу, дорівнює нулю. У підсумку, радіонукліди, які знаходяться на поверхні об'єкта, що представляє собою, по відношенню до людини, зовнішнє джерело ІВ, можуть формувати дозу  $E^{\text{оп}}$  за рахунок тільки однієї складової – гамма-випромінення  $E_{\gamma}$ .

Річна індивідуальна ефективна доза зовнішнього опромінення  $E^{\text{оп}}$  в будь-якій точці простору оцінюється шляхом вимірювання потужності дози гамма-

випромінення  $\dot{E}_\gamma$  в цій точці і сумарною тривалістю опромінення даного індивідуума  $T_{\text{оп}}$  в межах одного календарного року:

$$E^{\text{оп}} = \dot{E}^{\text{оп}} \cdot T_{\text{оп}}. \quad (3)$$

Дане джерело ІВ буде безпечним для будь-якої людини, якщо виконується нерівність:

$$E^{\text{оп}} < E_{\text{лім}}, \quad (4)$$

де  $E_{\text{лім}}$  – ліміт ефективної дози.

Оскільки в даній ситуації значення річної ефективної дози і середньорічної потужності гамма-випромінення пов'язані між собою лінійною залежністю (3), то співвідношення (4) можна представити у вигляді:

$$\dot{E}^{\text{оп}} \leq \dot{E}_o^{\text{оп}}, \quad (5)$$

де  $\dot{E}_o^{\text{оп}}$  є допустимим рівнем усередненої за рік потужності дози гамма-випромінення, що відповідає ліміту ефективної дози, за умови, що індивідуум піддавався тільки зовнішньому опроміненню від даного джерела. Даний рівень є похідним (вторинним) нормативом від ефективної дози і, отже, може використовуватися як критерій радіаційної безпеки даного об'єкту. При невиконанні умови (5) необхідно вживати заходів щодо забезпечення радіаційної безпеки об'єкта при його утилізації. З викладеного вище випливає, що це можна реалізувати тільки одним шляхом: зменшенням потужності гамма-випромінення з поверхні розглянутого об'єкта до прийняттого рівня.

При поширенні випромінення в однорідному поглинаючому середовищі, яким можна вважати атмосферу, потужність дози зменшується за експоненціальним законом. Її значення в точці, віддаленій від джерела на відстань  $r$  визначається зі співвідношення:

$$\dot{E}^{\text{оп}} = \dot{E}_o^{\text{оп}} \cdot e^{-0,693r/d_{0,5}}, \quad (6)$$

де  $\dot{E}_o^{\text{оп}}$  – потужність ефективної дози у випромінюючої поверхні джерела;  
 $d_{0,5}$  – товщина шару половинного ослаблення середовища поширення.

З виразу (6) видно, що потужність індивідуальної ефективної дози має найбільше значення при  $r = 0$ , тобто у випромінюючої поверхні РЗМ. Це означає, що в один і той же момент часу з усіх людей, які знаходяться в зоні дії випромінення, що випускається окремим джерелом, найбільшому впливу будуть піддаватися ті з них, які знаходяться безпосередньо у його поверхні. Звідси випливає, що якщо їх безпека забезпечена, то в безпеці будуть знаходитися і всі інші особи.

Зі співвідношення (6) також виходить, що зменшити потужність ефективної дози ІВ, створеного РЗМ, можна як шляхом видалення гамма-випромінюючих радіонуклідів з його поверхні, так і впливом на шлях поширення їх випромінення до точки, в якій знаходиться або може перебувати індивідуум. Причому зменшення даної дози відбувається за рахунок впливу на шлях поширення окремих елементарних гамма-випромінювачів, якими є радіонукліди.

Щоб забезпечити безпеку персоналу, населення і навколишнього середовища необхідно знижувати індивідуальні ефективні дози, створювані гамма-випроміненням, до рівнів, що не перевищують допустимі межі. У розглянутому підході це завдання вирішується шляхом плавлення РЗМ, що не піддавався попередній дезактивації. У процесі плавлення радіонукліди, що знаходяться в розплаві, розподіляються в його об'ємі рівномірно. Таким же залишається розподіл радіонуклідів і в виплавленому злитку. В результаті процес плавлення призводить до перетворення відкритого джерела ІВ, яким був РЗМ, в закрите джерело, з якого радіонукліди не можуть вийти в навколишнє середовище і, отже, потрапити в організм людини. За межі злитка може виходити гамма-випромінення тільки тих радіонуклідів, які знаходяться в поверхневому шарі металу товщиною в кілька сантиметрів. Гамма-випромінення всіх інших радіонуклідів поглинається в металі повністю, а альфа- і бета-випромінення взагалі не здатне вийти за межі металевого злитка. Як наслідок, рівень гамма-випромінення, що надходить з поверхні виплавленого металу в багато разів нижче його значення, яке було на поверхні завантаженого в піч РЗМ.

Зменшення рівня радіації, випромінюваної поверхнею об'єкта з об'ємним розподілом забруднюючих його радіонуклідів адекватно характеризується умовним поняттям «самодезактивація». Необхідний рівень радіаційної безпеки отриманих злитків металу забезпечується шляхом регулювання кількості активності, що завантажуються в плавильну піч разом з шихтою. Подальша обробка виробів із виплавленого металу не здатна підвищувати рівень їх радіаційної небезпеки для біологічних об'єктів, так як об'ємна активність в металі при цьому залишається незмінною. Причому безпечні рівні гамма-випромінення з поверхні готової продукції досягаються при настільки низьких концентраціях радіонуклідів в металі, що вони не впливають на його фізичні та хімічні властивості. Таким чином, процес плавлення створює умови для отримання з РЗМ металопродукції, придатної для подальшого використання без будь-яких обмежень.

Як вказано в [4], РЗМ підлягає повному звільненню від регулюючого контролю за умови, якщо він одночасно відповідає таким критеріям: очікувана річна ефективна доза для будь-якої особи не перевищує 1 мкЗв/рік для сценаріїв, ймовірність реалізації яких менша, ніж  $1 \cdot 10^{-2}$  рік<sup>-1</sup>. Відповідно до класифікації, наведеної в [5], саме до такого малоймовірного сценарію відноситься поводження з РЗМ, який створюється при плануванні та здійсненні практичної діяльності з ним, а також при втручанні у разі радіаційної аварії.

У ситуації, що розглядається, таким втручанням є дезактивація РЗМ до рівня, який не перевищує ліміту річної ефективної дози опромінення  $\dot{E}_{\text{лім}}^{\text{оп}}$ , створюваної ним, що не перевищує значення 1 мЗв за рік. Однак, оскільки це розрахункова величина, то на практиці встановлюється кількісний критерій безпеки джерела гамма-випромінення, який є похідним (вторинним) нормативом для усередненої за рік потужності ефективної дози  $\dot{E}_{\text{гр}}^{\text{оп}}$ , розрахованої зі значення  $E_{\text{лім}}^{\text{оп}}$  [1]. Якщо  $\dot{E}^{\text{оп}} \leq \dot{E}_{\text{лім}}^{\text{оп}}$ , то джерело ІВ, яке створило поле такої інтенсивності, безпечно. При невиконанні цієї умови, тобто при  $\dot{E}^{\text{оп}} > \dot{E}_{\text{лім}}^{\text{оп}}$ , проявляється небезпечний характер його впливу на здоров'я людини. Таким чином, щоб РЗМ був безпечним для людини, яка знаходиться в зоні дії створюваного ним ІВ, необхідно вживати заходів до того, щоб потужність ефективної дози випромінення з його поверхні не перевищувала встановленого ліміту  $\dot{E}_{\text{лім}}^{\text{оп}}$  з поверхні джерела.

Значення дозиметричних величин визначаються за допомогою операційних величин, які можна виміряти, і які є їх консервативною оцінкою [2].

При моніторингу радіаційної ситуації для визначення потужності ефективної дози зовнішнього опромінення  $\dot{E}^{\text{оп}}$  за допомогою дозиметра, шкала якого градуйована в одиницях мкЗв/год, вимірюють потужність еквівалентної дози. Значення цієї операційної величини є оцінкою потужності дози в точці вимірювання  $\dot{E}^{\text{оп}}$ . Як впливає з виразу (1), для оцінки ефективної дози, яку отримала би людина, що знаходиться в точці вимірювання, показання дозиметра множаться на час перебування людини в даній точці поля випромінення.

На практиці, для прийняття рішення про необхідність вжиття заходів щодо забезпечення радіаційної безпеки конкретного об'єкта, визначається потужність дози випромінення в точці, віддаленій від його поверхні на 0,1 м. Показання дозиметра  $\dot{E}_{\text{вим}}$  представляють собою суму потужності дози випромінення з поверхні об'єкта  $\dot{E}_o^{\text{об}}$  і потужності дози природного радіаційного фону  $\dot{E}_{\text{ф}}$ :

$$\dot{E}_{\text{вим}} = \dot{E}_o^{\text{об}} + \dot{E}_{\text{ф}}. \quad (7)$$

Фактичне значення потужності дози  $\dot{E}_o^{\text{об}}$  розраховують за формулою:

$$\dot{E}_o^{\text{об}} = \dot{E}_{\text{вим}} - \dot{E}_{\text{ф}}. \quad (8)$$

Якщо ця величина перевищує гранично допустиму потужність дози  $\dot{E}_{\text{гр}}^{\text{об}}$ , то необхідно прийняти заходи до забезпечення безпеки даного об'єкта.

Якщо числовим значенням основного критерію повного звільнення РЗМ від регулюючого контролю є 1 мЗв/рік, то як це видно з виразу (3), для цього конкретного матеріалу як критерій може використовуватися такий похідний рівень звільнення як ліміт потужності дози гамма-випромінення з поверхні РЗМ  $\dot{E}_{\text{лім}}^{\text{вих}}$ .

Враховуючи, що один рік складається з 8760 годин, то даний критерій має значення 0,11 мкЗв/год. Цим лімітом порівнюються значення потужності ефективної дози, що вимірюється дозиметром біля поверхні РЗМ.

У той же час, контролювати такі показники радіаційної ситуації, як об'ємна і поверхнева активність РЗМ, немає потреби, так як немає умов для того, щоб забруднюючі його радіонукліди потрапили всередину організму людини і вносили свій вклад в індивідуальну ефективну дозу.

З викладеного вище випливає, що метал, з розташованими в його об'ємі радіонуклідами, небезпечний для біологічних об'єктів тільки як джерело зовнішнього по відношенню до них гамма-випромінення і всі захисні заходи повинні проводитися з урахуванням цієї обставини.

В оточуючому нас просторі знаходяться багато природних радіонуклідів, які є джерелами природного радіаційного фону. В місцях з великою кількістю радіонуклідів радіаційний фон відповідно зростає, тобто не відбувається нічого такого, що виходило б за рамки, закладені природою, адже радіоактивне випромінення було «враховано» при народженні та розвитку життя на Землі. Живі організми в ході довгої еволюції підлаштувалися під нього, і тому в природному вигляді шкоди радіація нанести не може. Фактично всі природні процеси відбуваються в рамках самозахисту і безпеки, коли закони природи усувають небезпечні чинники впливу на умови життя біологічних об'єктів.

Для рециклінгу РЗМ пропонується використовувати підхід, обґрунтування якого наведено в роботах [6-9]. В його основі лежить використання ефекту самодезактивації, який виникає при плавленні металу, внаслідок якого забруднюючі поверхню металу радіонукліди переходять в його об'єм.

Експериментальну перевірку запропонованої технології утилізації РЗМ можна провести за допомогою плавильної електропечі індукційного типу ємністю  $M_{\text{п}} = 30$  кг. Цієї кількості РЗМ достатньо для того, щоб отримати об'єктивні дані, які характеризуватимуть запропонований підхід. Цієї кількості РЗМ досить для зменшення потужності гамма-випромінення з його поверхні в 10 разів. В даному випадку для отримання радіаційно безпечного металу, виплавленого з РЗМ, необхідно забезпечити, щоб середній рівень потужності гамма-випромінення з поверхні шихти, яка завантажується в піч не більше, ніж в 10 разів перевищував допустимий рівень гамма-випромінення з поверхні виплавленого металу. Виконання цієї умови контролюється шляхом вимірювання потужності гамма-випромінення з поверхні кожного з  $N$  завантажених в піч фрагмента РЗМ  $\dot{E}_i$ , мкЗв/год і його маси  $m_i$ , кг і розрахунку за цими даними середнього значення потужності гамма-випромінення з поверхні шихти:

$$\dot{E}_{\text{сеп}}^{\text{вх}} = \frac{\sum_{i=1}^N \dot{E}_i \cdot m_i}{M^{\text{вх}}} \quad (9)$$

де  $M^{\text{вх}} = \sum_{i=1}^N m_i$  - маса всієї завантаженої в піч шихти.

При цьому контролюється виконання двох умов:

$$\dot{E}_{\text{ср}}^{\text{ВХ}} < 10 \dot{E}_{\text{лім}}^{\text{ВХ}} \text{ та } M^{\text{ВХ}} < M_{\text{п.}}$$

Звідси видно, що в загальному випадку кратність ослаблення гамма-випромінення з поверхні РЗМ при плавленні визначається ємністю печі.

Результати, отримані при проведенні експерименту за допомогою печі невеликої ємності, можуть бути екстрапольовані на великі об'єми РЗМ і використані при проектуванні промислових установок для утилізації РЗМ.

**Висновки.** Результати теоретичних досліджень з розвитку технології рециклінгу радіаційно забрудненого металу, заснованої на його плавленні в металургійній печі, свідчать, що даний підхід може бути використаний для широкомасштабного промислового рециклінгу РЗМ. Процес плавлення створює умови для отримання з РЗМ металопродукції, придатної для подальшого використання без будь-яких обмежень. Запропонований метод характеризується високими техніко-економічними показниками і може бути використаний для рециклінгу інших твердих об'єктів, забруднених радіонуклідами.

#### **Список використаних джерел:**

- 1) Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97), Державні гігієнічні нормативи. Київ, 1998. – 135 с.
- 2) Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер. с англ. / Под ред. М. Ф. Киселева и Н. К. Шандалы. М. : Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 344 с.
- 3) Ильин Л. А. Радиационная гигиена / Л. А. Ильин, В. Ф. Кириллов, И. П. Коренков. – М., 2010. – 384 с.
- 4) Порядок звільнення радіоактивних матеріалів від регулюючого контролю у рамках практичної діяльності. Наказ Державного комітету ядерного регулювання України № 84 від 01.07.2010.
- 5) Норми радіаційної безпеки України; доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000).
- 6) Balakin V., Mashinistov V., Galkin O., Bilan K. Technology of recycling radioactively contaminated metal by the method of melting // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/5(82). – P. 31-37.
- 7) Балакин В. Ф., Машинистов В. Е., Коверя А. С. Перспективная технология рециклинга радиоактивно загрязненного металла на основе его плавления // Ядерна та радіаційна безпека. – 2018. – № 2 (78). – С. 43 - 48.
- 8) Балакин В. Ф., Машинистов В. Е., Коверя А. С., Лукін Є. В. Промислова технологія утилізації насосно-компресорних труб, що забруднені природними радіонуклідами, на основі їх плавлення // Нафтогазова галузь України. – 2019. – № 4. – С. 33 - 37.
- 9) Машинистов В. Е. Решение проблемы утилизации радиоактивно загрязненных объектов на основе эффекта самодезактивации / В. Е. Машинистов, В. Ф. Балакин, А. С. Коверя // Екологічні науки. – 2020. – № 28. – С. 173 - 181. DOI:10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.27.



# **RADIATION SAFETY IN USING THE TECHNOLOGY OF RECYCLING RADIOACTIVE CONTAMINATED METAL BY THE SELF- DECONTAMINATION EFFECT**

*Mashinistov Victor, Balakin Valerii,  
National metallurgical academy of Ukraine, Gagarin av., 4, 49600, Dnipro,  
mashvic@i.ua  
Koveria Andrii  
Dnipro University of Technology, D. Yavornytskoho av., 19, 49005, Dnipro,  
Koverya.A.S@nmu.one*

## **Abstract**

Objects with an increased level of surface contamination with radionuclides create situations of existing hazardous long-lasting irradiation of the population, which makes their further application impossible. The condition for their return to economic circulation is to reduce the level of radiation from their surface to an acceptable level.

The paper shows an approach and describes an example that makes it possible to obtain a radiation-safe metal from a radioactively contaminated metal by melting and subsequent transformation of an open-type ionizing radiation source with radionuclides on the surface, into a closed-type source. The proposed technique is characterized by high technical and economic indicators and applies to other solid objects contaminated with radionuclides. Recycling technology is based on natural laws and allows obtaining radiation-safe substances that are suitable for use without any restrictions.

**Key words:** radioactively contaminated metal, recycling, irradiation, ionizing radiation, decontamination, dose limit.

# БАГАТОРІЧНА ДИНАМІКА ЗНАЧЕНЬ ШВИДКОСТІ ОСАДЖЕННЯ $^{90}\text{Sr}$ ЗА ДАНИМИ ВИМІРЮВАНЬ В КИЄВІ ТА ЧОРНОБИЛІ ПІСЛЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АВАРІЇ

Новіков А. М.

Інститут проблем безпеки АЕС НАН Україна, вул. Лисогірська, 12, 03028,  
Київ, e-mail: andreyn@ua.fm

## Abstract:

From the analyzed experimental data of the measurements obtained after the Chernobyl accident for Kyiv and Chernobyl during 1987 -2019, it appears that there is generally a strong positive correlation between the  $^{90}\text{Sr}$  average annual volume activity values  $C$  and the fallout flux density  $F$ . It makes possible, to a certain extent, to further estimate the deposition velocity  $V$  of radioactive aerosols using the ratio between the volume activity and depositional fluxes  $F=V\cdot C$ .

For  $^{90}\text{Sr}$ , for the considered 33-year period after the Chernobyl accident, there is an increase in the deposition rate, which is most indicative of a decrease over time in the role of particles of smaller aerodynamic diameters in its migration.

The different dynamics of the deposition velocity of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  obtained according to the estimates is maybe the indicative of the transformation of these radionuclide carriers and requires a more detailed study.

**Keywords:** environmental safety, monitoring, volume activity, deposition fluxes, deposition velocity, Chernobyl accident,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ .

## Вступ

Відомо, що час перебування радіонуклідів у повітрі, а отже і відстані, які вони можуть долати під час міграції залежать від їх швидкості осадження на земну поверхню. Існування залежності між потоком щільності випадінь  $F(\text{Бк}/(\text{м}^2\cdot\text{с}))$  та об'ємною активністю  $C(\text{Бк}/\text{м}^3)$  може бути використано як для оцінки швидкості осадження радіонукліду  $V(\text{м}/\text{с})$ , так і для зворотних розрахунків  $C$  та  $F$  [1]. В той же час, згідно з експериментальними даними вимірювань, значення швидкості осадження можуть змінюватися в межах трьох порядків величини. Така невизначеність щодо оцінених значень швидкості осадження потребує детального аналізу закономірностей формування потоків радіоактивного забруднення в повітрі та його осадження в залежності від часу після випадінь, часових інтервалів вимірювань, властивостей підстильної поверхні, метеорологічних умов тощо.

Враховуючи, що достовірна оцінка атмосферного розповсюдження радіоактивного аерозолю та формування радіоактивного забруднення приземного повітря та земної поверхні є пріоритетним завданням екологічної безпеки [2], проведено оцінку середньорічних значень швидкості осадження  $^{90}\text{Sr}$  чорнобильського походження та наведено її динаміку за період після аварії на ЧАЕС. Метою роботи є інформаційне забезпечення емпіричної параметризації швидкостей осадження в моделях якості атмосферного повітря.

### Вхідні дані та методи дослідження

В роботі було проведено пошук, аналіз (візуальний, аналітичний, статистичний та ін.), оцифрування та обробку (порівняння, узгодження) експериментальних даних часових рядів за період з 1987 по 2019 рік об'ємної активності та потоку щільності випадінь  $^{90}\text{Sr}$ , наведених в оглядах стану забруднення навколишнього середовища на території України за спостереженнями гідрометеорологічної мережі (Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського (ЦГО)), а також за іншими роботами з моніторингу та дослідження радіоактивного забруднення в Україні.

### Результати та обговорення

З кореляційного аналізу між об'ємною активністю  $C$  та потоком щільності випадінь  $F$ , як в межах однієї площадки, так і між площадками Києва та Чорнобиля, спостерігаються сильні позитивні кореляційні залежності (коефіцієнти кореляції Пірсона  $r \approx 1$ ), які певною мірою відповідають уявленням щодо можливості проведення оцінки швидкості осадження  $V$  з використанням співвідношення  $F = V \cdot C$ .

Розраховані часові ряди швидкості осадження  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$ , а також лінії тренду апроксимовані простою експоненціальною функцією, представлені на рис. 1. Коефіцієнти апроксимованих функцій ліній тренду наведено в таблиці 1, де  $R^2$  – коефіцієнт апроксимації.

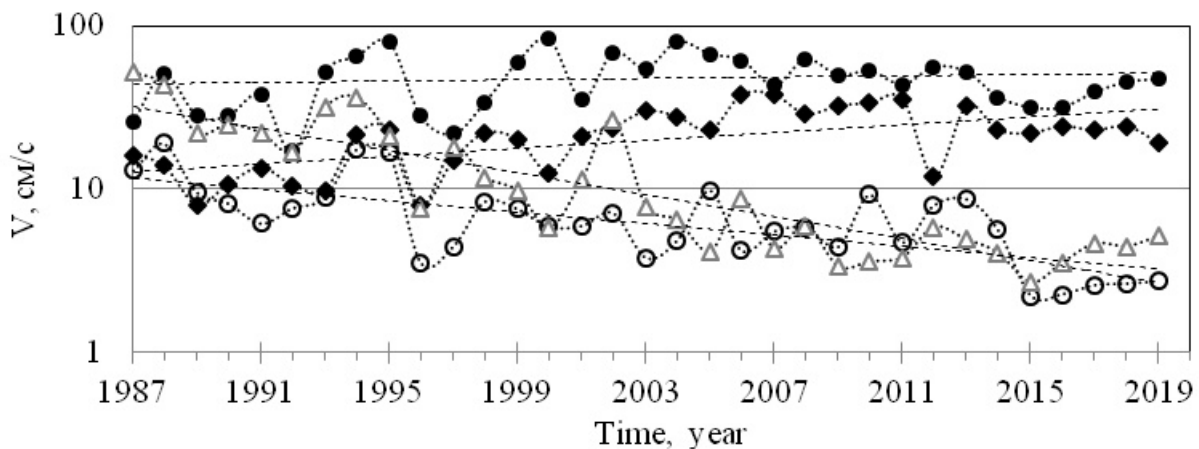


Рис. 1. Динаміка середньорічних значень швидкості осадження  $^{90}\text{Sr}$   $\bullet\bullet\bullet$  – у Києві та  $\blacklozenge\blacklozenge\blacklozenge$  – у Чорнобилі, а також  $^{137}\text{Cs}$   $\Delta\Delta\Delta$  – у Києві та  $\circ\circ\circ$  – у Чорнобилі.

Таблиця 1. Коефіцієнти апроксимованих функцій ліній тренду  $V(t)$ , 1987 – 2019 рр.

$V(t) = ae^{-\frac{t}{T_{0.5}} \ln(2)}$	Чорнобиль		Київ	
	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$
$a$	12.39	11,59	38.28	36.11
$T_{0.5}$ , рік	-25.02	17,3	-79.67	8.66
$R^2$	0.36	0,46	0.05	0.78

Для швидкості осадження  $^{90}\text{Sr}$  спостерігається пряма кореляційна залежність з часом, що більш за все свідчить про зменшення з часом ролі у його перенесенні частинок менших аеродинамічних діаметрів, на відміну від частинок носіїв  $^{137}\text{Cs}$ , для якого спостерігалась обернена кореляційна залежність [4].

Залучення метеорологічних даних [3] до аналізу надає можливість виявити сильні кореляційні зв'язки між об'ємною активністю (а також потоком щільності випадінь) та максимальною (середньою) швидкістю вітру, що свідчить про вплив вітрового підйому у формуванні потоків радіоактивного забруднення. Стійких закономірностей щодо існування кореляцій, значимих на рівні  $p < 0,05$ , між середньорічними значеннями  $C$  (а також  $F$ ) та мінімальною, середньою, максимальною, сумарною вологістю або кількістю опадів на даному етапі досліджень не виявлено (наявні окремі випадки, які потребують додаткового розгляду та спроби інтерпретації).

### **Висновок**

З проаналізованих експериментальних даних вимірювань, отриманих після аварії на Чорнобильській АЕС для Києва та Чорнобиля, протягом 33-річного періоду 1987–2019 рр., виявлено, що загалом існує сильна позитивна кореляція між середньорічними значеннями об'ємної активності та потоком щільності випадінь  $^{90}\text{Sr}$ . Це певною мірою задовольняє уявленням щодо можливості проведення оцінки швидкості осадження  $V$  радіоактивних аерозолів з використанням співвідношення між об'ємною активністю та потоком щільності випадінь  $F = V \cdot C$ .

Зростаючі лінії тренду  $V(t)$  та прямий кореляційний зв'язок між швидкістю осадження та часом, може свідчити про збільшення з часом ролі у міграції  $^{90}\text{Sr}$  (на відміну від  $^{137}\text{Cs}$ ) частинок більших аеродинамічних діаметрів. Тобто, можливо (переважаючими) носіями  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  являються різні частинки, в зв'язку з чим і спостерігається різна швидкість їх осадження.

### **Список використаних джерел:**

1. UNSCEAR, Sources and Effects of Ionising Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, United Nations, New York, 2000. — Режим доступу: [https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Report\\_Vol.I.pdf](https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf)

2. Талерко М. М. Моделювання атмосферного розповсюдження радіоактивності, винесеної в повітря в результаті лісових пожеж у зоні відчуження у квітні 2020 р. / М. М. Талерко, Т. Д. Лев, І. В. Ковалець, Ю. В. Яценко // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — Вип. 3 (18). — С. 86 – 104. — Режим доступу: <http://npe.org.ua/wp-content/uploads/2020/10/18-11.pdf>

3. Новіков А. М. Застосування інформаційно-пошукових систем для забезпечення наукових робіт архівними метеорологічними даними / А. М. Новіков // Комп'ютерні та інформаційні системи і технології: тези доповідей третьої Міжнародної науково-технічної конференції. — 2019. — С. 25 - 26. — Режим доступу: <https://nure.ua/wp-content/uploads/workshop/csitic.2019.pdf>

4. Новіков А. М. Ретроспективний аналіз середньорічних значень швидкості осадження  $^{137}\text{Cs}$  після Чорнобильської аварії / А. М. Новіков // Ядерна енергетика та довкілля — 2020. — Вип. 1 (16) — С. 68-78. doi.org/10.31717/2311-8253.20.2.8. — Режим доступу: <http://npe.org.ua/wp-content/uploads/2020/07/17-8.pdf>

## **НОВИЙ НАВЧАЛЬНИЙ КУРС ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ ФАХІВЦІВ ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ «ЗНЯТТЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЯДЕРНИХ УСТАНОВОК»**

*Носовський А. В., Паскевич С. А., Стельмах Д. А. \*,  
Кучинський В. К. \**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,  
м. Чорнобиль. вул. Кірова 36а*

*\*ДСП Чорнобильська АЕС, м. Славутич,  
вул. 77-ї Гвардійської дивізії, буд 7/1*

Об'єднання зусиль між Славутицькою філією НТУ України КПІ ім. Ігоря Сікорського, ДСП Чорнобильська АЕС, Інститутом проблем безпеки АЕС НАНУ та адміністрацією міста Славутич уможливило проведення першого навчального курсу з підвищення кваліфікації фахівців, що пов'язані з діяльністю по зняттю ядерних установок з експлуатації. Навчання передувала клопітка робота по розробці Програми навчального курсу, яка була погоджена в 2020 році в НТУ України КПІ ім. Ігоря Сікорського. Крім того, впродовж 2020 року тривали перемовини безпосередньо між організаторами навчання, щодо погодження зон відповідальності та планування навчального процесу в місті Славутич та, що особливо важливо, проведення практичних занять безпосередньо на Чорнобильській АЕС.

В лютому 2021 року було проведено навчальний курс з підвищення кваліфікації в напрямку «Зняття з експлуатації ядерних установок». Слухачам курсу була запропонована навчальна програма виконана в рамках існуючої в КПІ спеціальності «Атомна енергетика».

В період з 22 лютого по 5 березня 2020 року відбулось навчання першої групи слухачів курсів, якими стали персонал Чорнобильської АЕС та співробітники Інституту проблем безпеки АЕС НАН України. Загальний обсяг курсу склав 72 навчальні години з яких крім теоретичних було відведено 24 години практичним заняттям на майданчику Чорнобильської АЕС.

Впродовж навчання слухачі були ознайомлені з основними аспектами зняття з експлуатації АЕС, нормативною базою, з світовим та вітчизняним досвідом зняття з експлуатації ядерних установок. Важливим аспектом навчання стало вивчення можливих варіантів зняття з експлуатації АЕС та алгоритм проведення оцінки витрат цієї діяльності. Спочатку на лекційних заняттях, а потім безпосередньо на майданчику Чорнобильської АЕС слухачі курсів дізнались про важливість комплексного інженерного й радіаційного обстеження (КІРО) ядерної установки, як одного з початкових ланцюгів діяльності по зняттю з експлуатації АЕС. Спеціалісти Чорнобильської АЕС ознайомили з етапами КІРО та досвідом його проведення.

Керуючись даними отриманими при проведенні КІРО спеціалісти ЧАЕС проводять роботи з демонтажу обладнання, що знаходиться поза межами ядерного реактору та його систем. Слухачі курсів були детально ознайомлені з діючою на Чорнобильській АЕС інфраструктурою для демонтажу: відвідали майданчики де відбувається демонтаж обладнання, майданчики складування

та ознайомились з інфраструктурою поводження з демонтованим обладнанням. Важливим елементом робіт з демонтажу є звільнення демонтованих матеріалів від регулюючого контролю. Слухачів курсу ознайомили з практичною діяльністю по звільненню матеріалів від регулюючого контролю на діючій установці зі звільнення, що нещодавно була збудована на ЧАЕС. Впродовж навчання слухачі дізнались про організацію та порядок виконання робіт з демонтованими та дезактивованими металом на установці зі звільнення матеріалів від регулюючого контролю.



Рис. 1 – Лекційні заняття слухачів курсу на базі Навчально-тренувального центру ДСП ЧАЕС

Важливим аспектом зняття АЕС з експлуатації на етапі демонтажу обладнання є питання радіаційної безпеки для захисту персоналу та довкілля від негативних чинників демонтажу, так і питання поводження з радіоактивними відходами, що накопичення в період експлуатації ядерних енергоблоків та РАВ, що утворюються на етапі зняття з експлуатації енергоблоків. Суть проблем пов'язаних з поводженням з РАВ та складність процесів характеристизації, сортування, пакування РАВ на ЧАЕС було донесено до слухачів курсів впродовж занять на Заводі з переробки рідких РАВ та на Промисловому комплексі з поводження з твердими РАВ. Керівники та інженери цих виробництв ознайомили слухачів з процесами та діючим обладнанням цих заводів. Наприклад, великий інтерес в слухачів викликали обладнання «гарячих» камер, що діють на заводі з переробки твердих РАВ, а також установки по спалюванню та компактуванню твердих РАВ.





Рис. 2 – Ознайомлення слухачів навчального курсу з умовами зберігання контейнерів для РАВ на заводі з переробки рідких РАВ



Рис. 3 – Практичні заняття в радіохімічній лабораторії слухачів курсу на заводі з переробки рідких РАВ

Окремим, центральним питанням виведення ядерних установок з експлуатації є питання поводження з відпрацьованим ядерним паливом. Під час навчання слухачі ознайомились з технологіями поводження з ВЯП та відвідали сховище відпрацьованого ядерного палива №1 мокрого типу. Під час практичних занять безпосередньо на території СВЯП 1 слухачів ознайомили з особливістю мокрого зберігання ВЯП на ЧАЕС та діючими регламентами експлуатації систем важливих для безпечного зберігання ВЯП.

Зараз на ЧАЕС розпочався технологічно складний та відповідальний етап з перевантаження ВЯП з СВЯП 1 до СВЯП 2. СВЯП 2 - сховище сухого типу,

де ВЯП з реакторів ЧАЕС розрізається навпіл та складається в спеціальні контейнери та встановлюється на сторічне зберігання в спеціальні бетонні модулі. Впродовж навчання слухачі були ознайомлені з процедурою перевезення ВЯП та підготовки ВЯП для зберігання на СВЯП 2. На майданчику ЧАЕС слухачі відвідали СВЯП 2, ознайомились з діючими системами по поводженню з ВЯП.



Рис. 4 – Ознайомлення з технологією поводження з ВЯП на СВЯП-2



Рис. 5 – Ознайомлення з призначенням та роботою обладнання «гарячої» камери СВЯП-2

Таким чином, організатори навчання змогли дати слухачам навчальний курсів комплексний, цілісний об'єм знань щодо діючих технологій, що можуть застосовуватись для завдань зняття АЕС з експлуатації, а також ознайомили з основними технологічними ланцюгами по поводженню з ВЯП,



РАВ та демонтованим обладнанням на Чорнобильській АЕС. З іншого боку, проведення першого навчання в Славутичі та на майданчику Чорнобильської АЕС показало наявність великого потенціалу для організації процесу навчання і особливо – наявність унікальної практичної бази для оволодіння інформацією по зняттю ядерних енергоблоків з експлуатації, яка є на майданчику Чорнобильської АЕС та спеціалістів, що там працюють.

Зняття з експлуатації ядерних установок не закінчується демонтажем обладнання. Завершальна діяльність полягає у низці заходів щодо відновленню екологічно-безпечного стану майданчиків розташування ядерних установок, місць тимчасового зберігання РАВ та інше. В тематику курсу також були включені лекції для ознайомлення з існуючими технологіями реабілітації та ремедіації ділянок та можливості повернення їх до використання. Зважаючи на великий досвід мінімізації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС слухачам курсу було проведено лекції про основні заходи з реабілітації, які були виконані в гострий період аварії, а також в період до 2000 року на території Чорнобильської зони відчуження. Представлено інформацію про проекти з реабілітації, що здійснюються зараз на території України на ділянках історичних захоронень РАВ радянського періоду та реабілітації радіоактивно забруднених ділянок, що знаходяться за межами Чорнобильської зони відчуження та утворились в гострий період ліквідації аварії на ЧАЕС. Значна увага була приділена висвітленню міжнародного досвіду з реабілітації території на майданчиках розташування ядерно та радіоактивно небезпечних підприємств та знайомству з проблемами, що пов'язані з розповсюдженням радіонуклідів в навколишньому середовищі.

В Славутичі теоретичні заняття проводились на базі Навчально-тренувального центру Чорнобильської АЕС, який має відповідну матеріальну базу, а також лекторів, які є фахівцями зі значним практичним досвідом роботи на ЧАЕС та в галузі знання з експлуатації атомної енергоустановки. Наявність та функціонування такої установи в місті є важливим базисом для розвитку цього освітнього проекту. Перспективи подальшого розвитку, проведення наступних циклів навчання буде успішним при залученні цього центру Чорнобильської АЕС.

Участь фахівців-атомників в якості слухачів курсу показало наявність зацікавленості до навчань зі зняття ядерних установок з експлуатації та підвищені кваліфікації в Славутичі та на Чорнобильській АЕС. Для міста Славутич, це також важлива подія, оскільки це дає шанс у майбутньому перетворитись на один з важливих регіональних центрів спеціальної професійної освіти.

Проведення курсів показало що спільними зусиллями організаторів в місті та на Чорнобильській АЕС можливе створення повноцінного учбового процесу. Це перший етап, який успішно пройдений. Наступним етапом має бути формування курсу як повноцінного, конкурентного ринкового продукту, який буде користуватись попитом на ринку освіти, як в нашій державі, так і за її кордонами. На цьому етапі необхідно направити зусилля на інформаційну підтримку, найширший розголос та донесення інформації про навчальний курс та його унікальних складових, до потенціальних слухачів.

# СУЧАСНИЙ СТАН НЕОРГАНІЗОВАНИХ СКУПЧЕНЬ РАДІОАТИВНО ЗАБРУДНЕНОЇ ВОДИ В ПІДРЕАКТОРНИХ ПРИМІЩЕННЯХ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

*Одінцов О. О., Хан В. Е., Паламар Л.А., Сабенін П. В.  
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,  
вул. Кірова, 36-а, Чорнобиль, 07270, Україна, ooodin@ukr.net*

Представлені експериментальні визначення об'ємів і радіаційних характеристик радіоактивно забрудненої води (РЗВ) в неорганізованих скупченнях рідких радіоактивних відходів на нижніх позначках об'єкту "Укриття" (ОУ) після встановлення нового безпечного конфайнмента (НБК) в проектне положення. Досліджена динаміка зменшення об'ємів та зміни концентрації урану і об'ємних активностей радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  і  $^{241}\text{Am}$  у радіоактивно забрудненої води на нижніх позначках НБК-ОУ.

В листопаді 2016 р. «Арка» НБК була встановлена в проектне положення над об'єктом «Укриття». Встановлення НБК в проектне положення призвело до змін режиму надходження води в під покрівельний простір ОУ. В першу чергу було припинено надходження атмосферних опадів. Змінилися умови вентиляції приміщень ОУ та температурно-вологого режиму в ньому. Це призвело до значних змін умов утворень неорганізованих скупчень РЗВ в приміщеннях ОУ. До встановлення «Арки» НБК в проектне положення основними джерелами надходження води в об'єкт «Укриття» були атмосферні опади, конденсаційна волога і технологічні розчини, які надходять у під час сеансів пило пригнічення. Середньорічне надходження атмосферних опадів в під покрівельний простір об'єкту «Укриття» складало порядку  $1700 \text{ м}^3$ . В приміщеннях об'єкту «Укриття» на позначках нижче + 12,5 м постійно знаходилось, в залежності від сезону,  $330 - 350 \text{ м}^3$  РЗВ. Основна кількість РЗВ приблизно  $270 \text{ м}^3$  локалізована у приміщенні 001/3 допоміжних систем реакторного відділення (ДСРВ) на позначки – 2,60 м. В приміщеннях басейна – барботера (ББ) на позначках – 0,65 м і +2,20 м постійно знаходилось  $40 - 50 \text{ м}^3$  РЗВ.

Ціль даної роботи - вивчення динаміки змін об'ємів радіоактивно забрудненої води, концентрації урану, макрокомпонентів і об'ємній активності радіонуклідів в неорганізованих скупченнях РЗВ в приміщеннях об'єкту «Укриття» в умовах експлуатації НБК - ОУ за період 2017 – 2020 р.р.

Щомісячний моніторинг скупчень РЗВ показав значне зменшення об'ємів води в приміщеннях 009/4, 012/5 – 8, 012/13 – 16, 013/2, 014/2, 017/2, 061/2 і 210/5 – 7. В березні 2019 р. скупчення РЗВ у приміщенні 009/4 повністю висохло. На початку червня 2018 р. вода в приміщенні 012/5 - 8 практично висохла. В наслідок конденсації вологи за період серпень – вересень в приміщеннях 012/5–8 з'явилися скупчення води площею до  $10 - 15 \text{ м}^2$  і глибиною від 0,5 до 1,0 см. Об'єми скупчень регулюються процесами випарювання та конденсації. В північній частині приміщень 012/14 – 16 на позначке + 2,20 м та південній частині приміщення 012/13 – 16 в 2020 р. вода відсутня. Висихання скупчень РЗВ відбулося за рахунок випарювання води. Конденсат, який утворюється в літні місяці, не компенсує об'єми води, що випарюється у зимовий час.

В таблиці наведені результати визначення об'ємів РЗВ в приміщеннях НБК – ОУ в листопаді 2016 р. і липні 2020 р. Оціночна кількість РЗВ на нижніх позначках ОУ до встановлення НБК складала приблизно 340 м<sup>3</sup>. За три з половиною роки експлуатації НБК кількість РЗВ знизилась до 277 м<sup>3</sup>. Загальний об'єм РЗВ на нижніх позначках НБК-ОУ зменшився більш чим на 70 м<sup>3</sup> в основному за рахунок випарювання води.

Таблиця. Об'єми основних водних скупчень в приміщеннях НБК - ОУ

Приміщення	Позначка	Вісь	Ряд	Об'єм води, м <sup>3</sup>	
				2016 р.	2020 р.
012/5 - 8	-0,65	45 - 49	Г - Ж	17,0	0
012/5 - 8	-0,65	45 - 49	П - Т	9,5	6,4
009/4	-0,65	49 - 50	Ж - И	3,2	0
012/13 - 16	2,20	45 - 49	Г - Ж	25,0	0
012/13 - 16	2,20	45 - 49	П - Т	3,1	0,75
013/2	0,00	44 - 45	Г - Е	1,2	0
014/2	0,00	44 - 45	Ж - И	0,2	0
017/2	0,00	43 - 44	Г - Е	5,4	0,02
018/2	0,00	42 - 43	Г - И	0,1	0
061/2	6,00	41 - 42	Е - Ж	3,6	0
001/3	- 2,60	41 - 52	У – У <sub>1</sub>	275	270

Постійний моніторинг складу макрокомпонентів, урану і об'ємних активностей <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>238</sup>Pu, <sup>239+240</sup>Pu і <sup>241</sup>Am у воді неорганізованих скупчень на нижніх позначках НБК – ОУ показав стійкий тренд збільшення концентрацій карбонатів, гідрокарбонатів, урану і об'ємних активностей радіонуклідів <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>239+240</sup>Pu і <sup>241</sup>Am у воді приміщень 009/4, 012/7, 012/16, 014/2 и 017/2.

Як приклад на рисунку показана динаміка збільшення об'ємних активностей радіонуклідів <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>239+240</sup>Pu і <sup>241</sup>Am в РЗВ приміщення 017/2. Об'ємна активність <sup>90</sup>Sr збільшилась в 5 раз до величини  $1,7 \cdot 10^8$  Бк/м<sup>3</sup>. Об'ємна активність <sup>137</sup>Cs збільшилась в 7 раз до величини  $1,9 \cdot 10^{10}$  Бк/м<sup>3</sup>. Об'ємна активність <sup>239+240</sup>Pu збільшилась в 8 раз до величини  $4,2 \cdot 10^6$  Бк/м<sup>3</sup>. Об'ємна активність <sup>241</sup>Am збільшилась в 5 раз до величини  $4,9 \cdot 10^6$  Бк/м<sup>3</sup>.

Об'ємна активність <sup>137</sup>Cs в РЗВ приміщеннях 001/3 практично не змінюється і знаходиться на рівні  $7 \cdot 10^9 - 1,1 \cdot 10^{10}$  Бк/м<sup>3</sup>. Об'ємні активності <sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu і <sup>241</sup>Am в воді приміщення 001/3 з початку січня 2017 р. мають постійний тренд до у зменшення і в червні 2020 р. складала <sup>90</sup>Sr –  $1,4 \cdot 10^9$  Бк/м<sup>3</sup>, <sup>239+240</sup>Pu –  $5,8 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>3</sup> і <sup>241</sup>Am –  $6,2 \cdot 10^9$  Бк/м<sup>3</sup>. Зниження об'ємної активності <sup>90</sup>Sr можливо за рахунок утворювання важкорозчинних карбонатів SrCO<sub>3</sub> і соосадження їх з карбонатами кальцію CaCO<sub>3</sub> в умовах сильно лужного середовища при рН 9,2 і концентрацій CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 160 – 190 мг/дм<sup>3</sup>. Зниження об'ємної активності <sup>239+240</sup>Pu і <sup>241</sup>Am ймовірно відбувається за рахунок коагуляції гідроксидові плутонію Pu(OH)<sub>4</sub> і Am(OH)<sub>3</sub> і осадження спільно з гідроксидами заліза Fe(OH)<sub>3</sub>. Можливо також надходження води з високим вмістом <sup>137</sup>Cs і низьким вмістом <sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu і <sup>241</sup>Am.

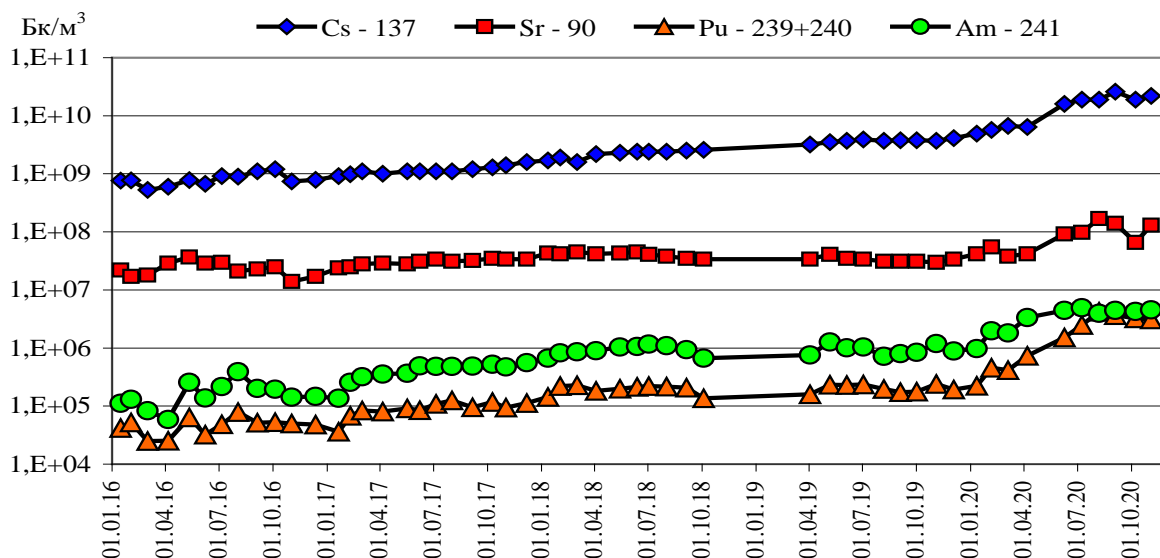


Рис. Динаміка змін об'ємних активностей радіонуклідів в РЗВ приміщення 017/2.

Встановлення «Арки» НБК в проектне положення повністю виключила можливість надходження атмосферних опадів в підкрівельний простір об'єкту «Укриття». За три з половиною роки з моменту встановлення НБК в приміщеннях 013/2, 014/2, 017/2, 009/4, 012/5 – 8 (південна частина) і 012/13 – 16 (південна частина) неорганізовані скупчення РЗВ повністю висохли. Сумарний об'єм РЗВ на нижніх позначках об'єкту «Укриття» зменшилися приблизно на 70 м<sup>3</sup>.

Утворення конденсаційної вологи в літній період істотно не впливає на об'єми скупчень РЗВ.

При випарюванні води відбувається значне (10 – 20 кратне) збільшення концентрації урану, макрокомпонентів і об'ємної активності радіонуклідів <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>238</sup>Pu, <sup>239+240</sup>Pu і <sup>241</sup>Am в скупченнях РЗВ.

В приміщеннях 001/3, 012/6 – 8 (прямки на позначці – 0,95) і 012/13 (північна частина) кількість РЗВ за період 2017 – 2020 рр. практично не змінилося, ймовірно, випарювання води компенсується надходженням трапних вод за рахунок не герметичності технологічних комунікації водопостачання і/або водовідводу об'єкту «Укриття».

## MODERN STATE OF THE UNORGANIZED ACCUMULATIONS OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED WATER IN THE SUBREACTOR ROOMS OF “SHELTER” OBJECT

*Odintsov Oleksii, Khan Valeriy, Palamar Larisa, Sabenin Pavel*  
*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str.,*  
*36a, Chernobyl, 07270, Ukraine, oodin@ukr.net*

Experimental data on the determination of the volumes and radiation characteristics of radioactively contaminated water in unorganized accumulations

of liquid radioactive waste at the lower marks of the Shelter object after the installation of the new safe confinement in the design position are presented. In the period December 2016 - June 2020 the volume of radioactively contaminated water in rooms 017/2, 012/5 - 8 and 012/13 - 16 decreased by more than 10 times. In rooms 009/4, 013/2, 014/2 and 210/5 - 7, the water has dried completely. A decrease in the amount of radioactively contaminated water occurs due to the evaporation of water in the autumn - winter seasons and is not compensated by the formation of condensation moisture in the summer. As a result of water evaporation, the concentrations of macro components and uranium, as well as the volumetric activities of radionuclides  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154},^{155}\text{Eu}$ ,  $^{238},^{239},^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{244}\text{Cm}$  in the radioactively contaminated water increased significantly. The volumetric activities of radionuclides are  $^{90}\text{Sr}$  -  $n \cdot 109$ ,  $^{137}\text{Cs}$  -  $n \cdot 1010$ ,  $^{154}\text{Eu}$  -  $n \cdot 106$ ,  $^{239} + ^{240}\text{Pu}$  -  $n \cdot 106$ ,  $^{241}\text{Am}$  -  $n \cdot 107$ ,  $^{244}\text{Cm}$  -  $n \cdot 105$  Bq / m<sup>3</sup>. As a result of drying out accumulations of radioactively contaminated water, highly active deposits are formed, which are a source of radioactive aerosols in the premises of the Shelter object.

#### **Дані про доповідача**

Прізвище, ім'я та по батькові	Одінцов Олексій Олексійович
Назва установи	ІПБ АЕС НАН України
Посада, науковий ступінь	Зав. сектором, к.т.н., ст.н.с.
E-mail	ooodin@ukr.net
Контактний телефон	097 307 99 85 , 04593 - 51772

# ОЦІНКА РАДІАЦІЙНОГО РИЗИКУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ З ПІДТРИМКОЮ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ В РАДІОАКТИВНОМУ ДОВКІЛЛІ

*Паскевич С. А., Підберезний С. С.*

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль*

*spidbereznyy@gmail.com*

*s.paskevich@isnpp.kiev.ua*

**Резюме:** Розроблено модель процесу «раннього» демонтажу будівельних конструкцій об'єкта «Укриття» в програмі ChNPP VRdose Planner Pro, показано візуальне відображення зміни радіаційного поля над покрівлею ОУ.

Розроблено модель технологічного процесу поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) у будівлі приймання Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП) в програмі ChNPP VRdose Planner Pro, показана можливість використання віртуальних моделей сценаріїв радіаційно - небезпечних робіт для оптимізації дозових навантажень персоналу.

**Ключові слова:** ChNPP VRdose Planner, гама-випромінювання, об'єкт «Укриття», Централізоване сховище відпрацьованого ядерного палива ЦСВЯП.

**Annotation.** A model of the process of "early" deconstruction of building structures of the Shelter Object has been developed using ChNPP VRdose Planner program, a visual representation of the change in the radiation field over the SO roof has been shown.

We have developed a model of the technological process for handling spent nuclear fuel (SNF) in the reception building of the Centralized Storage Facility for Spent Nuclear Fuel (CSFSF) using the ChNPP VRdose Planner. The results of the technological process simulation proved the reliability of the virtual models for scenarios of radiation-hazardous work for the optimization of the dose loads of personnel.

**Key words:** ChNPP VRdose Planner, the Shelter Object, gamma radiation, Central Storage Facility for spent fuel at CSFSF.

## **Вступ**

Забезпечення радіаційної безпеки в період експлуатації об'єктів, які використовують ядерні та радіаційні технології, є надзвичайно важливим завданням. Для аналізу радіаційної обстановки і планування проведення радіаційно - небезпечних робіт у цих умовах зазвичай використовуються методи математичного моделювання. На даний час найбільш точним з них вважаються метод Монте-Карло [1]. Однак, розрахунок полів випромінювання за допомогою даного методу, а особливо для об'єктів, що мають значні розміри або з біологічним захистом досить значної товщини, вимагає значних обчислювальних ресурсів.

Альтернативою методу Монте Карло є методи на основі моделі точкового джерела (point kernel) [1]. Даний підхід, хоча і має меншу точність, дозволяє проводити розрахунок і аналіз радіаційної обстановки практично в реальному масштабі часу [2].

Для аналізу радіаційної обстановки необхідний ефективний метод розрахунку просторового розподілу дози іонізуючого випромінювання, а також засоби візуалізації результатів розрахунків. Програмний продукт ChNPP VRdose Planner Pro, розроблений в Інституті енергетичних технологій (IFE), Норвегія, являє собою інструмент для моніторингу навколишніх умов та планування дій у реальному часі. Цей додаток дозволяє у динаміці візуалізувати радіологічні умови методами віртуальної реальності, а також здійснювати персональний моніторинг в реальному часі для «манекенів», що імітують рух реальних людей.

У даній роботі для проведення такого розрахунку використовувався програмний продукт ChNPP VRdose Planner Pro, розроблений в рамках проекту «Центр візуалізації зняття з експлуатації ЧАЕС - розширення і оптимізація Планувальника ЧАЕС» [3]. Даний програмний продукт (програма) включає в себе розрахунковий модуль на основі моделі точкового джерела, а також розвинені засоби візуалізації та аналізу даних отриманих в результаті розрахунків. Необхідно зазначити, що у випадку застосування цієї програми залишається можливість візуалізації і аналізу даних отриманих і із зовнішніх джерел, таких, як експериментальні вимірювання або розрахунок методом Монте Карло.

#### **Методика розрахунків**

Результати аналізу радіаційної обстановки можуть бути використані при плануванні проведення робіт в радіаційно - небезпечних умовах для забезпечення захисту персоналу відповідно з принципом ALARA.

У ChNPP VRdose Planner Pro використовуються алгоритми розрахунку, засновані на методі точкового джерела. Даний метод заснований на розбитті просторового джерела випромінювання на малі елементи і розрахунок дози від кожного такого елемента здійснюється за формулою:

$$H_i = A \frac{B \exp(-\mu r_i)}{r_i^2}, \quad (1)$$

де  $A$  - відповідний дозовий коефіцієнт,  $B$  - фактор накопичення,  $\mu$  - коефіцієнт ослаблення випромінювання,  $r_i$  - відстань від елемента джерела до точки, де обчислюється потужність дози випромінювання.

Доза від усього просторового джерела в цьому випадку визначається як сума доз від всіх точкових джерел і визначається за формулою:

$$H = \sum H_i, \quad (2)$$

Метод точкового джерела дозволяє у динаміці моделювати мінливі умови в реальному масштабі часу. При цьому зміна характеристик джерел

випромінювання і властивостей захисту призводить до автоматичного коригування розрахункової радіаційної обстановки і всіх пов'язаних з нею візуальних уявлень.

Розрахунок і аналіз параметрів радіаційного захисту здійснювався в два етапи. Спочатку розраховувалися характеристики джерел радіоактивного випромінювання у ядерному паливі з урахуванням відповідних параметрів вигорання і часу витримки. Далі моделювалось проходження випромінювання через біологічний захист для розрахунку значень потужності дози.

### **Попередні результати оцінки двовірного розподілення гама-полів над «легкою» покрівлею і накатом із труб ЦЗ**

У роботі проведений аналіз радіаційної обстановки над покрівлею об'єкта «Укриття», зокрема створені моделі будівельних конструкцій, які у деякій мірі екранують гамма-випромінювання, що іде з центрального залу, а також зроблені висновки про основні джерела випромінювання.

Запропонована модель може дати вихідну інформацію для оцінки потенційних дозових навантажень на персонал у разі ситуацій, пов'язаних з виконанням робіт по демонтажу «легкої» покрівлі та накату із труб. Тривимірний масив точок був побудований для об'єму розміром у напрямку «північ-південь» 50м, у напрямку «схід-захід» 60м, при висоті 9м, точки якого розташовані по регулярній мережі з кроком 3м, і для джерел з ефективною енергією 662 кеВ.

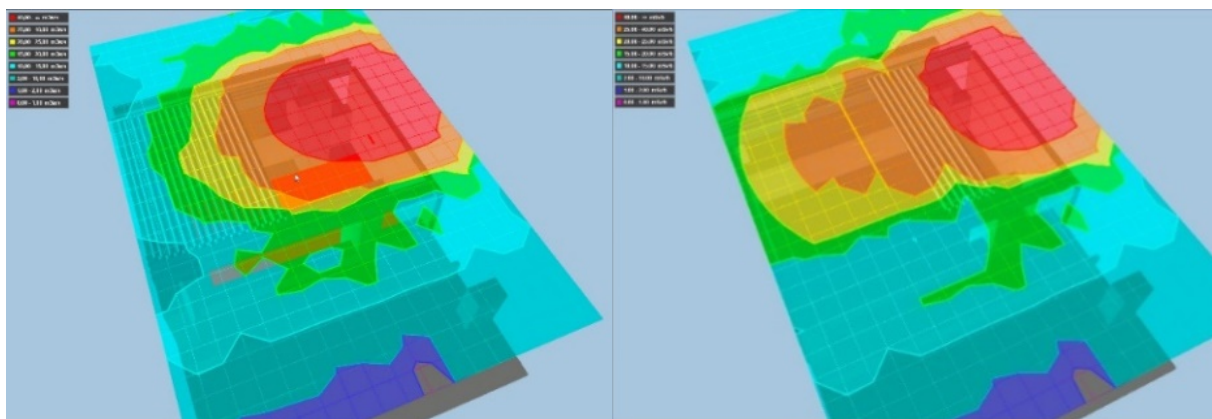


Рис. 1а, 1б. Картограма на позначці 68,000 після здійснення демонтажу частини труб накату

Малюнок 1а демонструє картограму потужності дози (ПД) після демонтаж труб настилу над ЦЗ, який виконується у напрямку із сходу на захід, а на малюнку 1б - із заходу на схід. З малюнків видно, що при виконанні демонтажу труб накату із західного боку ОУ, забезпечується мінімальний рівень потужності дози.

Також програма ChNPP VRdose Planner Pro дозволяє виконати експорт даних потужності доз для масиву точок у вигляді таблиць Excel. З даних отриманих таблиць видно, що потужність дози після демонтажу накату із труб для даної конфігурації і параметрів джерел гама випромінювання зростає практично у 3 рази.



## Моделювання радіаційної обстановки при поводженні з відпрацьованим ядерним паливом

У статті представлені результати розробки у програмному продукті ChNPP VRdose Planner Pro моделей контейнера для транспортування відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) HI-STAR 190 і контейнера для зберігання ВЯП HI-STORM 190 та моделі багатоцільового контейнера БЦК-31. Крім того, проведено порівняльний аналіз забезпечення біологічного захисту контейнера HI-STAR 190, контейнера HI-STORM 190, вузла перевантаження контейнерів (ВПК) і пристосування перевантаження контейнерів (ППК), які будуть застосовані при поводженні з ВЯП реакторів типу ВВЕР АЕС України на ЦСВЯП.

### 2. Моделі транспортного контейнера HI-STAR 190 і контейнера для зберігання HI-STORM 190

При побудові просторових моделей контейнерів HI-STAR 190 і HI-STORM 190 передбачалося, що в них розміщуються тільки контейнери БЦК-31 з ВЯП енергоблоків ВВЕР-1000. Проектні характеристики БЦК-31, використані при побудові моделі, наведені в роботі [4]. Для побудови моделей контейнерів HI-STAR 190 і HI-STORM 190, а також моделей ППК і ВПК, використовувалися дані, наведені в роботах [5 - 8].

На малюнку 2 наведена просторова модель транспортного контейнера HI-STAR 190, створена в програмі ChNPP VRdose Planner Pro. Тестування моделі проведено у відповідності з даними роботи [4].

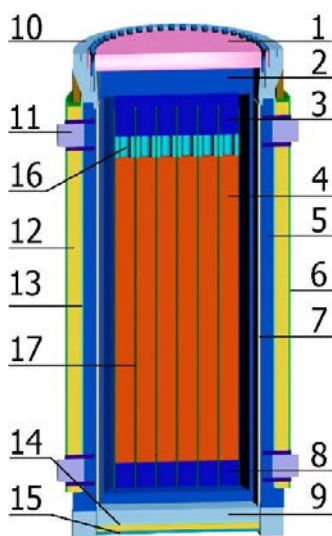


Рис. 2. Модель контейнера HI-STAR 190 з БЦК-31 – повздовжній переріз

1 - кришка HI-STAR, 2 – герметичний пенал БЦК-31, 3 - головки ТВЗ, 4 - ТВЗ, 5 - свинцевий екран, 6 - зовнішня обичайка, 7 – внутрішня обичайка, 8 - хвостовики ТВЗ, 9 – днище, 10 – фланець, 11 – цапфа для піднімання, 12 – нейтронний захист, 13 – проміжна обичайка, 14 - свинцевий екран, 15 – нижня пластина, 16 – перфорований чохол ТВЗ, 17 – паливний кошик.

Модель контейнера зберігання HI-STORM 190, в який завантажено ВЯП ВВЕР, приведена на малюнку 3. Розроблена модель також перевірена і протестована на відповідність параметрам, наведеним у роботі [4].

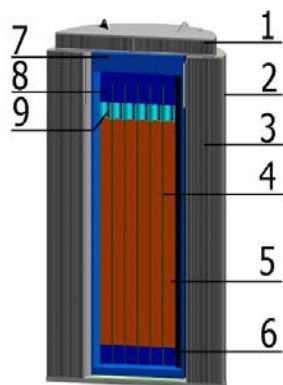


Рис. 3. Модель контейнера HI-STORM 190 с БЦК-31– повздовжній переріз

1 - кришка HI-STORM, 2 – металевий корпус HI-STORM, 3 - бетон біозахисту HI-STORM, 4 – паливний кошик, 5 – ТВЗ, 6 - хвостовики ТВЗ, 7 – герметичний пенал БЦК-31, 8 - головки ТВЗ, 9 – перфорований чохол ТВЗ

### Результати розрахунків

#### 3. Розрахунок потужності дози для контейнерів HI-STAR 190 и HI-STORM 190

Для контейнерів HI-STAR 190, HI-STORM 190 проводився розрахунок потужності дози гамма - випромінювання на поверхні контейнера.

Для оцінки потужності дози гамма-випромінювання при виконанні операцій на завантаженому контейнері HI-STORM 190 з БЦК-31, наприклад відкриття і закриття кришки, розглядалася модель без кришки і ППК зверху. Висока відносна похибка вимірювань контейнерів HI-STAR і HI-STORM може бути обумовлена:

- малою точністю побудови складних деталей тривимірних моделей контейнерів через відсутність конструкторської документації;

- спрощенням моделі джерел ВЯП і обмеженою бібліотекою матеріалів захисту пакета ChNPP VRdose Planner Pro (бетон, залізо, свинець, пісок і вода).

Як показано нижче, основні операції технологічного процесу перевантаження виконуються після зняття кришок контейнерів HI-STAR або HI-STORM, коли гамма - поле в основному формується відкритою поверхнею БЦК. На цій поверхні потужність дози гамма-випромінювання найбільша у порівнянні з усіма розрахунковими місцями і становить до 250 мЗв/година. Для даної поверхні відносна похибка є найменшою з усіх місць вимірювання - 1,22%. Таким чином побудовані моделі мають вважатися задовільними і придатними для моделювання робочих процесів поводження з ВЯП.

#### 4. Моделювання технологічного процесу перевантаження

У даній роботі проведено моделювання процесу перевантаження БЦК у ході його встановлення на зберігання в ЦСВЯП. Для цього розроблена модель робочого майданчика будівлі приймання ЦСВЯП, що включає безпосередньо контейнери HI-STAR і HI-STORM, підйомний пристрій, елементи біологічного захисту. Розрахунок в режимі реального часу дозволяє у динаміці відображати і аналізувати радіаційні умови при проведенні технологічних операцій, наприклад, при встановленні або демонтажі біологічного захисту (малюнки 4 і 5).

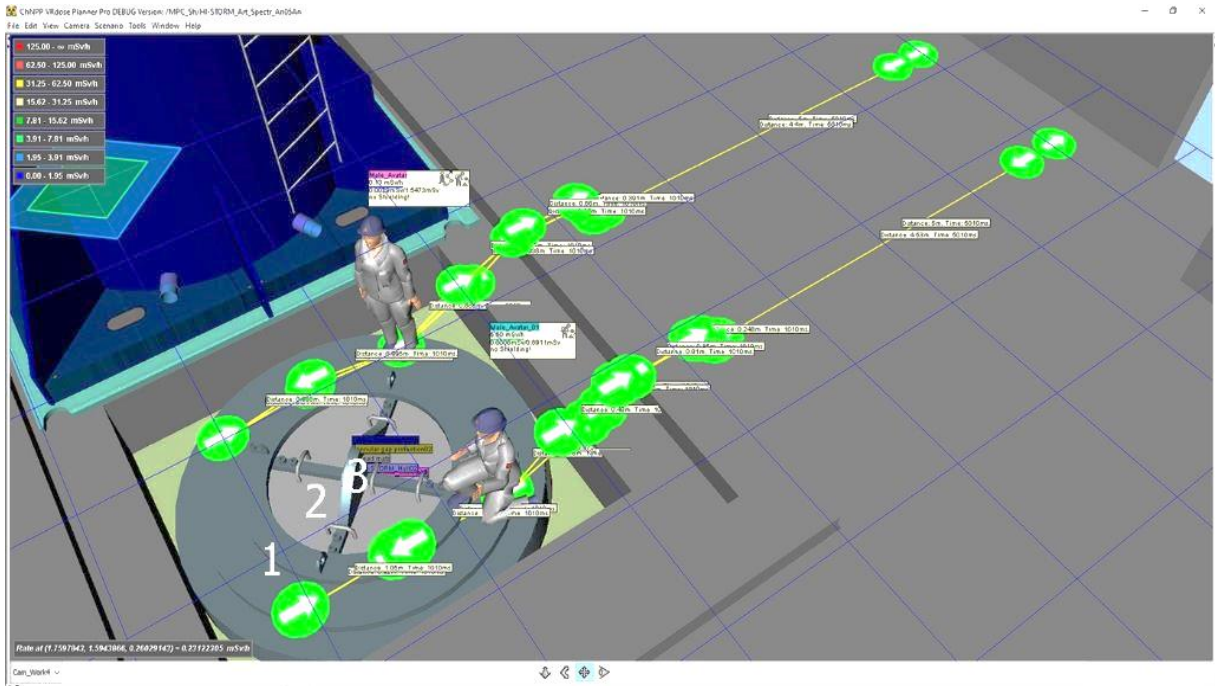


Рис. 4. На БЦК встановлені свинцеві листи, кільцевий зазор закритий захистом

1 – захист кільцевого зазору, 2 – свинцеві листи, 3 – підйомний пристрій БЦК.

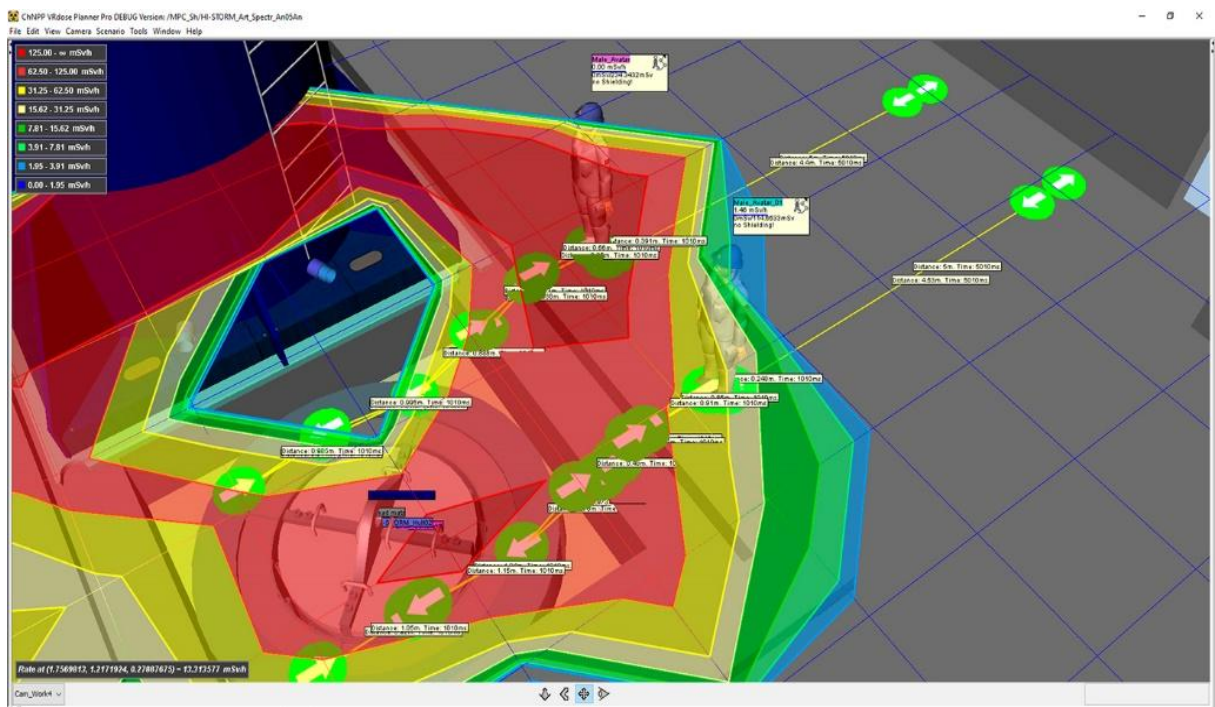


Рис. 5. На БЦК встановлені свинцеві листи захисту, кільцевий зазор відкритий. Включена опція навігації маршруту руху манекена.

Одночасно є можливість вести розрахунок доз персоналу при виконанні певних операцій в умовах наявного радіаційного опромінення. В даному випадку результати розрахунків показують, що при встановленому захисті кільцевого зазору контейнеру, під час руху по маршруту (верхній на рис. 4) з виконанням операцій зняття гвинтів, працівник отримує амбієнтний

еквівалент дози 1,55 мЗв впродовж 10,5 хв, а по маршруту (нижній на рис. 4) - 0,89 мЗв впродовж 11,5 хв. При цьому, за відсутності захисту кільцевого зазору контейнеру показники доз опромінення (верхній і нижній маршрут на рис 5) становлять - 234,34 мЗв і 114,65 мЗв відповідно.

Такий аналіз має на меті визначати шляхи вдосконалення сценарію виконання робіт з метою мінімізації дозовитрат персоналу. При цьому, програмний пакет ChNPP VRdose Planner Pro дозволяє аналізувати різні сценарії виконання робіт із застосуванням різних технологій і різної чисельності персоналу. Для практичного застосування важливою є функція порівняння декількох сценаріїв за кількома параметрами, наприклад, по індивідуальним і колективним вимогам до дози опромінення і часу виконання технологічних операцій.

### **Висновки**

Застосування програми ChNPP VRdose Planner Pro при плануванні та виконанні монтажних операцій, а також операцій з обслуговування, ремонту та заміни обладнання в радіаційно-небезпечних умовах дасть змогу:

- приймати обґрунтовані рішення про доцільність тієї чи іншої діяльності;
- вибрати оптимальні технічні рішення для досягнення поставлених задач;
- розрахувати або оптимізувати структуру радіаційного захисту персоналу.

Застосування комп'ютерної моделі дозволить вибрати та оптимізувати проектні рішення демонтажу нестабільних конструкцій, верифікувати їх на предмет відповідності встановленим характеристикам і вимогам, створити інтерактивний програмний комплекс для детального навчання та підготовки персоналу.

У роботі розглянуто можливості програмного продукту ChNPP VRdose Planner Pro для розрахунку і аналізу радіаційної обстановки на етапі приймання ВЯП ВВЕР АЕС України для зберігання на майданчику ЦСВЯП. Для вирішення поставленої задачі із застосуванням даного програмного продукту були розроблені моделі транспортного контейнера HI-STAR, контейнера для зберігання HI-STORM та багатоцільового контейнера БЦК-31.

Визначено значення потужності дози для контейнера HI-STAR 190, контейнера HI-STORM 190, вузла перевантаження контейнерів та пристосування перевантаження контейнерів, які дозволять експлуатуючій організації планувати необхідні заходи з радіаційного захисту враховуючи принцип ALARA, а також визначити дози персоналу при виконанні регламентних технологічних операцій вивантаження і завантаження БЦК в умовах наявного іонізуючого випромінювання.

Доведено, що при знятих кришках контейнерів HI-STAR і HI-STORM гамма-поле в основному формується відкритою поверхнею БЦК, на якій потужність дози гамма-випромінювання максимальна у всіх розрахункових місцях. При цьому, значення потужності дози гамма-випромінювання становить до 250 мЗв/годину, а основна похибка є найменшою з усіх місць виміру і становить 1,22%. Таким чином побудовані моделі мають вважатися

задовільними і придатними для моделювання робочих процесів поводження з ВЯП.

У роботі показано, що для більшості завдань, щодо забезпечення радіаційного захисту на ядерних установках (технічне обслуговування, відключення або зняття з експлуатації) програмний продукт ChNPP VRdose Planner Pro здатний забезпечити надійні оцінки радіаційного ризику в реальному часі. Крім того, завдяки високій швидкості і простоті введення цей пакет підходить для користувачів, які не мають спеціальних знань в області теорії переносу випромінювання або моделюванні, а також при моделюванні умов опромінення, що змінюються. До його переваг можна віднести:

швидке надання інформації для прийняття рішень в стресових ситуаціях;  
оптимізація робочих завдань в реальному часі з точки зору радіаційного захисту;

моделювання в реальному часі для навчання, підготовки і інструктажу персоналу.

Для багатьох практичних завдань розглянутий програмний продукт має значні переваги в порівнянні з більш складними моделями, заснованими на детальному моделюванні процесу переносу випромінювання. Аналогічні системи тривимірного моделювання і віртуальної реальності, розроблені в Норвегії, вже багато років успішно застосовуються в ряді країн [9-11].

#### **Список використаних джерел:**

1. Szóke I. New Computational Model for Areal and Personal Monitoring in Nuclear Environments (HWR-1030), OECD Halden Reactor Project, Institutt for energiteknikk (IFE), Norway, 2012.

2. Szóke I., Louka M. N., Bryntesen T. R., Bratteli J., Edvardsen S. T., Rø-Eitheim K. K., Bodor K. Real-time 3D radiation risk assessment supporting simulation of work in nuclear environments // J. Radiol. Prot. 34 (2014) pp 389–416

3. <https://chnpp.gov.ua/ru/186-proekty/zavershennye-proekty/4252-sozdanie-i-razvitie-tsentra-vizualizatsii-snyatiya-s-ekspluatatsii-blokov-chaes>

4. Документ № Holtec HI-2084031, ред. 7, «Отчет о результатах анализа радиационной защиты HI-STAR 190, HI-TRAC 190 и HI-STORM 190», Holtec International.

5. Звіт Holtec № HI-2156591, ред. 3, «Описание технологического процесса Централизованного хранилища ОЯТ для НАЭК «Энергоатом», Holtec International.

6. Звіт Holtec № HI-2156773, ред. 6, «Пояснительная записка для HI-STORM 190», Holtec International.

7. Документ Holtec № HI-215684, ред. 2, «Описание технологического процесса обращения с ОЯТ на энергоблоках АЭС Украины и перевозки для НАЭК «Энергоатом», Holtec International.

8. 571402.201.003.TX01, ред. 2, Проект, том 3.1. Обращение с отработавшим ядерным топливом. Киев. КИЭП - 2016.

9. K. Chizhov, M. K. Sneve, I. Szóke, I. Mazur, N. K. Mark, I. Kudrin, N. Shandala, A. Simakov, G. M. Smith, A. Krasnoschekov, A. Kosnikov, I. Kemsy,



V. Kryuchkov. 3D simulation as a tool for improving the safety culture during remediation work at Andreeva Bay. // J. Radiol. Prot. 34 (2014) pp 755–773.

10. M. Pashynov, S. Pidbereznyy, S. Paskevych. 3D Modelling of radiation conditions and dose rates for personnel during dismantling of the roof structures of the Shelter object // Problems of atomic science and technology, 2020, N5(129). Series: Nuclear Physics Investigations (74), P. 36 - 40.

11. Szőke I., Louka M. N., Bryntesen T. R., Bratteli J., Edvardsen S. T. Comprehensive support for nuclear decommissioning based on 3D simulation and advanced user interface technologies // Journal of Nuclear Science and Technology, 2015 Vol. 52, No. 3, 371–387

## МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО КОЕФІЦІЄНТУ ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РЕГІОНУ

*Паскевич Сергій, Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м.*

*Чорнобиль, s.paskevich@ispp.kiev.ua*

*Скітер Ігор, Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль,*

*i.skiter@ispp.kiev.ua*

*Деренговський Валерій, Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м.*

*Чорнобиль,*

*v.derengovsky@ispp.kiev.ua*

**Annotation.** In the Chernobyl exclusion zone, significant work is being carried out to reintegrate its territory. The presence of significant human potential, knowledge-intensive industries, a large territory, good transport and communication opportunities, etc. - sets the task of assessing the investment potential of the "Chernobyl exclusion zone" to increase its economic activity in the future. To assess the prospects of the zone, the concept of "integral coefficient of investment attractiveness" is introduced. It is calculated based on sets of resulting factors with their own local indicators. The difference between the algorithm and those proposed earlier lies in taking into account the average strength of the influence of indicators on the factor. It is proposed to take these values into account as a factor weight.

The components for assessing the integral index are the shares of factors in the total amount, taking into account the structure of the index. This approach allows you to modify the set of factors and their indicators. This will take into account the specifics of the assessed region. In the Chernobyl exclusion zone, significant work is being carried out to reintegrate its territory. The presence of significant human potential, knowledge-intensive industries, a large territory, good transport and communication opportunities, etc. - sets the task of assessing the investment potential of the "Chernobyl exclusion zone" to increase its economic activity in the future.

**Вступ.** Радіоактивно забруднені території Чорнобильської зони відчуження, за період тривалого існування, зазнали значної трансформації. Змінились рівні забруднення ґрунтово-рослинного покриву радіонуклідами, змінились фізико-хімічні властивості самих радіоактивних речовин, що призвело до появи значних територій Чорнобильської зони відчуження, які за базовими критеріями безпеки відповідають умовам постійного проживання цивільного населення та ведення господарства без обмежень. За таких умов в недалекому майбутньому варто очікувати перегляду меж відчужених територій та відновлення господарської та економічної діяльності на цих територіях [1].

Чорнобильська зона відчуження має досить вдале територіальне розташування межуючи з Республікою Білорусь та трьома областями України: Чернігівською, Житомирською та Київською, що може мати

відповідний потенціал для відновлення певних економічних взаємозв'язків між регіонами.

Крім того, на території Чорнобильської зони відчуження функціонує низка підприємств, які мають значний економічний потенціал в сфері енергетики, поводження з радіоактивними відходами. Крім того, в силу обставин що склались, значні території Чорнобильської зони відчуження мають потенціал для розвитку комерційних проектів в галузі відновлювальної енергетики, розміщення виробництв що потребують значних буферних та санітарно-захисних зон.

Певним економічним потенціалом володіють підприємства ЧЗВ, де застосовують наукові дослідні, інноваційні розробки, що може стати конкурентною перевагою при переході на режим звичайної господарської діяльності.

**Завдання досліджень – запропонувати інструмент для оцінки наявного значного людського потенціалу, наукоємних виробництв, значної території, транспортної інфраструктури та ін. для оцінки інвестиційного потенціалу «Чорнобильської зони відчуження» для підвищення її економічної активності в майбутньому [2].**

**Алгоритм оцінки інвестиційного потенціалу.** В дослідженні для оцінки рівня інвестиційної привабливості пропонується ввести інтегральний коефіцієнт інвестиційного потенціалу (ІКІП). Його чисельну оцінку пропонується проводити шляхом визначення середнього зваженого індексу із складових, які його формують. Для оцінки інвестиційної привабливості пропонується наступна шкала:  $ІКІП > 0,8$  – висока інвестиційна привабливість;  $0,6 < ІКІП < 0,8$  – вище середнього;  $0,4 < ІКІП < 0,6$  – середня;  $0,2 < ІКІП < 0,4$  – нижче середнього;  $ІКІП < 0,2$  – низька.

Алгоритм обчислення ІКІП регіону пропонується наступний:

1. Формування масиву вхідних даних.
2. Визначення результативних індикаторів для показників
3. Нормалізація індикаторів
4. Визначення частинних коефіцієнтів кореляції нормалізованих результуючих індикаторів з іншими (для окремих показників)
5. Визначення середнього значення коефіцієнту кореляції (для окремих показників)
6. Визначення середніх значень нормалізованих результативних індикаторів
7. Визначення показників структури нормалізованих результативних індикаторів.
8. Оцінка інтегрального показника ІКІП.

Основна проблема - формування набору показників інвестиційного потенціалу та його індикаторів.

**Формування масивів вхідних даних.** В роботі для апробації методики в якості факторів оцінки ІКІП на прикладі Чернігівської області [3] обрані:

1. Показники оцінки економічного розвитку регіону
2. Показники оцінки інноваційно-інвестиційної активності регіону
3. Показники оцінки рівня розвитку інфраструктури регіону
4. Показники оцінки людського потенціалу: «Трудовий потенціал»,



«Медичний потенціал», «Освітній потенціал», «Рівень добробуту населення»

В масиві вхідних даних експертним методом визначені наступні результативні фактори для відповідних показників оцінки ІІІ:

$X_{1.1}$  - Валовий регіональний продукт, млн. грн. (для показників «Економічний розвиток»);

$X_{2.1}$  - Обсяг реалізованої інноваційної продукції, млн. грн. (для показників «Інноваційно-інвестиційна активність»);

$X_{3.1}$  - Вантажооборот за видами транспорту, млн.т.км (для показників «Розвиток інфраструктури»);

$X_{4.1}$  - Чисельність постійного населення, тис. осіб (для показників «Людський потенціал»).

Слід зазначити, що при дослідженні різних регіонів набір факторів та індикаторів може бути змінений чи визначений експертною групою в залежності від задач дослідженні – оцінка рівня ІКІІІ регіону, порівняння ІІІ різних регіонів тощо.

**Чисельна оцінка ІКІІІ.** В масиві вхідних даних результативні фактори та їх індикатори представлені у різних одиницях вимірювання. Тому проведена нормалізація показників оцінки ІІІ за формулою:

$$Z_i = \frac{x_k - \bar{x}_k}{\sigma_{x_k}} \quad (1)$$

де  $x_k$ ,  $\bar{x}_k$ ,  $\sigma_{x_k}$  – поточні чисельні оцінки  $k$ -го індикатору, середнє значення оцінок  $k$ -го індикатору із  $i$ -го набору та його середнє квадратичне відхилення відповідно.

Результативні фактори показників ( $X_{1.1}$ ,  $X_{2.1}$ ,  $X_{3.1}$ ,  $X_{4.1}$ ) та їх нормалізовані значення ( $Z_{1.1}$ ,  $Z_{2.1}$ ,  $Z_{3.1}$ ,  $Z_{4.1}$ ) дають змогу провести оцінку тісноти зв'язку між ними та індикаторами, які їх формують.

Тому на наступному етапі реалізації алгоритму розраховані частинні коефіцієнти кореляції (табл.1) для нормалізованих показників та на їх основі середні коефіцієнти кореляції. Вони визначені для результуючих факторів зі своїм набором індикаторів для кожного показника за формулою:

$$\overline{r_{ind(II)}} = \sqrt[k]{\prod_{j=1}^k r_{jk}} \quad (2)$$

де  $r_{jk}$  - частинний коефіцієнт кореляції між  $j$ -м результуючим фактором та  $k$ -м індикатором з цього ж набору показників.

Таблиця 1 - Частинні коефіцієнти кореляції індикаторів показників III

Показники оцінки економічного розвитку								
Нормалізовані індикатори	Z <sub>1.2</sub>	Z <sub>1.3</sub>	Z <sub>1.4</sub>	Z <sub>1.5</sub>	Z <sub>1.6</sub>	Z <sub>1.7</sub>	Z <sub>1.8</sub>	<b>Середнє значення</b>
Коефіцієнти кореляції із Z <sub>1.1</sub>	0,97	0,83	0,99	0,88	-0,41	-0,79	-0,57	$r_{інд(П)}$ <b>=0,745</b>
Показники оцінки інноваційно-інвестиційної активності								
Нормалізовані індикатори	Z <sub>2.2</sub>	Z <sub>2.3</sub>	Z <sub>2.4</sub>	Z <sub>2.5</sub>	Z <sub>2.6</sub>	Z <sub>2.7</sub>		<b>Середнє значення</b>
Коефіцієнти кореляції із Z <sub>2.1</sub>	0,82	-0,14	0,77	0,39	0,67	0,58		$r_{інд(П)}$ <b>=0,491</b>
Показники оцінки рівня розвитку інфраструктури								
Нормалізовані індикатори	Z <sub>3.2</sub>	Z <sub>3.3</sub>	Z <sub>3.4</sub>					<b>Середнє значення</b>
Коефіцієнти кореляції із Z <sub>3.1</sub>	0,93	0,71	0,76					$r_{інд(П)}$ <b>=0,396</b>
Показники оцінки людського потенціалу								
Нормалізовані індикатори	Z <sub>4.2</sub>	Z <sub>4.3</sub>	Z <sub>4.4</sub>	Z <sub>4.5</sub>	Z <sub>4.6</sub>	Z <sub>4.7</sub>		<b>Середнє значення</b>
Коефіцієнти кореляції із Z <sub>4.1</sub>	0,75	-0,49	0,40	0,97	-0,71	0,53		$r_{інд(П)}$ <b>=0,658</b>
Нормалізовані індикатори	Z <sub>4.8</sub>	Z <sub>4.9</sub>	Z <sub>4.10</sub>	Z <sub>4.11</sub>	Z <sub>4.12</sub>	Z <sub>4.13</sub>		
Коефіцієнти кореляції із Z <sub>4.1</sub>	0,91	0,18	0,89	0,97	0,93	0,93		

Середні значення коефіцієнтів кореляції для відповідних груп показують середню силу впливу індикаторів на результуючий фактор для кожного показника.

Пропонуємо трактувати їх як ваги показників у загальному індексі інвестиційного потенціалу, а саме:

- вага показника «Економічний розвиток» – 0,7446;
- вага показника «Інноваційно-інвестиційна активність» – 0,4910;
- вага показника «Розвиток інфраструктури» - 0,3955;
- вага показника «Людський потенціал» - 0,6584.

На попередніх етапах визначені нормалізовані фактори. Вони дають змогу провести оцінку їх долі в загальному вкладі у формування індексу інвестиційної привабливості. Така трактовка обґрунтована, так як структура показників має різний кількісний та якісний зміст. Крім того має різні ваги у формуванні загального коефіцієнту III.

Доля, або показник структури середнього значення нормалізованого результативного індикатору може бути визначений як:

$$d_{(\Pi)_i} = \frac{\overline{Z}_i}{\sum_{i=1}^n \overline{Z}_i} \quad (4)$$

де  $\overline{Z}_i$  - середнє значення  $i$ -го нормалізованого результативного індикатору

За (4) отримані наступні результати:

- доля показника «Економічний розвиток» – 0,2283;
- доля показника «Інноваційно-інвестиційна активність» – 0,2356;
- доля показника «Розвиток інфраструктури» - 0,2516;
- доля показника «Людський потенціал» - 0,2850.

Отримані за (2) та (3) оцінки ваг та долі показників дають змогу провести оцінку інвестиційного потенціалу за формулою:

$$ІКІП = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_{(\Pi)_i} \wedge \overline{r}_{інд(\Pi)}} \quad (5)$$

де  $\overline{r}_{інд(\Pi)}$  - середній коефіцієнт кореляції результуючого фактору зі своїм набором в межах відповідного показника (вага показника);

$d_{(\Pi)_j}$  - показник структури середнього значення нормалізованого результативного фактору;

$n$  - кількість показників ( $n = 4$ ).

Таким чином, результуючий індекс інвестиційної привабливості:

$$\left\{ \begin{array}{l} ІКІП = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_{(\Pi)_i} \wedge \overline{r}_{інд(\Pi)}} = \sqrt[4]{(0,7446 \wedge 0,2283) \times (0,4910 \wedge 0,2356) \times (0,3955 \wedge 0,2516) \times (0,6584 \wedge 0,2850)} \\ \\ ІКІП = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_{(\Pi)_i} \overline{r}_{інд(\Pi)}} = \sqrt[4]{0,963 \times 0,846 \times 0,792 \times 0,888} \\ \\ ІКІП = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_{(\Pi)_i} \overline{r}_{інд(\Pi)}} = 0,863 \end{array} \right.$$

При аналізі отриманих результатів слід звернути увагу на складові загального інтегрального коефіцієнту ІП, а саме:

- показник «Економічний розвиток» – 0,963;
- показник «Інноваційно-інвестиційна активність» – 0,846;
- показник «Розвиток інфраструктури» - 0,792;
- показник «Людський потенціал» - 0,888.

Інтегральний коефіцієнт ІП, отриманий за (4) становить  $ІКІП=0,863$  що вказує на високий рівень інвестиційної привабливості.

**Аналіз отриманих результатів.** Апробація запропонованого алгоритму визначення інтегрального показника інвестиційної привабливості показує, що він може бути застосований до оцінки регіональних підсистем (економічних, соціальних, технічних тощо) на основі визначення комплексного/інтегрального показника за набором якісно однорідних груп показників та їх індикаторів. Крім того, інтегральні показники, визначені за алгоритмом, можуть бути використані для порівняльного аналізу підсистем на різних територіях чи об'єктах, в різних часових інтервалах.

Перевагою пропонованого алгоритму перед подібними методами визначення інтегральних показників є: мотивований вибір показників та їх індикаторів для різних об'єктів дослідження, використання нормалізованих значень показників, оцінка середньої сили впливу індикаторів на результуючий фактор і його врахування як ваги показника у загальному індексі, мінімізація впливу суб'єктивних оцінок експертів.

Чорнобильська зона відчуження як система може характеризуватися економічною, технічною, соціальною, екологічною, науковою, промисловою підсистемами тощо, для яких можуть бути визначені основні показники та їх індикатори, характерні саме до вказаних підсистем на даній території.

За допомогою ІКІП, який включає в себе однотипні показники, можна проводити порівняння складових коефіцієнту для схожих об'єктів дослідження, різних регіонів тощо.

Наявність значної кількості індикаторів може бути обмежена ранжуванням їх за силою впливу на результуючий фактор в групі показників. Включення показників у загальний індекс може бути проведене на основі експертних оцінок чи запиту особи, що приймає рішення (ОПР), що дає змогу розширити використання запропонованого алгоритму в залежності від потреб.

**Висновки.** Приведена методика оцінки інвестиційного потенціалу окремо взятої території може бути використана і для інших регіонів чи технологічних, соціальних, економічних підсистем, в тому числі і для Чорнобильської зони відчуження, яка характеризується унікальним набором параметрів станів різного роду підсистем. Ключовою для цього є задача мотивованого вибору показників оцінки, факторів та їх індикаторів для обраного регіону чи підсистеми, які досліджуються.

Оцінка складових ІКІП дає змогу для ОПР формувати комплекс управлінських рішень – технічних чи економічних, який направлений або на максимальне використання потенціалу окремої складової інтегрального коефіцієнту, або на підсилення складової індексу, що має низький рівень, тобто здійснювати ефективне управління підсистемою.

Методика може бути використана, коли показники, та індикатори, які їх формують, окремо впливають на підсумковий результат.

Автори вважають, що цікавим було б враховувати їх взаємний вплив – ефект спільної дії (емерджентність, синергетичний ефект впливу показників та їх індикаторів).

Методика оцінки такої задачі може бути основана на підходах, пов'язаних із використанням багатокритеріальної оптимізації та методу аналізу ієрархій – врахування переваг груп показників [4].

### **Список використаних джерел:**

1. Паскевич С. А. Карта ґрунтів Чорнобильської зони відчуження в радіоекологічному аспекті / С. А. Паскевич, Д. В. Городецький // Проблеми Чорнобильської зони відчуження. – Славутич, 2019. – Вип. 20. – С. 15 – 23.
2. Бондарьков М. Д., Осколков Б. Я.. Чернобыльская авария и безопасность использования ядерной энергии: заметки о развитии. // Проблеми Чорнобильської зони відчуження. – Славутич, 2019. – Вип. 20. – С. 4 – 15.
3. Державна служба статистики, <http://www.ukrstat.gov.ua/>
4. Скітер І. С., Ткаленко Н. В., Трунова О. В. Математичні методи прийняття управлінських рішень: навч. пос. - Чернігів: ЧДІЕУ, 2011. 248с.

## ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОБНИХ БІОПРЕПАРАТІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПРИРОДНОЇ РІВНОВАГИ

Пуляк Н. В., Крутякова В. І., Нікіпелова О. М.  
Інженерно-технологічний інститут «Біотехніка» НААНУ,  
м. Одеса, nceb2017@gmail.com

The results of studies of the biological activity of the collection strain *Lecanicillium longisporum* are presented. The biological activity of the drug, the producer of which is a strain of *Lecanicillium longisporum*, in the laboratory was compared with the biological activity of control samples, the producers of which are classified as taxonomic groups with almost the same characteristics. Studies on the evaluation of the fungus *Lecanicillium longisporum* - the producer of a biological product against sucking insects, namely against aphids show that with double treatment, at a rate of 0.8 l / ha, the population density of aphids decreased. Therefore, the use of the drug based on the collection strain of *Lecanicillium longisporum* in the natural biocenosis will regulate the number of pests, limiting outbreaks of their mass reproduction. Thus, the development and use of drugs based on agronomically valuable microorganisms, which without violating the mechanisms of biocenotic regulation and ecological stability, control the number of pests in agrocenoses, contribute to the production of environmentally friendly plant products and reduce contamination of agrocenoses with pesticides.

**Ключові слова:** ентомофаги, біоінсектицид, біоценоз, комахи-шкідники, засоби захисту рослин.

Інтенсивна система ведення сільського господарства призвела до значних порушень навколишнього середовища: забруднення агроландшафтів, деградації ґрунтів та зниження біорізноманіття екосистем. Нераціональне використання природних ресурсів і негативна дія потужних техногенних факторів призвели до негативних екологічних наслідків, збіднення видового складу ентомофауни, порушення механізмів саморегуляції. На теперішньому етапі інтенсивного розвитку сільського господарства велике розповсюдження в світі набувають розробки біологічних методів захисту рослин від хвороб та шкідників, підвищення родючості ґрунтів шляхом застосування високоактивних мікробних препаратів. Використання екологічно безпечних методів захисту рослин є одним з основних елементів сучасної технології для фітосанітарної оптимізації екосистем, які дозволяють цілеспрямовано регулювати шкодочинні об'єкти, зберігаючи динамічну природну рівновагу [1-3]. Відомо, що мікроскопічні ентомопатогенні гриби мають здатність в природних умовах заражати шкідливих комах та викликати їх масові захворювання і загибель. Потенціал ентомопатогенних мікроорганізмів в якості засобів контролю комах-шкідників досить високий. Окрім того, гриби здатні рости і розвиватися на штучних поживних середовищах, що дозволяє створювати на їх основі біологічні препарати [4-7]. Ентомопатогенні гриби роду *Lecanicillium* (колишній

комплексний вид *Verticillium lecanii*) відомі як природні патогени сисних комах. Відомо, що за кордоном окремі види цих мікроміцетів (*L. muscarium*, *L. longisporum*, *L. lecanii*) знайшли практичне застосування в якості продуцентів екологічно безпечних мікробіопрепаратів. Впровадження в природний біоценоз таких препаратів дозволяє регулювати чисельність шкідливих комах, обмежуючи спалахи масового розмноження.

Біологічну активність препарату, продуцентом якого є штам *Lecanicillium longisporum*, в лабораторних умовах порівнювали з біологічною активністю контрольних зразків, продуценти яких віднесено до таксономічних груп майже з однаковими характеристиками. В якості контрольних зразків використовували Актофіт (*Streptomyces avermitilis*), та Метаризин (*Metarhizium anisopliae*).

В якості тест-об'єкта використовували комаху – попелицю, величина якої не перевищує у самих великих особин 7 мм, але здатна завдавати величезної шкоди рослинам. Попелиця швидко розмножується, пристосовується, поширюється, утворюючи цілі колонії. Впиваючись своїми хоботками в вегетативні органи, попелиця висмоктує з них сік, після чого рослина погано розвивається.

Для визначення біологічної активності на оброблену препаратами пшеницю озиму, вирощену до розміру 3см – 4 см засівали фітопатоген (попелицю). Щільність популяції складала приблизно 10 - 15 особин на рослину. В якості негативного контролю засіяну попелицею пшеницю залишили не обробленою біопрепаратами.

В результаті досліджень встановлено, що впродовж 10 днів в контрольному варіанті (без обробки) чисельність фітофагу наростала і досягала 20 – 25 особин/рослину. В результаті, рослини пшениці загинули. В дослідних варіантах, незалежно від біопрепаратів та норм витрат, після першої обробки щільність популяції не змінилася. Це може означати, що біопрепарати призупинили розвиток фітофага.

Таблиця – Біологічна активність *Lecanicillium longisporum* в лабораторних умовах

Препарати	Норма витрат, л/га	Чисельність попелиці, особин/рослину		
		до обробки	Після 1 обробки	Після 2 обробки
			10-й день	10-й день
Препарат на основі <i>Lecanicillium longisporum</i>	10,0	12,0	11,0	5,0
	5,0	14,0	13,0	7,0
	1,0	11,0	10,0	7,0
Препарат на основі <i>Streptomyces avermitilis</i>	10,0	10,0	10,0	8,0
	5,0	13,0	11,0	10,0
	1,0	15,0	12,0	10,0
Препарат на основі <i>Metarhizium anisopliae</i>	10,0	13,0	16,0	15,0
	5,0	11,0	15,0	14,0
	1,0	14,0	17,0	14,0
Контроль	0,0	13,0	20,0	25,0

Після другої обробки щільність попелиць при застосуванні Метаризину не змінилася, а при застосуванні препарату, продуцентом якого є штам *Lecanicillium longisporum*, при нормі витрат 0,8 л/га, та Актофіту при нормі витрат 1,0 л/га, кількість попелиць поступово почала знижуватися та складала 5 - 10 особин на рослину.

Проведені дослідження щодо оцінки гриба *Lecanicillium longisporum* – продуцента біопрепарату проти сисних комах, а саме проти попелиць засвідчують, що за дворазової обробки, при нормі витрат 0,8 л/га щільність популяції попелиці знизилася.

Отже, при застосуванні препарату на основі колекційного штаму *Lecanicillium longisporum* в природний біоценоз дозволить регулювати чисельність шкідливих комах, обмежуючи спалахи їх масового розмноження.

Таким чином, розробка і застосування препаратів на основі агрономічно-цінних мікроорганізмів, які без порушення механізмів біоценотичної регуляції і екологічної стабільності, контролюють чисельність шкочочинних об'єктів в агроценозах, сприяють одержанню екологічно безпечної рослинницької продукції та зниження рівня забруднення агроценозів пестицидами, відновлюють природну рівновагу екосистем.

#### **Список використаних джерел:**

1. Бегляров Г. А. Биологический метод борьбы с вредителями и болезнями растений в закрытом грунте / Бегляров Г. А. – М.: Колос. – 1978. – 43 с.

2. Надыкта В. Д. Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем / В. Д. Надыкта // Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем: Мат. докл. науч.-практ. конф. – Краснодар. – 2004. – Вып. 2 – С. 46 – 57.

3. Великанов Л. Я. Экологические основы биологической защиты растений от болезней / Л. Я. Великанов, И. И. Сидорова // Итоги науки и техники. Защита растений. – Т. 6. – М. – 1988. – 65 с.

4. Мітіна Г.В., Сергєєв Г.Є., Павлюшин В.А. Взаємозв'язок між морфологічними та біохімічними особливостями та вірулентністю до твердої білокрилки у диких ізолятах *Verticillium lecanii* (Zimm.) Viegas. Мікологія і фітопатологія. 1997. Вип. 31, № 1. С. 57 – 64.

5. Леднев, Г. Р. Возбудители микозов насекомых: пособие по диагностике Санкт-Петербург, 2003 – 79 с.

6. Huber J. Untersuchungen zur Physiologie insekten-tötenden Pilze. Arch. Microbiol. 1958. V.29. P.71-81.

7. Тюльпанова В. А., Тюльпанов В. Г., Козлова и др. Хитиназная активность энтомопатогенных грибов рода *Beauveria* как фактор вирулентности. Энтомопатогенные микроорганизмы и их использование в защите растений. Иркутск, 1986. С. 169 - 178.



## ОСОБЛИВОСТІ РІВНЯ, СТРУКТУРИ ТА ДИНАМІКИ ЗАХВОРЮВАНОСТІ НА ЗЛОЯКІСНІ НОВОУТВОРЕННЯ ПОСТРАЖДАЛИХ ВНАСЛІДОК АВАРІЇ НА ЧАЕС У ВІДДАЛЕНИЙ ПІСЛЯАВАРІЙНИЙ ПЕРІОД

<sup>1</sup>Присяжнюк А. С., <sup>1</sup>Базика Д. А., <sup>1</sup>Гудзенко Н. А., <sup>1</sup>Фузік М. М., <sup>1</sup>Троцюк Н. К.,  
<sup>2</sup>Федоренко З. П., <sup>2</sup>Гулак Л. О., <sup>3</sup>Рижов А. Ю., <sup>1</sup>Бабкіна Н. Г., <sup>1</sup>Хухрянська О.  
М., <sup>2</sup>Горох Є. Л., <sup>1</sup>Даневич С. А.

<sup>1</sup> ДУ «Національний Науковий центр радіаційної медицини НАМН України»,  
м.Київ

<sup>2</sup> Національний інститут раку МОЗ України. м.Київ

<sup>3</sup> Київський національний університет ім. Т.Г. Шевченка

E-mail: anaprys@i.ua

Проведено дослідження захворюваності на злоякісні новоутворення (ЗН) населення, яке постраждало внаслідок аварії на ЧАЕС. Основними джерелами інформації про випадки цих захворювань є Державний реєстр України осіб, які постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи (ДРУ), Національний канцер-реєстр України (НКРУ). Вивчення демографічної ситуації встановило, що на відміну від Європейських країн, де середня очікувана тривалість життя постійно зростає, в Україні, в цілому, а також в Житомирській та Київській областях, які найбільш постраждали внаслідок Чорнобильської катастрофи, у 2005–2006 рр. відмічено суттєве зменшення цього показника із деяким зростанням у 2009–2018 рр. Очевидно, ця обставина може впливати на рівень захворюваності на ЗН, оскільки ризик захворювання на рак найбільш високий у старшому віці.

Аналіз епідеміологічної ситуації щодо ЗН в Україні та на найбільш забруднених радіонуклідами територіях упродовж тривалого часу свідчить про те, що захворюваність на ЗН зростала до 1992 р., після чого в чоловічій популяції мало місце зниження показників, а у жіночій - темпи зростання зменшились. Найнижчий рівень захворюваності на цю патологію мав місце у 2006 році, після чого намітилась тенденція до її зростання. Щодо окремих форм пухлин констатовані різні динамічні моделі. Зростання показників має місце для таких форм ЗН як рак ротової порожнини, ободової та прямої кишки, жіночої молочної залози, тіла матки, яєшників, передміхурової залози, нирки, щитоподібної залози.

Як і в цілому в Україні, серед мешканців забруднених радіонуклідами територій відмічена стійка достовірна тенденція до зменшення захворюваності на рак губи, шлунка.

Для раку стравоходу, гортані, трахеї, бронхів, легенів, шкіри, сечового міхура, лімфоїдної, кровотворної системи визначені відмінні тренди у різні часові періоди.

Особливу увагу привертає до себе рак щитоподібної залози, частота якого вища за середні показники в Україні в кожній із досліджуваних груп постраждалих, зокрема серед населення радіоактивно забруднених територій (РЗТ) в 1,3 рази. За результатами поточного дослідження дана патологія має

найбільші підстави бути віднесеною до форм ЗН, асоційованих із впливом іонізуючого випромінювання.

Лейкемії та лімфоми привертають до себе особливу увагу, зважаючи на високу чутливість до радіаційного канцерогенезу тканин, з яких формуються ці захворювання, короткий латентний період їх розвитку після опромінення. Тим не менш, захворюваність мешканців найбільш РЗТ на лімфоми та лейкемії не перевищує національний рівень і не має тенденції до зростання.

Хоча серед радіаційно-зумовлених пухлин рак молочної залози (РМЗ) займає одне з чільних місць, у мешканок радіоактивно забруднених територій та евакуйованих жінок захворюваність на РМЗ впродовж усього періоду спостереження не перевищувала національні показники, але в останні роки вона зростає. Зважаючи на те, що латентний період розвитку радіаційно-зумовленого РМЗ складає 10–15 і більше років, доцільно продовжити моніторинг цієї патології на довгостроковому етапі дослідження.

Аналіз динаміки захворюваності мешканців РЗТ на окремі форми ЗН у післяаварійний період дають підстави прогнозувати певні зміни в структурі захворюваності на ЗН за умови збереження існуючих тенденцій в наступному десятилітті. Очікуються, що перші рангові місця у чоловіків будуть належати раку передміхурової залози (МКХ-10-С61), трахеї, бронхів, легенів (С33-34), ротової порожнини (С01-14,46,2), у жінок – ЗН шкіри (С43-44, С46.2), раку молочної залози (С50), тіла матки (С54).

Оскільки після радіаційного опромінення певні види ЗН мають різний латентний період виникнення, існує необхідність подальшого моніторингу онкологічних захворювань із особливою увагою до такої патології як рак стравоходу, шлунку, легенів, ободової кишки, молочної залози, яєшників, нирок, сечового міхура, множинної мієломи.

## **PECULIARITIES OF THE LEVEL, STRUCTURE AND DYNAMICS OF CANCER INCIDENCE DUE TO THE CHORNOBYL ACCIDENT IN THE REMOTE POST-ACCIDENT PERIOD**

<sup>1</sup>Prysyazhnyuk A. Ye., <sup>1</sup>Bazyka D. A., <sup>1</sup>Gudzenko N. A., <sup>1</sup>Fuzik M. M., <sup>1</sup>Trotskyuk N. K., <sup>2</sup>Fedorenko Z. P., <sup>2</sup>Gulak L. O., <sup>3</sup>Ryzhov A. Yu.,  
<sup>1</sup>Babkina N. G., <sup>1</sup>Khukhrianska O. M., <sup>2</sup>Gorokh Ye. L., <sup>1</sup>Danevych S. A.

<sup>1</sup> SI “National Research Centre for Radiation Medicine NAMS of Ukraine”, Kyiv

<sup>2</sup> National Cancer Institute MoH of Ukraine, Kyiv

<sup>3</sup> Kyiv National University by Taras Shevchenko

E-mail: anaprys@i.ua

The study of cancer incidence in the population affected by the Chernobyl accident was performed. Analysis of the epidemiological situation regarding cancer incidence in Ukraine and in the territories most contaminated with radionuclides for a long time shows that the cancer incidence increased until 1992, after which the

incidence rates decreased. The lowest incidence of this pathology took place in 2006, after which there was a tendency to increase.

Special attention is drawn to thyroid cancer, the incidence of which is higher than the average in Ukraine in each of the studied groups of victims, in particular among the population of radioactively contaminated territories 1.3 times. According to the results of the current study, this pathology has the most significant reason to be attributed to the radiation associated forms of malignant tumors.

Excess for other cancer potentially radiation associated nosological forms (leukemia, lymphoma, breast cancer etc.) was not noted. However since after radiation exposure certain types of malignancies have different latent period of occurrence, there is a need for further monitoring of cancer with special attention to such pathologies as cancer of the esophagus, stomach, lungs, colon, breast, ovary, kidney, bladder, multiple myeloma.

## РАДІОЕКОЛОГІЧНЕ РАЙОНУВАННЯ ТЕРИТОРІЇ ВПЛИВУ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ З ОЦІНКОЮ СТУПЕНЯ ПОТЕНЦІЙНОЇ КРИТИЧНОСТІ

*Прістер Б. С., Лев Т. Д., Талерко М. М., Піскун В. Н.  
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,  
вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна  
e-mail: bprister@gmail.com, tatianalev46@gmail.com*

Проведено радіоекологічне районування території 100 км зони навколо Чорнобильської АЕС з превентивною оцінкою ступеня потенційної радіоекологічної критичності. Виявлено найбільш критичні території, на яких можливо формування небезпечних рівнів дозового навантаження на населення при повітряному перенесенні радіонуклідів з зони відчуження у випадку викидів з промислових об'єктів в зоні, лісових пожеж та екстремальних метеорологічних явищ (пилові бурі). Розглянуто різні сценарії структури регіонального землекористування та побудовано тематичні оціночні карти, які є основою для превентивного планування реабілітаційних заходів при критичних ситуаціях відповідно до норм радіаційної безпеки.

**Ключові слова:** зона відчуження, радіоекологічне районування, геоінформаційний аналіз, радіоекологічна критичність території.

The radioecological zoning of the contaminated area around the ChEZ was carried out with a preventive assessment of the degree of potential radioecological criticality. The most critical areas that form dangerous levels of food contamination and the population exposure dose were identified using data of the post-accident period of the Chernobyl accident in 1986. The intake of radionuclides into plants is due to two ways: aerial, including resuspension and forest fires, and root intake of radionuclides from soil into plants. The assessment of the degree of radioecological criticality of typological objects (areas of river basins with settlements) was made using a complex integral criticality index and an expert assessment of the criticality classes of selected environmental factors (landscapes, crops, soil, land use structure) during atmospheric transport and deposition of radioactive substances after radiation accidents, forest fires, dust storms, etc. Cartographic information has been created in the form of digital maps of river basins, underlying surface, vegetation, landscapes, and soil. The obtained thematic assessment zoning maps of the territory around the ChEZ can be used for preventive planning of rehabilitation measures after possible radiation emergencies within the ChEZ.

Відділом радіаційної екології Інституту проблем безпеки АЕС НАНУ запропонована методологія радіоекологічного районування території та превентивної оцінки критичності окремих районів [1,2]. Метою даної роботи була: 1) адаптація вказаної методології для території 100 км зони навколо Чорнобильської АЕС, 2) виявлення і оцінка потенційної радіаційної критичності окремих районів на цій території, 3) оцінка радіаційної ситуації, включаючи забруднення сільськогосподарської продукції, при повітряному перенесенні радіонуклідів з Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) у випадку викидів з промислових об'єктів в зоні, крупних лісових пожеж на радіоактивно

забрудненій території Українського Полісся та екстремальних погодних ситуацій (пилові бурі, сильні вітри і т.п.) з урахуванням місцевих умов [3]. Для цього вирішувалися такі завдання:

- вивчено природно-географічні та кліматичні особливості районів радіоактивно забруднених територій, виділено набір радіоекологічних факторів і проведено екологічне районування на основі ландшафтно-басейнового принципу з використанням ГІС-технологій;

- превентивно оцінена радіоекологічна критичність<sup>5</sup> сільськогосподарських територій на регіональному рівні, і виділено критично небезпечні райони.

Досвід оцінки подолання наслідків важких аварій показав, що рівні радіоактивного забруднення природних середовищ і пов'язані з ними дози опромінення людини визначаються не тільки характеристиками викиду з аварійного джерела і поточними метеорологічними умовами, але в значній мірі ландшафтно-геохімічними особливостями території і структурою землекористування. В результаті, при однаковій щільності забруднення території величини доз зовнішнього і внутрішнього опромінення населення та їх співвідношення можуть змінюватися в широкому діапазоні, який досягає двох порядків величини [4-6]. У гострому періоді радіаційної аварії, в періоди лісових пожеж і пилових бур на радіоактивно забруднених територіях провідним фактором формування радіаційної обстановки є зовнішнє опромінення. Згодом зростає внесок внутрішнього опромінення від надходження радіонуклідів в організм людини з харчовими продуктами. Забруднення продовольства обумовлено двома шляхами надходження радіонуклідів в рослини: в перший рік переважно позакореневим (аеральним), включаючи вторинний вітровий підйом і лісові пожежі, в наступні роки - шляхом кореневого надходження радіонуклідів в рослини з ґрунту.

Районування в межах великих районів, що зазнали радіоактивного забруднення випадіннями аварійних викидів, різнорідних за фізико-географічними, екологічними, радіаційним та іншими показниками, є складною методологічною задачею. Методологія радіоекологічного районування повинна забезпечити дотримання основних нормативів, критеріїв втручання і принципів, сформульованих Міжнародними нормами безпеки МАГАТЕ [7] і нормами радіаційної безпеки України НРБУ-97 [8]. Характер просторового розподілу екологічних характеристик території (рельєф, тип ґрунту, тип землекористування, рослинний покрив і ін.), які впливають на величину головного показника радіаційної небезпеки - поглиненої людиною дози опромінення – можуть різко змінюватися в межах елементів території. Одним з головних методологічних принципів районування є виділення районів, в межах яких значення всіх параметрів моніторингу можуть бути оцінені середнім значенням. Тому радіоекологічне районування дозволяє суттєво оптимізувати моніторинг і планування контрзаходів з метою зменшення доз опромінення населення, яке проживає на радіоактивно забруднених територіях.

Радіоекологічне районування території передбачає ряд послідовних етапів:

- вибір території, збір, вивчення, підготовка картографічних і довідкових матеріалів,

---

<sup>5</sup> Критичність – це сукупність властивостей ландшафту, що сприяють формуванню більшої поглинутої дози опромінення населення в порівнянні з іншими при однаковому рівні забруднення за рахунок інтенсивного накопичення радіонуклідів в рослинній продукції та продуктах харчування [2].

- створення цифрових карт басейнів, рельєфу, місцевості, регулярної сітки «regular grids» з кроком сітки 500x500 м,
- вибір класифікаційних ознак, що визначають формування радіаційної обстановки на забруднених територіях, аналіз і систематизація інформації з виділенням головних і другорядних характеристик,
- створення тематичних картографічних шарів - елементарних ландшафтів, типів ґрунтів, типів підстильної поверхні, видів рослинності [9-11],
- виділення типологічних районів, привласнення класів критичності, ранжування по класах радіоекологічної критичності, згідно з експертною оцінкою з використанням комплексного (зшитого) коду,
- розрахунок показника потенційної радіоекологічної критичності (PRC) для кожного типологічного району [2,12] і створення ситуаційних карт радіоекологічного районування.

При проведенні районування застосовується «сітковий підхід» (інтерполювання даних на рівномірну сітку з кроком 500 м). Сітка «regular grids» відповідає вимогам моделі території за всіма інформаційними компонентами з урахуванням масштабу розв'язуваних задач. Це забезпечує узгодженість вхідних і вихідних параметрів, універсальність моделі з одиницями вимірювань, по простору, за часом тощо. Комплексна радіоекологічна карта для конкретної території будується з використанням сценарних карт (по сезонах, за типами землекористування і т.п.) окремих інформаційних шарів, передбачених радіоекологічної моделлю формування радіаційної обстановки на території [12].

Районування передбачає присвоєння територіальним об'єктам радіоекологічних параметрів і створення баз даних параметрів, пов'язаних з комплексними кодами, в яких групи цифр означають класи критичності екологічних параметрів локальної місцевості.

Територія 100-км зони навколо ЧАЕС представлена системою водозборів і характеризується широким спектром ґрунтів - від органічних торф'яних різного ступеня зволоження до сірих лісових. Неприятливі погодні умови пов'язані: з сильними вітрами (> 5 м/с) тривалістю більше 1 доби, в основному західного (25%) і північно-західного (15%) напрямків вітру, з пиловими бурями (від 2 до 3 днів в році), з суховіями з тривалістю в середньому до 3-х діб і максимум до 6 діб в році, зі зменшенням річної суми опадів (в 2016 р з 773 до 373 мм/рік в 2019 р.). Після аварії на ЧАЕС в результаті радіоекологічного моніторингу на забрудненій території дослідниками накопичено і проаналізовано великий обсяг радіоекологічної інформації, отримано коефіцієнти міграції радіонуклідів в біологічних ланцюгах і інші параметри, що полегшують моделювання радіаційної ситуації [14].

Оцінка внеску кожної з обраних екологічних характеристик території проводилася експертно з використанням накопичених аналітичних і експериментальних матеріалів з оцінки радіаційної ситуації на сільськогосподарських територіях в післячорнобильський період. Оцінка вкладів екологічних чинників для регіонального масштабу при аеральному і кореневому забрудненні сільськогосподарської рослинності представлена в табл. 1 [3,5,6,14].

Таблиця 1 – Вагові коефіцієнти  $w$  (значення вкладів екологічних факторів у поглинену дозу) на регіональному масштабі при: аеральному (I) і кореневому (II) шляхах забруднення рослинності.

Характеристика (I)	$w, \%$	Характеристика (II)	$w, \%$
1. Тип регіонального землекористування	40	1. Тип регіонального землекористування	40
2. Тип елементарного ландшафту	30	2. Тип елементарного ландшафту	25
3. Вид рослинності	30	3. Тип ґрунту	20
		4. Вид рослинності	15

Показник потенційної радіоекологічної критичності ( $PRC$ ) елемента території з типологічним радіоекологічним кодом « $klmn$ » характеризує роль його екологічних властивостей без урахування фактичного рівня забруднення в разі аварії.  $PRC$  елемента території визначається як сумарна критичність всіх екологічних факторів і їх внесок у формування дози:

$$PRC_{klmn} = \sum_{i=1}^3 w_i \cdot PRC_{klmn}^i \quad (1)$$

де  $PRC_{klmn}^i$  - потенційна радіоекологічна критичність  $i$ -го екологічного чинника для елемента території з кодом « $klmn$ »;  $w_i$  - ваговий коефіцієнт  $i$ -го екологічного чинника. Значення  $w_i$  були обрані за експертними оцінками згідно таблиці 1.

Потенційна радіоекологічна критичність  $i$ -го екологічного чинника визначається на основі системи вагових коефіцієнтів [13]:

$$PRC_{klmn}^i = \frac{N_i + 1 - K_{cr}}{\sum_{j=1}^{N_i} j} = \frac{2(N_i + 1 - K_{cr})}{N_i(N_i + 1)}, \quad (2)$$

де клас критичності  $K_{cr}$   $i$ -го екологічного фактора дорівнює  $k$  для  $i = 1$ ,  $l$  для  $i = 2$ ,  $m$  для  $i = 3$ ,  $n$  для  $i = 4$ .

Таким чином, оцінка критичності території 100 км зони навколо ЧАЕС проводилася в три етапи: превентивна оцінка потенційної критичності при повітряному забрудненні території внаслідок лісових пожеж, пилових бур і можливих радіаційних аварій в першу фазу аварії [5], превентивна оцінка потенційної критичності при довгостроковому прогнозуванні наслідків радіаційної аварії (забруднення продукції по системі «ґрунт-рослина» і внесок в дозове навантаження на населення) [6], сумарна (інтегральна) оцінка потенційної критичності за двома шляхами надходження радіонуклідів в продукцію і проведення радіоекологічного районування.

Проведемо оцінку ступеня радіоекологічної критичності та комплексне радіоекологічне районування території 100 км зони ЧАЕС на основі ранжування екологічних параметрів [2,12].

Для оцінки показника радіоекологічної критичності сільськогосподарських територій були підготовлені матриці класів критичності і вагових коефіцієнтів по кожному екологічному фактору при забрудненні території в результаті повітряного перенесення радіоактивних елементів в період пожеж або пилових бур із радіоактивно забруднених районів та міграції радіонуклідів в системі «грунт-рослина». Спираючись на досвід і результати наукових досліджень території радіоактивного забруднення після аварії на ЧАЕС в 1986 р, було використано співвідношення (коефіцієнт пропорційності КР для трьох радіонуклідів  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ) між щільністю забруднення території і концентрацією радіонуклідів у врожаї в гострій період після аварійного викиду з АЕС, а також коефіцієнти переносу (ТФ) радіонуклідів з ґрунту в рослинність і окремі види продукції (молоко, м'ясо, хліб) по харчовому ланцюгу [5, 6].

Культури були об'єднані в групи за класами критичності (за коефіцієнтами пропорційності та переносу), для яких були розраховані вагові коефіцієнти  $PRC_{klmn}^i$  за формулами (1,2). Для оцінки ступеня критичності при аеральному і кореневому забрудненні рослинництва екологічні параметри, які ранжуються за класами критичності із розрахованими ваговими коефіцієнтами, були представлені у вигляді матриці класів критичності і вагових коефіцієнтів. Використовуючи отримані матриці і побудовані у вигляді «regular grids» картографічні шари (басейнів, ландшафтів, підстильної поверхні, рослинності, гідрографії), була проведена класифікація території за класами ступеню радіоекологічної критичності послідовно: при аеральному, кореневому і сумарному забрудненні рослинницької продукції. Були сформовані сценарії рослинного покриву за фазами розвитку рослин для структури регіонального землекористування, що включає ліси, луки, агроландшафт (сільськогосподарську територію), сільську забудову з городами. Розроблені уніфіковані класифікатори на основі емпіричних даних за коефіцієнтами пропорційності (КР) для оцінки аерального забруднення рослинності і за коефіцієнтами переносу (ТФ) радіонуклідів з ґрунту в рослинність та окремі види продукції (молоко, м'ясо, хліб) по харчовому ланцюгу.

Аналіз модельних розрахунків показує, що при аеральному забрудненні продукції за інтегральним показником - сумі вкладів 3-х зазначених екологічних параметрів у дозове навантаження на населення (табл. 1), найбільш критичними територіями на 1-ій фазі вегетації рослин є райони сільськогосподарського виробництва, та населених пунктів з городами, розташованими на супераквальних ландшафтах, на яких вирощуються сіяні трави, зелень і т.п.

Для пізньої фази радіаційної аварії реалізована методологія оцінки забруднення рослинності кореневим шляхом з залученням чотирьох екологічних факторів - тип ґрунту, тип ландшафту, тип землекористування зі структурою рослинності (тип рослин). Це дозволяє оцінити вплив ландшафтно-геохімічних умов місцевості на процеси міграції радіонуклідів у системі «грунт-рослина» і формування дози опромінення населення, яке проживає у межах даного регіону.

Розглянуто 4 класи підстильної поверхні, 3 класи елементарних ландшафтів, 16 ґрунтових груп та 6 видів сільськогосподарських культур, які найбільш часто використовуються у виробництві.



При тематичному картографуванні використовувалися карта підстильної поверхні, карта ґрунтів М 1: 200000 за станом на 2002 р. і дані рельєфу проекту SRTM з розрізненням 30 м [10].

Згідно з підготовленими класифікаторами, було проведено ранжування території басейнів за класами критичності рослинності і тематичне ГІС - картографування. Застосовувані ГІС-процедури дозволили інтегрувати всю екологічну інформацію, скласти загальний комплексний код і розрахувати інтегральну критичність по осередках регулярної сітки. Райони, об'єднані за комплексним кодом, були оцінені за величиною ступеня радіоекологічної критичності (рис.1). Комплексна сумарна оцінка потенційної радіоекологічної критичності території 100-км зони ЧАЕС (без ЧЗВ) для різних етапів радіаційної аварії з урахуванням аерального та кореневого шляхів забруднення продукції проводилася за формулами (1-2) і за двома сценаріями просторового розподілу рослинності. Результати у вигляді тематичної карти сумарної потенційної радіоекологічної критичності території 100 км зони ЧАЕС по типологічних районах можуть дати превентивну характеристику території навколо ЧЗВ для планування природоохоронних заходів при великих лісових пожежах та пилових бурях, коли відбувається додаткове радіоактивне забруднення місцевості на великих масштабах.

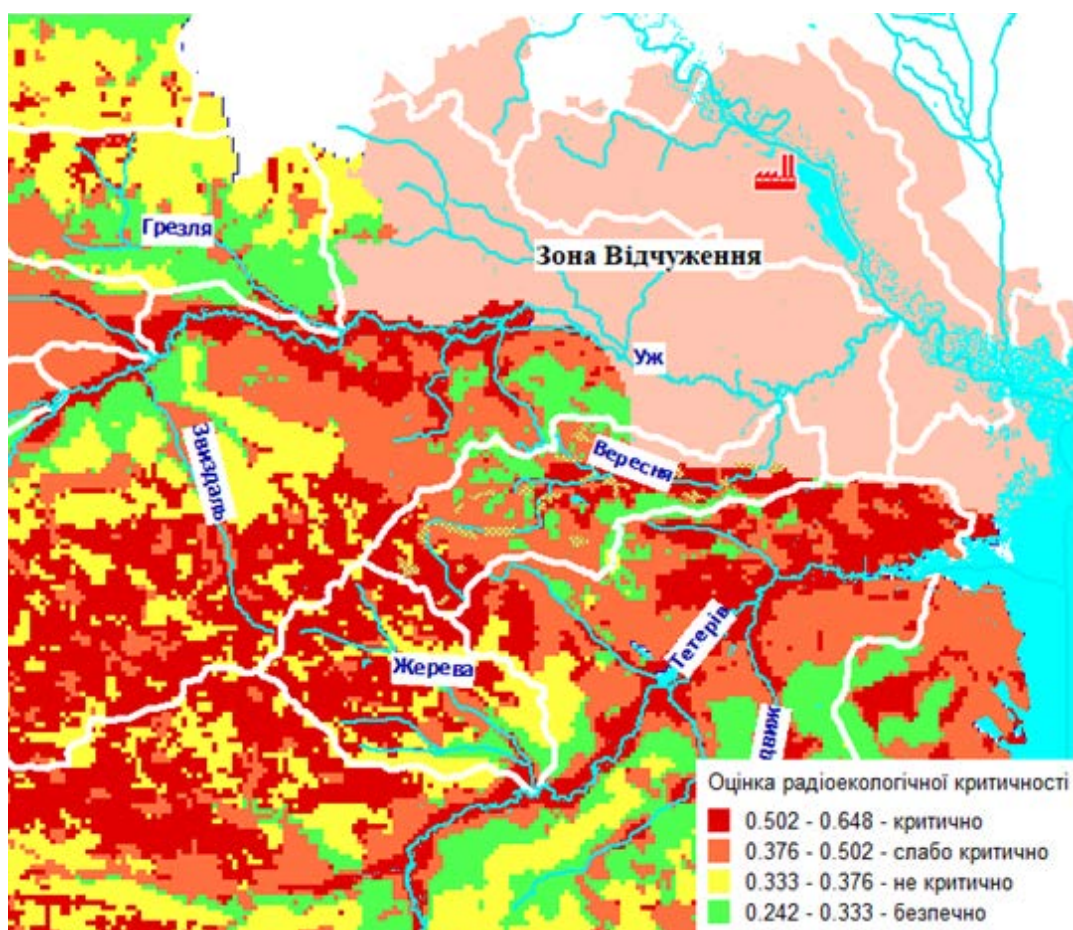


Рис.1. Карта комплексної потенційної радіоекологічної критичності типологічних районів території 100 км зони навколо ЧАЕС.

Для окремих басейнів було проведено тематичне картографування із виділенням однотипних районів за комплексним кодом (наприклад, 114: 1

символ - тип землекористування, 2 символ - тип ландшафту, 3 символ - вид рослинності) з класом ступеня потенційної радіоекологічної критичності - PRC. Результати представлено на рис.2.

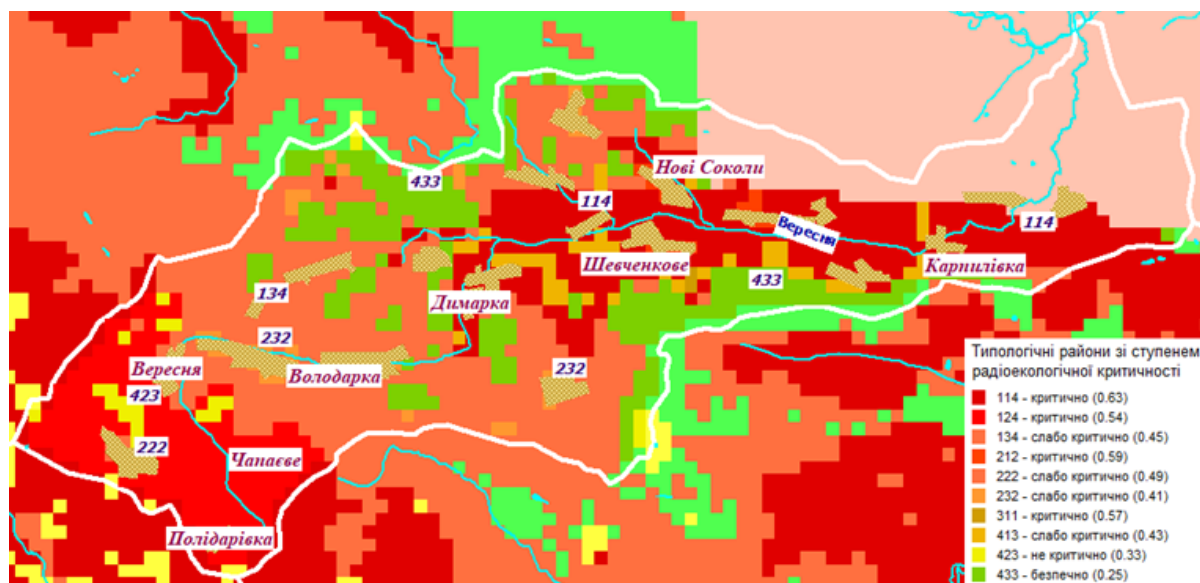


Рис. 2. Районування окремих територій басейнів річок 100 км зони ЧАЕС (басейн р. Вересня) за комплексним інтегральним кодом.

Найбільш критичними є території, зайняті під природні і сіяні трави. Як правило, вони лежать на супераквальних ландшафтах у заплавах річок із торф'яними та луговими ґрунтами.

Найбільш критичними є типологічні райони з комплексними кодами 114 та 212: «114» - трав'яниста рослинність сільськогосподарських угідь; супераквальний ландшафт; зернові культури; торфові ґрунти та торфовища низинних боліт; ступінь радіоекологічної критичності = 0.63 з площею - 77.22 км<sup>2</sup>;

«212» - забудова з городами; супераквальний ландшафт; картопля і коренеплоди; дерново-підзолисті глеюваті і оглеєні супіщані і легкосуглинкові ґрунти; ступінь радіоекологічної критичності = 0.59 з площею – 4.98 км<sup>2</sup>.

Виділені найбільш критичні населені пункти - Андріївка, Димарка, Ковалівка, Красилівка, Нові Соколи, розташовані на супераквальному ландшафті з дерново-підзолистими глеюватими ґрунтами (збудова з городами, код типологічного району 114)

Представлені карто-схеми (рис.1 - рис.2) з виділеними по басейнах радіоекологічно критичними районами і населеними пунктами дозволяють превентивно характеризувати територію 100 км зони навколо ЧАЕС для планування природоохоронних заходів при великих лісових пожежах та пилових бурях на радіактивно забруднених територіях, та в разі радіаційних аварій на промислових об'єктах в ЧЗВ.

Процес районування важко повністю формалізувати. Можна визначити загальні принципи і правила, але для кожної місцевості існують свої, характерні тільки для неї особливості, які слід відобразити в класифікаторах і

враховувати при аналізі і синтезі характеристик об'єктів різного масштабу. Наведені приклади можуть бути використані в якості зразків. Районування вимагає від виконавців творчого підходу.

Запропонована методологія і реалізація радіоекологічного районування території має універсальний характер і може бути адаптована і застосована для будь-якої території.

### **Список використаних джерел:**

1. Prister B, Talerko N, Garger E, Vinogradskaya V and Lev T. Methodology for long-term monitoring to dose assessment using radiological zoning and modeling of radionuclides migration in environmental and food chains – Countermeasures of Cesium Uptake by Farm Crops and Live stock STCU Project 5953// Proceedings of the Final ISTC/STCU Technical Review Committee Meeting of Fukushima Initiative “On the Environmental Assessment for Long Term Monitoring and Remediation in around Fukushima”/ November 5-6, 2015, Tokyo, Japan. JAEA - Conf 2016- 002. DOI:10.11484/jaea-conf-2016-002. 55 – 85.

2. B.S.Prister, V. D. Vinogradskaya, T. D. Lev, M. M. Talerko, E. K. Garger, Y. Onishi, O. G. Tischenko. Preventive radioecological assessment of territory for optimization of monitoring and countermeasures after radiation accidents. // Journal of Environmental Radioactivity. Volumes 184–185, April 2018, Pages 140-151. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.01.021>.

3. Prister Boris. Behavior of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Agricultural osystems // Behavior of Radionuclides in the Environment II Chernobyl./ Editors A. Konoplev, K. Kato, S. Kalmykov. Springer. Singapur.2020: 229-282.

4. Алексахин Р. М., Булдаков Л. А., Губанов В. А., Дрожко Е. Г., Ильин Л. А., Крышев И. И., Линге И. И., Романов Г. Н., Савкин М. Н., Садров М. М., Тихомиров Ф. А., Холина Ю. Б. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Р. М. Алексахин и др. Под ред. Л. А. Ильина и В. А. Губанова. – М.: ИздАТ, 2001. – 752 с.

5. Пристер Б. С. Проблемы сельскохозяйственной радиоэкологии и радиобиологии при загрязнении окружающей среды молодой смесью продуктов ядерного деления : монография. Ин-т проблем безопасности АЭС. – Чернобыль (Киев.обл.): Ин-т проблем безопасности АЭС. – 2008. – 320 с.

6. Пристер Б. С. Проблемы прогнозирования поведения радионуклидов в системе почва-растение / Б. С. Пристер // В кн. Адаптация агроэкоосферы к условиям техногенеза / Под ред. Р. Г. Ильязова. – Казань: ФЭН. – 2006. – С. 85 – 127. : учеб. – М. : Высш. шк., 1991. – 366 с.

7. Готовность и реагирование в случае ядерной и радиационной аварийной ситуации. Требования. Серия изд. по безопасности № GS-R-2. МАГАТЭ, 2004. 92 с.

8. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97). – К.: Отдел полиграфии Украинского центра Госсанэпиднадзора МОЗ Украины, 1997. – 125 с.

9. Национальный атлас Украины. Электронная версия. URL: <http://www.isgeo.com.ua>

10. Архів даних щодо висот рельєфу поверхні Землі : [Електронний ресурс] // Проект США Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM).- Режим доступу:<http://srtm.csi.cgiar.org>;[http://gisweb.ciat.cgiar.org/TRMM/SRTM\\_Resampled\\_250m](http://gisweb.ciat.cgiar.org/TRMM/SRTM_Resampled_250m).

11. Інтерактивна топографічна карта України М 1:100000. <http://maps.vlasenko.net/>

12. Б. С. Прістер, Є. К. Гаргер, Н. Н. Талерко, В. Д. Виноградська, Т. Д. Лев. Модель районування території за різних рівнів можливого радіоактивного забруднення агросфери. // Землеробство. -2015. -Вип. 2. С. 79 - 86.

13. Fishburn P. C. Utility theory for decision making / P. C. Fishburn. — John Wiley & Sons, New York, 1972. — 340 p.

14. Прістер Б. С., Кашпаров В. О., Лазарєв М. М., Перепелятнікова Л. В. та ін. (1998) Ведення сільського господарства в умовах радіоактивного забруднення території України внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС на період 1999 – 2002 рр. // Методичні рекомендації. – Київ. – 1998. – 104 с.

## НЕВИВЧЕНІ УРОКИ ЧОРНОБИЛЯ ТА ФУКУСИМИ

*Рибалка В. Б.*

*ВП НТЦ ДП «НАЕК «Енергоатом» відділ експериментальних досліджень  
відділення науково-технічної підтримки у м. Одеса, місто Одеса,  
rybalka\_valery@email.ua*

Минуло 35 років з моменту катастрофи на 4 блоці Чорнобильської АЕС. Основна проблема – реабілітація природних радіаційно-забруднених територій не вирішена. Механізми утримання та форми сполук у яких знаходяться радіонукліди в екосистемах не досліджені. Питання управління міграцією радіонуклідів – очищенням від радіоактивного забруднення соромливо приховано під терміном «автореабілітація». Науковий світ розписався в безсиллі при здатності «освоїти» величезні кошти. Напривеликий жаль, славетна японська академічна думка опинилась на рівні української, незважаючи на майже 25 річний досвід робіт в Чорнобильській зоні (після 1986 року до 2011 року) до аварії на АЕС Фукусима-1.

Чорнобильське забруднення набагато складніше в реабілітації за фукусимське. Радіонукліди Cs, Sr, U, Pu, TUE, паливні та паливно-конструкційні частинки - надто різні властивості забруднювачів, надто різні фактори впливають на них та надто різні сполуки, здатні утримувати їх в екосистемі. Цезієве забруднення потебує одночасного врахування набагато меншої кількості факторів і аналітично підтримується набагато легше.

В 2004 році в рамках українсько-японської наукової програми ICC/NSRA Joint research program. Project 2: “BASIC RESEARCH ON THE RECOVERY OF THE FACILITY AND ENVIRONMENT” Task 4 (2-2): REDUCTION OF THE RADIOACTIVITY IN THE ENVIRONMENT в експериментах в чорнобильській зоні було доведено, що поведінкою радіоцезію в почві можна успішно керувати з використаннями мікроорганізмів, біологічно-активних речовин та спеціальних прийомів, що враховують властивості забруднювача і біоти.

Хоча сезонне очищення верхнього шару ґрунту досягало 84-90%, роботи були припинені японською стороною у зв'язку з закінченням строку програми, а українською – в зв'язку з хворобою та смертю керівника Чорнобильського наукового центру Г.К. Руді.

Проте навіть зараз викликає подив, що пізніше, через 25 років, після аварії на Фукусима-1 NSRA не було одного-однісінького кроку і не використала отримані дані для доопрацювання технології очищення ґрунтів, що забруднені  $^{137}\text{Cs}$ . А бюрократизованість питання з української сторони замінила будь-які контакти тих вчених, хто міг би вирішити питання, на тих, хто є представником офіційних структур і ні в якому разі не здатен навіть просто сприйняти комплекс проблем, які мають бути розв'язані.

Первинне питання вирішення пролем управління міграцією радіонуклідів в ґрунтах лежить в сфері визначення об'єкту дослідження, його властивостей і, відповідно, методичних обмежень, що при цьому виникають. Наприклад, що є почва? Це органомінеральних комплекс, скажуть агрономи (А). Це – специфічне середовище в якому, живуть організми з властивостями, які до сих пір ще не всі досліджені (Б).

У випадку А дослідник використовує спрощені підходи, які працюють для хімічних речовин, та дають задзалегідь невірні результати для живої екосистеми. Наприклад, невраховується зміна сезонної зв'язаності радіонуклідів внаслідок біотичної активності. Використовується необгрунтовані аналогії типу: «калій-аналог цезію», хоча ще в 1966 році вказано на різний вплив цих елементів на ферментні системи (Туманов А. А., Осипов Н. И. В сб. «Получение и анализ веществ особой чистоты», М., Наука, 1966, с. 238.).

Поверхневий підхід до «форм» радіонуклідів здебільшо обмежується молекулярними масами сполук, що зв'язують нукліди, проте не враховується механізм утримання нукліда. Тобто сполуки з різними молекулярними масами, наприклад 100 000 АОМ та 10 000 АОМ можуть зв'язувати нуклід хімічними угруппуваннями однакової структури, проте мати різницю в загальній масі.

Ще в 1996 році було продемонстрована можливість врахування методом радіохімічного тестування зв'язуючих властивостей сумішей невизначеного складу. Суть метода полягає в тому, що найміцніше зв'язування буде реалізоване першим. Тобто першими прореагують сполуки, що утворюють найміцніші комплексні сполуки. Для опису властивостей таких угруппувань використовується метод конкурентних реакцій як з боку катіонів – конкурентів за комплексоутворюючу сполуку, так і з боку розчинних комплексоутворювачів, що здатні утворювати сполуку в розчині і конкурувати за радіонуклід з угруппуванням, що досліджується. Вцілому метод «відчуває» речовину, що має найкращі зв'язуючі властивості в кількості до  $(10E-12)\%$  при абсолютній кількості  $(10E-12)\div(10E-14)$ г серед 1000 000 сторонніх речовин і дозволяє «корегувати» появу або зникнення такої речовини при впливі на мікробну спільноту.

Приклади скорочених тестів приведені на рисунках 1-5. Зокрема на рисунках 1 та 2 показано, що змінюються сорбційні властивості природного субстрату в широкому діапазоні рН концентрацій, а на рисунках 3-5 на модельних сорбентах показано наскільки чутливо метод «відрізняє» комплексоутворюючі властивості –СООН – групи в залежності від того, в яку структуру вона входить.

Врахування впливу на біотичну складову біологічно-активними речовинами показало широкі можливості зміни як росту окремих мікробних культур, так і накопичення ними Cs-137 (Рисунок 7).

Вплив рослин, як стабілізаторів процесів обміну в природних мікробних екосистемах в комплексі з використанням сумішей біологічно-активних речовин дає можливість суттєво змінювати властивості щодо утримуючих властивостей ґрунту та накопичення радіонуклідів рослиною (Рисунки 6, 7 та Таблиця 1.). Також цікавим для вирішення дезактивації чорнобильських забруднень є той факт, що Cs-137 та Sr-90 зв'язуються за різними механізмами – з різних причин, для вирішення різних задач культурами (мікро)організмів.



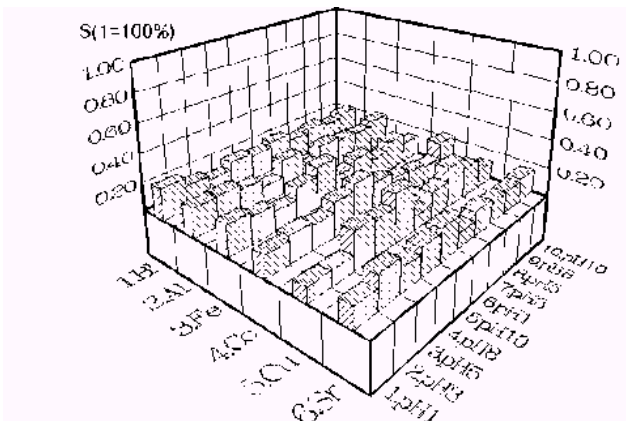


Рисунок 1 Графік сорбції  $^{137}\text{Cs}$  субстратом лист берези до засівання мікробіоти

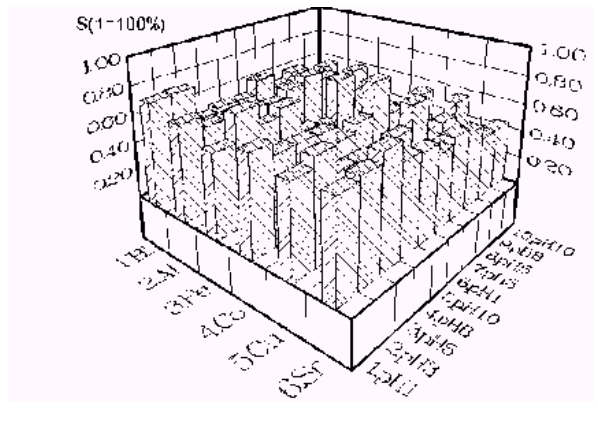


Рисунок 2 Графік сорбції  $^{137}\text{Cs}$  субстратом лист берези після культивування мікробіоти

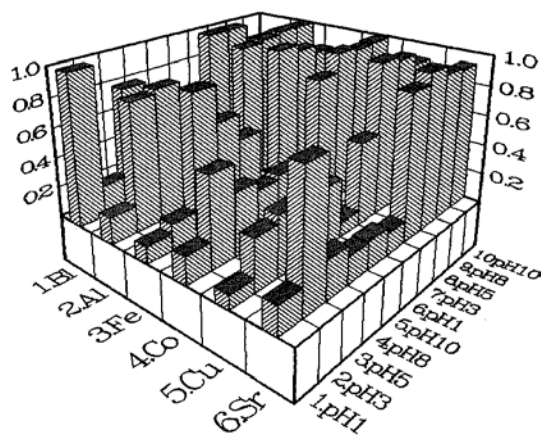


Рисунок 3 Сорбція  $^{139}\text{Ce}$  Сфероном С

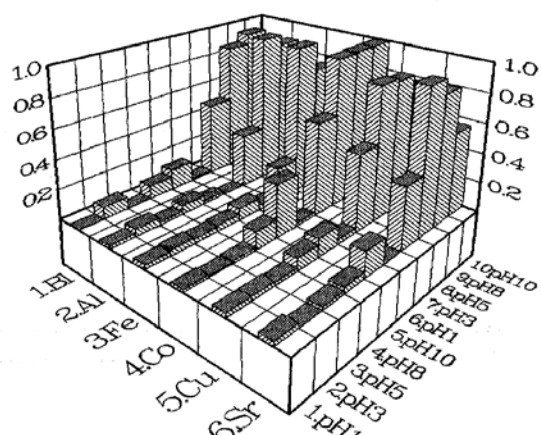


Рисунок 4 Сорбція  $^{139}\text{Ce}$  Сфероном - ІДОК

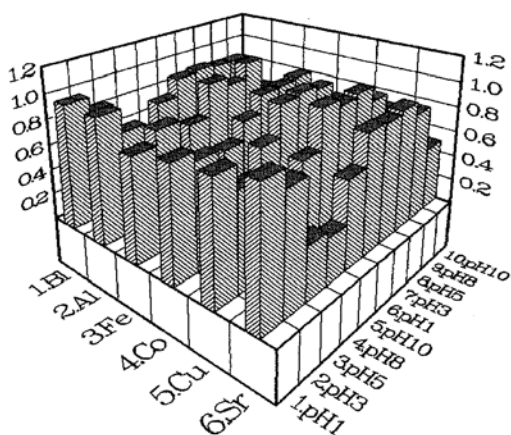


Рисунок 5 Сорбція  $^{139}\text{Ce}$  субстратом Сфероном-Саліцил



Рисунок 6 Підготовка до радіохімічного тестування субстратів, що досліджуються. Незважаючи на достатньо великі трудозатрати метод себе цілком виправдовує оскільки нічого іншого на цей час немає.

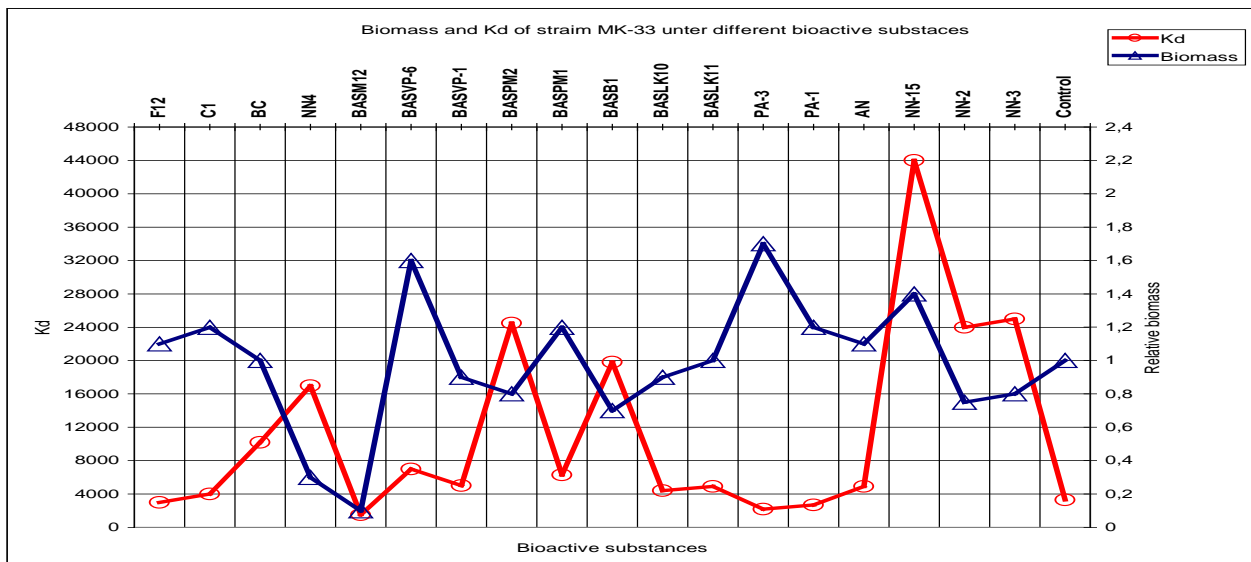


Рисунок 7. Зміна накопичення Cs-137 (Kd) та біомаси культури K078 під впливом біологічно-активних речовин (накопичення біомаси при відсутності біологічно-активних речовин прийнято за 1).

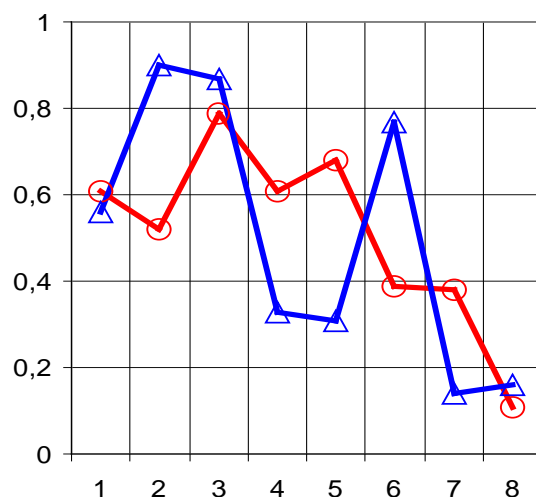


Рисунок 8 Сумарне видалення  $^{137}\text{Cs}$  з використанням рослин, культури K078 та впливу біологічноактивних речовин на мікроорганізми. №8 – контроль. Дані приведено відносно загального вмісту Cs-137 в почві.з ґрунту культурою K-078, та рослинами: загальна кількість  $^{137}\text{Cs}$  прийнята за 1. — горих, ▲ кукурудза.

### Висновки

Біотичний фактор –первинна основа сполук радіонуклідів в екосистемах.

Мікробіота забезпечує аномально сильні зв'язуючі властивості щодо радіонуклідів.

Масові і мольні кількості вмісту радіонуклідів навіть на сильно забруднених територіях дуже малі. Тому й для їх зв'язування необхідні вкрай малі кількості речовин, що утворюють з ними міцні сполуки.

Накопичений досвід вказує на те, що технологія очищення радіаційнозабруднених ґрунтів - реабілітація чорнобильської зони відчуження та забруднених територій Фукусими- цілком реальна справа.



# INFORMATION SYSTEM FOR RECOGNITION AND PROCESSING OF PRIMARY PROJECT INFORMATION

*Rovnyk O. S.<sup>1</sup>, Trunova O. V.<sup>2</sup>  
Chernihiv Polytechnic National University,  
street Shevchenko, 95, Chernihiv, 14035, Ukraine  
<sup>1</sup> alexrovnyk@gmail.com,  
<sup>2</sup> e.trunova@gmail.com.*

**Abstract.** The information system of recognition and processing of primary design information is considered in this study. The stages of interaction between the user and the system are selected and evaluated in detail: forming the image from the drawn diagram; interaction with the created diagram; storage and distribution of the chart file; manage application settings and research information. Based on the stages of use and requirements, the system's functionality should support formed, which is shown in the diagram of use cases. Implementing the system's functionality in combination with an intuitive interface will allow users to create diagrams quickly and easily, design systems at the stage of requirements analysis during discussions and brainstorming, reduce time and financial costs.

The development of any application, system, service, etc., is a complex technological process that requires a lot of effort, time and careful preparation. Planning and design processes are integral steps in product development. If there is no carefully thought-out scenario, the development team may face problems and difficulties, wasting time and money. Worse of all, the result may not meet the requirements and expectations at all.

Product development is a dynamic process, and each team has an individual approach and capabilities. Therefore, there are situations when the project documentation is incomplete, inaccessible, outdated, and sometimes absent. And solving this issue requires a lot of resources, both human, financial and time.

UML is used most often at the design stage. UML is a powerful tool that can significantly improve the quality of system analysis and design. The iterative use of UML in analysis and design allows for a better understanding between the business team and the IT team.

Thus, creating an information system for the recognition and processing of primary design information will reduce time and costs at the design stage, speed up the creation and/or completion of documentation. The system's application will allow the more efficient and faster design of applications, systems, services, etc., quickly transfer charts from paper to electronic format.

To build a system for recognizing and processing primary design information, it is necessary to clearly define the functionality that will meet all user needs to create diagrams. When creating requirements for the system, it is essential to get acquainted with the subject area in detail and make a list of user actions when using the application.

There are four main stages of interaction between the user and the system:

1. Forming an image from the drawn diagram.
2. Interaction with the created diagram.

3. Save and distribute the chart file.
4. Manage application settings and research information.

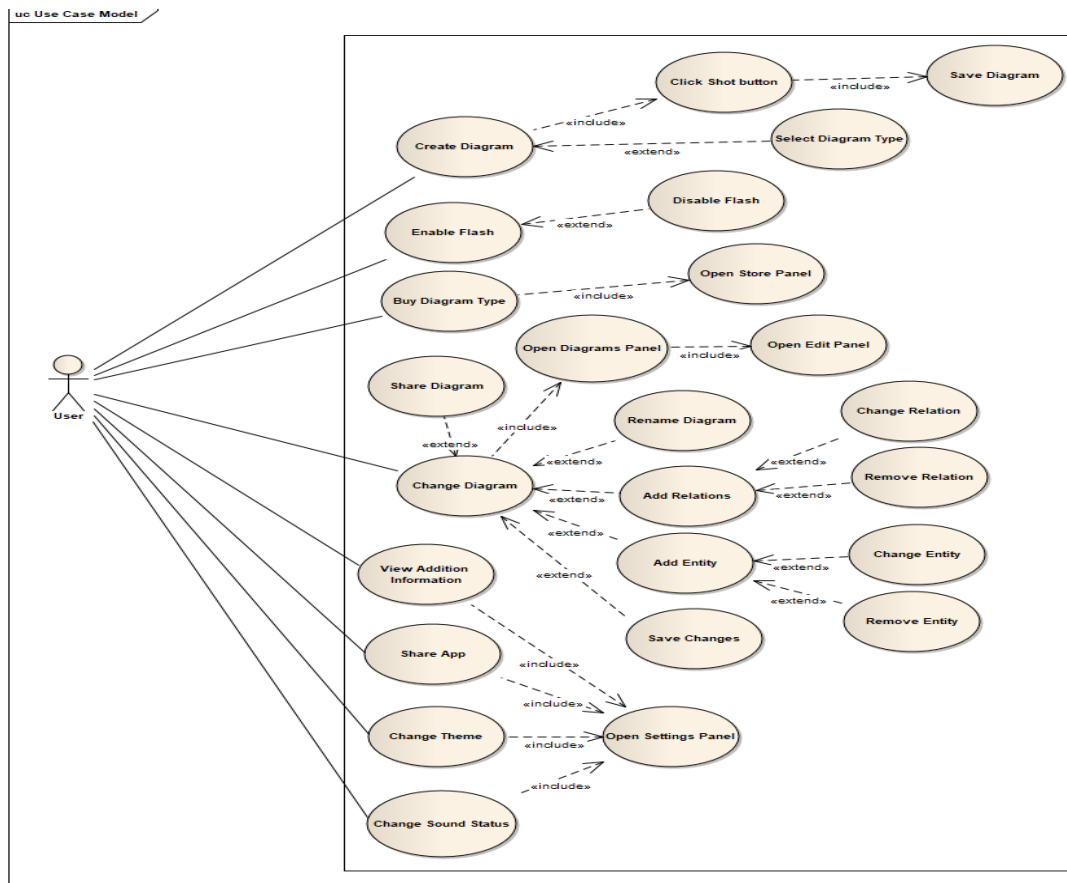
*The first stage* characterized by two types of input data: image and chart type. For more effective analysis, it is necessary to use high-quality photos. Due to technical means, the user can only use the flash function when shooting a chart. To transfer a chart type, the user must specify (select) it before creating a photo.

*The second stage.* Image analysis does not guarantee a 100% accurate result. The algorithm may delete the entity or add an extra link by mistake. It must be taken into account that the potential desire of the user to change the chart. Therefore, during the second stage, you need to highlight the following user actions: edit the chart, add, delete and edit entities, links on the chart.

*The third stage* is to export as a file or image. The first involves the further use of the chart in more specialized systems, such as Enterprise Architect, Visual Paradigm, etc. Image export is required to create documentation. Also, the user should be able to delete unnecessary charts.

*The fourth stage.* Settings management is an additional feature that allows the user to change the application for more comfortable use. Usually, the main requirements are to change the interface and adjust the sound when taking pictures. It is necessary to get acquainted with the system's functionality and the description of the available diagrams for beginner users. Studying this information will allow you to navigate more confidently in the field of charting.

We formed the functionality that the system should support based on the stages of use and requirements, which is shown in the diagram of usage options in Figure 1, in particular:



Picture 1 – Use case diagram

- selection of chart type for recognition;
- creating a chart by analyzing a photo or drawing;
- storage, deletion and export of charts;
- add, delete, edit chart entities;
- add, delete, edit chart links;
- control of the camera and mobile device;
- control of a flashlight and a mobile device;
- change the graphical interface and application settings;
- adding new chart types for recognition from the Diagram Store.

Implementing the functionality of the developed system in combination with an intuitive interface will allow users to quickly and easily create diagrams, design systems at the stage of requirements analysis during discussions and brainstorming, reduce time and financial costs.

### **References:**

1. All About UML [Electronic resource]. – Access mode: <https://qa-platforms.com/all-about-uml>
2. Аписелла М. UML Упрощает описание проектов [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.osp.ru/cw/2000/16-17/4602/>
3. How to Write Effective Use Cases? [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.visual-paradigm.com/tutorials/writingeffectiveusecase.jsp>
4. UML Class Diagram Tutorial [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.visual-paradigm.com/guide/uml-unified-modeling-language/uml-class-diagram-tutorial/>

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОПОЛІМЕРНИХ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ ДЛЯ КОНДИЦІОНУВАННЯ РРВ

*Розко А. М., Федоренко Ю. Г., Ольховик Ю. О.*

*Розко А.М. канд. геол. н., ст. н. с.*

*Інститут геохімії мінералогії та рудоутворення*

*ім. Семененка М.П. НАН України м. Київ,*

*ORCID:0000-0002-4614-5569, al.rozko@gmail.com*

*Федоренко Ю.Г. н. с., Державна установа «Інститут геохімії навколишнього*

*середовища НАН України» м. Київ,*

*ORCID:0000-0001-7746-2332*

*Ольховик Ю.О., д.т.н., завідувач відділу, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» м. Київ, ORCID:0000-0001-5653-2370, yolkhovyk@ukr.net*

Геополімерні матеріали з'явилися у другій половині минулого століття завдяки роботам Дж. Давидовця, В. Д. Глуховського та інших.

Привабливість нових матеріалів полягала у тому, що сировина (алюмосилікатні природні мінерали), відходи виробництва: гранульовані доменні шлаки металургійних комбінатів, золи виносу теплових станцій, шлами глиноземних підприємств і т. д. широко розповсюджена. На відміну від виробництва портландцементу при синтезі геополімерів повітря не забруднюється викидами CO<sub>2</sub>, а самі геополімери з часом збільшують свою міцність у 1,5 – 2 рази.

Першочерговим при синтезі геополімерів є попередня активація сировинних матеріалів механічними, термічними та хімічними методами, створення умов для синтезу алюмосилікатних кластерів та поліконденсації останніх у просторову алюмосилікатну полімерну сітку. Ці процеси практично опановані у будівництві наслідком чого є створення покриття летовища в Австралії, виробництво каналізаційних труб фірмою «Рокла», виготовлення кераміки з регульованною поруватістю, то що. Досвіду про застосування геополімерних матеріалів для цементування солевміщуючих радіоактивних відходів обмаль, що пояснюється необхідністю проведення синтезу геополімерних зв'язуючих у сольовому середовищі боратів, нітратів, гідроксидів металів, ПАВ і т.д., а також спеціальними вимогами до кінцевих компаундів – швидкості вилуговування радіонуклідів, радіаційної стійкості зразків і т.д. Суттєво від будівництва відрізняється також сама процедура виготовлення компаундів ( цементування за підвищеною температурою, додаткове перемішування і т.і.).

Крім того слід відзначити, що найбільш поширені компоненти геополімерів – шлак та зола виносу вивчені недостатньо.

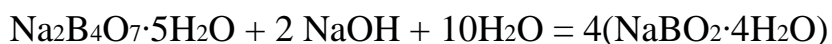
Шлак і зола різних комбінатів (підприємств) можуть відрізнитись хімічним складом, дисперсністю, кількістю домішок.

При синтезі геополімерних зв'язуючих повинні виконуватися певні співвідношення між хімічними елементами. Було встановлено, що при

цементуванні найбільш доцільним є співвідношення  $\text{Si}:\text{Al} = 2:1$ , при цьому для формування тетраедричної конфігурації атомів алюмінію на необхідна присутність катіонів  $\text{K}^+$  чи  $\text{Na}^+$  з співвідношенням  $\text{Al}/(\text{Na}+\text{K}) = 1$ . В означених вище умовах синтезуються початкові елементи (кластери).

При поліконденсації відбувається поєднання кластерів у об'ємну сітку, яка включає у себе різні складові компонентів та імітату: кристалічні фази шлаку (ранкініт –  $\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ , бредігіт –  $\alpha\cdot 2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2$ , мервініт –  $\text{Ca}_3\text{Mg}\cdot (\text{SiO}_4)_2$ . тощо), мікросфери золи виносу та її недопал, кристали метаборату і нітрату натрію з імітату РРВ і т.д. Ці речовини ідентифіковані методами рентгенівського фазового аналізу, електронної мікроскопії, диференціального термічного аналізу. Встановлено, що означені речовини з одного боку виконують роль лише наповнювачів компаундів. Це ускладнює розрахунки співвідношень між  $\text{Si}$  та  $\text{Al}$ , що зазвичай виконуються на основі хімічних аналізів, які у даному випадку не розділяють  $\text{Si}$  та  $\text{Al}$  у кристалах (мікросферах) наповнювачів від  $\text{Si}$  та  $\text{Al}$  у аморфних фазах шлаку та золи, саме з яких будується геополімерна матриця.

Кількість лужних металів слід враховувати як у рідкому склі при окремому внесенні, так і у імітаті РРВ з поправкою на те, що при зниженні температури імітату нижче  $60^\circ\text{C}$  тетраборат натрію перетворюється на метаборат з залученням деякої кількості гідроксиду натрію згідно з рівнянням:



Використання золи виносу ускладнюється перемінною кількістю недопалу, що може досягати 20% по масі та присутністю алюмосилікатних мікросфер, які виконують функції наповнювача, але у хімічному аналізі додають  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{SiO}_2$  у загальну масу оксидів. Ситуацію можна оптимізувати шляхом застосування для відбору до синтезу фракції  $< 80$  мкм та вилучення мікросфер, що мають щільність  $< 1$  г/см<sup>3</sup>, шляхом збору з поверхні води.

Пр тривалому вилуговуванні з зразків компаундів виходять розчиняються мікрокристали гідроксиду та метаборату натрію. Внаслідок цього збільшується пористість зразків з 9% до 26% та зменшується їх міцність. Зменшити розмір кристалів метаборату можна шляхом додавання мінеральних дисперсних частинок у імітат до його охолодження. У цьому плані перспективні результати отримані при обробці шлаку у дезінтеграторі при 14000 об/хв., що підвищило межу міцності на стиск у 1,5 раз.

Отже для успішного залучення геоматеріалів до іммобілізації солевмісних РРВ необхідні пошуки найбільш придатних складових геополімерних зв'язуючих з найбільшою масою аморфних фаз, найменшим вмістом наповнювачів-мінеральних кристалів, мікросфер, недопалу; підготовка складових до синтезу геополімерної матриці – відбір необхідних фракцій, вилучення частини мікросфер, диспергація шихти; проведення синтезу з урахуванням фазового складу компонентів та результатів їх хімічного аналізу.

## **FEATURES OF GEOPOLYMER BOUNDING AGENTS FOR LRW CONDITIONING.**

*A. Rozko, Yu. Fedorenko, Yu. Olkhovik*

*A. Rozko Ph.D.(Geology), Senior Researcher in the M. P Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, 34, Palladina av., Kiev-142, 03680 Ukraine. al.rozko@gmail.com, ORCID:0000-0002-4614-5569, al.rozko@gmail.com*

*Yu. Fedorenko Researcher SI "Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine", 34a, Palladina av., Kiev-142, 03680 Ukraine*

*Yu. Olkhovik Dr.Sc. (Tech) SI "Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine", 34a, Palladina av., Kiev-142, 03680 Ukraine, ORCID:0000-0001-5653-2370, yolkhovyk@ukr.net.*

It is established that for successful involvement of geomaterials in immobilization of salt-containing LRW it is necessary to search for the most suitable components of geopolymer bounding agents with the largest mass of amorphous phases, the smallest content of fillers-mineral crystals, microspheres, annealing; preparation of components for the synthesis of the geopolymer matrix - selection of the necessary fractions, extraction of part of the microspheres, dispergation of the load; conduction synthesis taking into account the phase composition of the components and the results of their chemical analysis.

# **AUTOMATED TESTING SYSTEM FOR DETERMINATION OF THE UI/UX DESIGNERS LEVEL OF COMPETENCE**

*Rudniev D. Ya.<sup>1</sup>, Fokin K. M.<sup>2</sup>, Trunova O. V.<sup>3</sup>  
Chernihiv Polytechnic National University,  
street Shevchenko, 95, Chernihiv, 14035, Ukraine  
<sup>1</sup> dimarudniev893@gmail.com,  
<sup>2</sup> kfokin2017@gmail.com,  
<sup>3</sup> e.trunova@gmail.com*

**Abstract.** To determine the UI/UX designer level of competence, competency maps are used to help identify the strengths and weaknesses of the candidate for the position or the student who has mastered the course. Testing is the most widely used method of monitoring the formation of competencies. There are many forms of testing for UI/UX designers. The most common are closed-form tests, which involve choosing an answer from a number of options (an alternative test or a match test).

The system of testing is proposed in the work offers to determine the UI/UX designers' level of competence. The system has the following advantages: UI and UX designer competencies are combined, as employers prefer UI/UX designers; test task requires not just choosing the correct answer from two options, but creating it from a list of different components; comprehensive assessment of the UI/UX designer competence

The modern labour market offers a large number of areas for design training. UI/UX, web, industrial, graphic, font, interior – and this is not a complete list. UI/UX designers are the most sought-after specialists today and in the foreseeable future. Website creation tools are so simplified that you can run your own online resource without knowing the code in 5 minutes. But it is important to remember that the site must solve the customer's problems and be understandable to the user. The same goes for mobile applications. The UI/UX designer solves the question of perspicuity: he takes the place of the user and fully designs the interface. Website or application projects cannot be done without a competent UI/UX designer. Competency maps are used to determine the level of competencies, which help to identify the strengths and weaknesses of the UI/UX designer.

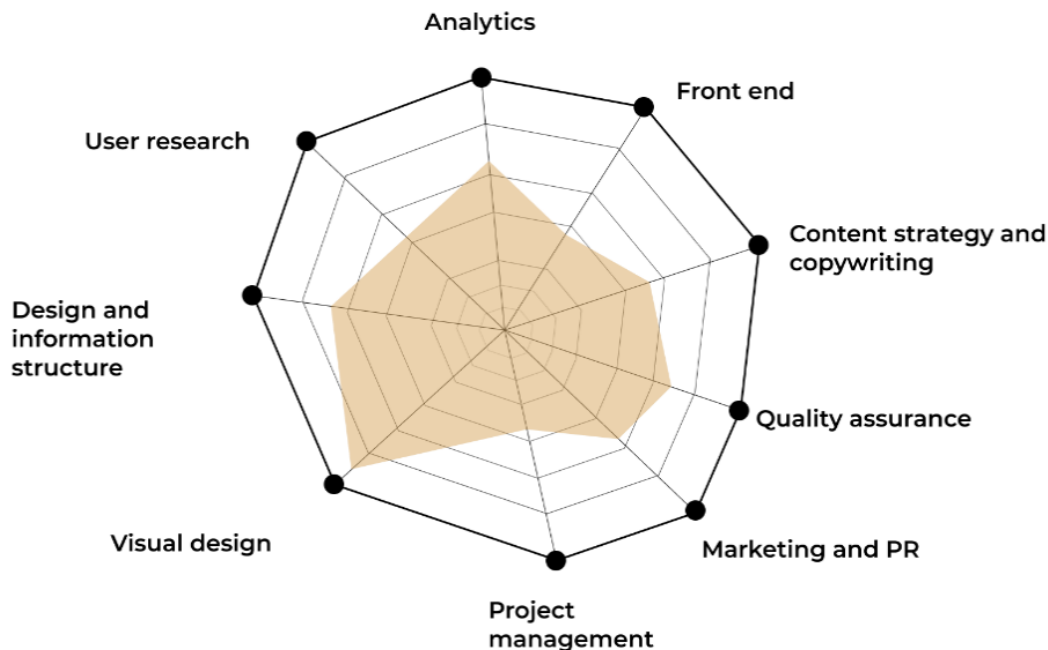
Johnny Birch has compiled a collection of competency maps for designers and developers from various companies. Of course, there are not enough designers, but there are examples from Basecamp, BuzzFeed, Coryndon Luxmoore, Lyst, Ope, Peter Merholz, Zendesk. They are arranged simply: there is a list of skills and for each of them there is a level of mastery.

The map of the main competencies of the UI/UX designer is presented in Pic. 1.

There are a lot of core components of the competency system of UI/UX designer like:

- Visual design;
- Design and information structure;

- Custom research;
- Analytics;
- Front and end;
- Content strategy and copywriting;
- Quality assurance;
- Marketing and PR;
- Project management.



Pic. 1. UI/UX designer competency system

Testing is the most widely used method of monitoring the formation of competencies. There are many forms of testing for UI/UX designers. The most common are closed-form tests, which involve choosing an answer from a number of options (an alternative test or a match test).

The *alternative test* can look like a control question (need to choose one from the couple of suggested answers) or it can look like the game (need to find inconsistencies or inaccuracies or different styles in one layout or page). It helps to navigate faster in the material, to find common and different in the phenomena, to classify specific phenomena by certain types and this are its pros. The cons are freely designing and freely answers formulating are disabled. The most famous are Method Action and KernType sets of games. An example of the task: to align the space between the letters, as close as possible to the original. Later, your version will be compared with the ideal and evaluated on a 100-point scale [2].

The *match test* usually consists of two parts, between which you need to establish a match. It is used to identify such learning outcomes as the ability to determine the use of substances, devices, processes, to establish a connection between abstract and concrete concepts, to classify them and so on. The pros of this type of tests is the compact form of the task that allow to check the assimilation of a large amount of educational material in a short time. The disadvantage are the limited direct purpose of



control and the complexity of the selection of material. Uxcel – a course built entirely on passing tests for attention and compliance [3]. Uxcel helps designers identify their strengths and weaknesses with a diagram of the designer's core competencies. It also contains tests on relevant topics, such as: colour theory, user interface components, basics of UI/UX design, etc.

Our proposed testing system offers to determine the level of competence of UI/UX designers. The main differences from the Uxcel course:

1. The level of competence of the UI/UX designer is determined (in existing systems UI and UX are separated from each other).

2. The testing process in our system contains an additional step.

In particular, the algorithm for performing the task is as follows:

– carefully read the test task and identify the main phrases and requirements for its implementation;

– place components of the correct style and shape according to the test task on an empty card, frame or screen template;

– compare your result and the correct answer;

3. Upon completion of testing, the UI/UX designer receives a percentage assessment of the level of competence.

The advantages of the system are:

– combining the competencies of UX and UX designers, as employers prefer UI/UX designers;

– tasks require not just choosing the correct answer from two options, but creating it from a list of different components;

– comprehensive assessment of the competence of the UI/UX designer.

## References

1. Deadsign. [Electronic resource]. – Access mode: [https://deadsign.ru/ux/ui\\_ux\\_who\\_does\\_what/](https://deadsign.ru/ux/ui_ux_who_does_what/). (Access date 19.02.2021).

2. Lookatme. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.lookatme.ru/mag/live/inspiration-lists/214455-testy>. (Access date 19.02.2021).

3. Uxcel. [Electronic resource]. - Access mode: <https://uxcel.com/blog/why-uxcel-now>. (Access date 19.02.2021).

# АНАЛІЗ АНОМАЛІЙ ЩІЛЬНОСТІ ПОТОКУ НЕЙТРОНІВ В СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ ПАЛИВНО-ВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

*Савельєв Максим, Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м.*

*Чорнобиль, m.saveliev@ispnpp.kiev.ua*

*Скітер Ігор, Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,*

*м. Чорнобиль, i.skiter@ispnpp.kiev.ua*

The Shelter Object's integrated automated control system aims to modernize the nuclear safety control system (SNFS) by analyzing the neutron flux density of controlled fuel masses. Analysis of the dynamics of neutron flux from controlled fuel masses shows the presence of neutron flux values that exceed the average values at different observation periods. Identification of such values by the criterion of "anomaly / non-anomaly" will allow to exclude from the array of observations uninformative events. Or, in case of non-confirmation of an anomaly, to form effective actions for decision-making on elimination of consequences of such events. To solve the problem of detecting anomalous measurements, the theory of statistical solutions is currently used. It is based on the use of parametric methods. Their use requires a priori information about the nature of the distribution of the measured process and its parameters. To effectively solve the problem of detecting and eliminating abnormal measurements, it is necessary to know the statistical characteristics of normal and abnormal noise components. In this paper, statistical criteria are proposed to assess the anomaly in the time series of neutron fluxes, which have different approaches to the formation of observation intervals, anomaly detection power and reliability.

Потік нейтронів, який спостерігається при контролі паливно-вмісних матеріалів, представляє собою динамічний ряд і є послідовністю  $y_1, y_2, \dots, y_n$  результатів вимірювань, отриманих у рівновіддалені проміжки часу  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . Постає задача контролю динамічного ряду спостережень на предмет виявлення різко відмінних за статистичними параметрами показників та їх якісна класифікація.

Математична модель результатів вимірювань може бути представленою в загальному вигляді як:

$$Y(t_k) = S(t_k) + e(t_k) + A(t_k) \quad (1)$$

де  $(t_k)$  орисна складова;  $e(t_k)$  – адитивна стохастична складова;  $A(t_k)$  – аномальна складова.

Значення адитивної стохастичної складової  $e(t_k)$  є некорельованими, мають нульове математичне сподівання і представляють собою реалізацію ергодичного випадкового процесу.

Аномальними вимірами  $A(t_k)$  будемо вважати значення послідовності результатів вимірювань, які різко відрізняються за амплітудою і статистичними властивостями на фоні основної групи значень реалізації.

Для вирішення завдання виявлення аномальних вимірювань на сьогодні використовується теорія статистичних рішень із застосуванням параметричних методів, використання яких вимагає апіорних відомостей як про характер розподілу вимірюваного процесу, так і про його параметри (математичне сподівання, дисперсію, кореляційну функцію та ряду інших). Для ефективного вирішення завдань виявлення і усунення аномальних вимірювань необхідно знати статистичні характеристики нормальних і аномальних складових шуму.

Більшість статистичних критеріїв визначення аномальних даних застосовується для умови нормального розподілу вихідних даних у вибірці. Для експоненціального розподілу потоку нейтронів, розподілів типу розподілу Пуассона чи Вейбула доцільне використання таких критеріїв:

- критерій Смоляка-Титаренко [1];
- критерій Бродського-Бицаня-Власенко [2].

Вказані критерії направлені на оцінку аномальності окремих вимірювань щільності потоку нейтронів. Для викидів, які присутні у вибірці з деякою частотою (неодиничних викидів) доцільно використовувати критерії:

- Кімбера для декількох викидів [3];
- серії викидів для розподілу Вейбула.

Для експоненційного розподілу із щільністю ймовірностей  $f(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}}$  логічно враховувати максимальні значення показників у вибірці.

**Розрахункове значення критерію Смоляка-Титаренко для  $k$ -го вимірювання у вибірці об'ємом  $n$  визначається за (2)**

$$C_k = \frac{x_{k(n)}}{\bar{x}(n)} \quad (2)$$

де  $x_{k(n)}$  – максимальне (чи «підозріле» на аномальність) значення показника у вибірці;  $\bar{x}(n)$  – середнє значення у досліджуваній вибірці.

Значення  $x_{k(n)}$  вважають аномальним, якщо виконується умова  $C_k > C_{кр}(\alpha)$ , де  $C_{кр}(\alpha)$  - критичне значення критерію для заданого рівня значущості.

**Критерій Бродського-Бицаня-Власенко** для експоненціального розподілу у формі  $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$ , де  $\lambda$  – параметр розподілу. Статистика критерію для перевірки на аномальність  $x_k$  (максимального чи «підозрілого») значення із вибірки при невідомому  $\lambda$  визначається як:

$$Z_k = \frac{x_k - x_{k-1}}{x_k - x_1} \quad (3)$$

Для перевірки аномальності показника  $x_k$  розраховують ймовірність

$$P(z \geq z_k) = (n - 1)! (1 - z_k)^{n-2} \prod_{j=1}^{n-2} \frac{1}{1+j(1-z_k)} \quad (4)$$

Якщо розрахована ймовірність більше прийнятого рівня значущості  $\alpha$  - гіпотеза про аномальність показника відхиляється.

Перевірка вибірки, в якій присутні кілька аномальних значень, проводиться за допомогою **статистики Кімбера**:

$$S_j = \frac{x_{n-j+1}}{\sum_{i=1}^{n-j+1} x_i}, \quad j = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (5)$$

Перевірка на аномальність серії викидів проводиться за наступним алгоритмом:

1. Якщо для  $S_j(\alpha)$  – критичного значення статистики – для  $i=1, 2, \dots, k$  виконується умова  $S_j < S_j(\alpha)$ , то із заданим рівнем значущості  $\alpha$  гіпотеза про те, що  $k$  максимальних чи “підозрілих» значень є аномальними – відхиляється.

2. Якщо виконується умова  $S_i > S_i(\alpha)$  для  $i=k, k-1, \dots, j-1$  и  $S_j > S_j(\alpha)$ , то із заданим рівнем значущості  $\alpha$  гіпотеза про те, що  $j$  максимальних чи “підозрілих» значень є аномальними – приймається.

3. Якщо  $S_k > S_k(\alpha)$ , то із заданим рівнем значущості  $\alpha$  гіпотеза про те, що  $k$  максимальних чи “підозрілих» значень є аномальними – приймається.

Для перевірки на аномальність показників у вибірці, яка має розподіл Пуасона чи Вейбула, використовують методи трансформації статистик [4]:

- трансформована статистика критерію Граббса [5]:

$$G = \frac{S_{n-k+1,n}^2}{S^2} \quad (6)$$

де  $S_{n-k+1,n}^2 = \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_{n-k+1,n})^2$ ;  $\bar{x}_{n-k+1,n} = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} x_i$ ;  $S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$ ;  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

При виконанні умови  $G < G(\alpha)$  приймається гіпотеза про те, що у досліджуваній вибірці існує  $k$  аномальних значень;

- трансформована статистика критерію Діксона [6]:

$$R_k = \frac{x_n - x_{n-k}}{x_n - x_k} \quad (7)$$

При виконанні умови  $R_k < R_k(\alpha)$  приймається гіпотеза про те, що у досліджуваній вибірці існує  $k$  аномальних значень.

### Список використаних джерел:

1. Смоляк С. А., Титаренко Б. П. Устойчивые методы оценивания. – М. : Статистика. 1980
2. Бродский Я. С., Быцань Н. Н., Власенко В. М. Об исключении экстремальных значений // Завод. лаб. 1975., № 7, с. 847 - 849
3. Kimber A. C. Tests for many outlier on exponential sample // JRSS/Sec C; Appl. Stat. 1982., v. 31., № 3., P. 263-271
4. Fung Karen Yuen, Paul S.R. Comparisons of outlier detection procedures in Weibull or extreme-value distributions // Commun/Stat/-Simul.Comput. 1985. v. 14. № 4. P. 895-917
5. Grubbs F.E. Simple criteria for testing Rejection of Outlying observations // AMS. 1950., v. 21., p. 27-58
6. Dixon W. J. Ratios involving extreme Values // AMS. 1956. v. 22. p. 68 - 76

# IMPACT OF THE ACCIDENT AT THE CHORNOBYL NPP ON MODERN COMPUTER GAME INDUSTRY

*Sinenko B. V., Ruban Y. V.*

**Abstract:** The impact of the accident at the Chernobyl nuclear power plant on the mass culture of the gaming industry is considered. The study uses the classic method of historical primary sources, as well as the modern method of file digging. Chronological dating of references to “Chernobyl” is carried out. As an example, there are three most recognizable and branded computer game series: “Fallout”, “S.T.A.L.K.E.R.” and “Chernobylite”. Based on the given examples, the use of the places and surroundings of the Chernobyl Exclusion Zone and the actual events during the accident at the Chernobyl nuclear power plant is described to create plots and study the game environment. And also the importance of these references to the formation of the gaming community.

**Keywords:** Chernobyl, mass culture, game industry

The accident at the Chernobyl nuclear power plant (ChNPP) can be considered one of the largest man-made disasters in the history of the twentieth century and all mankind. Radioactive materials that have been released into the environment, was equivalent in activity to 50 - 3510 tons of radium-226 and will pose a hazard for at least 265 years [1]. Many territories turned out to be unsuitable for use and living, but the negative and oppressive mental impact on people who left the resettlement zones was even greater.

This tragic event received an incredible public response. And the words “Chernobyl” and “Chernobyl Exclusion Zone” (CEZ) have become household names, personifying the worst events and their consequences.

But, on the other hand, the fame of Chernobyl and the general atmosphere of an abandoned and dangerous place led to the romanticization of this territory. In the context of the “post-apocalyptic wave” gaining momentum in the 90s and 00s, the Chernobyl disaster took a special place.

In our study of the progression of this topic in the popular culture of the gaming industry, we used the traditional method of historical primary sources. And also the modern method of file-digging, which consists of extracting and unpacking game archives to find unrealized or hidden materials and the so-called “Easter eggs”. This helped to reconstruct the chronological sequence of events and facts.

One of the first to raise the topic of the Chernobyl disaster were game developers from “Black Isle Studios”, USA. In their PC game “Fallout 2”, performed in the style of retro-futuristic atomic post-apocalypse, they added a secondary quest related to stabilizing the damaged Gecko's NPP. If successful, it was possible to repair the reactor, that polluted the underground waters of the game region. The failure was fraught with an explosion of the reactor and contamination of the surrounding areas with radionuclides. Avoiding indirect references to the situation with the Chernobyl nuclear power plant, it is worth noting that the game file for the location “Gecko's NPP” was called “uh\_oh\_chernobl” [2].

The second and most global coverage of the Chernobyl accident was the game series “S.T.A.L.K.E.R.” from the Ukrainian studio “GSC Game World”. Their vision of the CEZ, through the prism of the story "Roadside Picnic" by the Strugatsky brothers, created a kind of world filled with deadly anomalies that arose

as a result of the second Chernobyl disaster. The main advantage of the game, both from a scientific and a cognitive point of view, is a fairly detailed reconstruction of places and attractions of the CEZ [3].

Also, the project itself and the developer studio contribute to the popularization of the Chernobyl theme. Officially, in this setting, three storybooks have been released, dedicated to each of the games in the series. But unofficially, at the beginning of 2021, the bibliography of the “S.T.A.L.K.E.R.” project has 317 published books, which may well be considered one of the world records.

The third and one of the newest projects is the game “Chernobylite” from the Polish studio “The Farm 51”. It tells the story of the disaster at the Chernobyl nuclear power plant, during which the technogenic mineral “Chernobylite” was created, which made it possible to distort space-time. In reality, chernobylite is called a lava-like substance, consisting of the materials of the ChNPP 4th power unit reactor [5]. It belongs to technogenic minerals and consists of crystalline zirconium silicate with a high uranium content.

The main advantage of the game is its geographic authenticity, as the location made using the technology of digitization of the surrounding area, directly in CEZ. Thus, parts of the “Kopachi” village, the “Duga” radar station, and the Pripyat river port were transferred to the game.

These aren't all examples, the precondition for the emergence of which was the Chernobyl disaster. But the most striking and relevant today.

Thus, this sad, in every sense, event gave impetus to bold innovative solutions and creativity of many people. The events that took place in 1986 don't allow us to forget about safety and the one-man mistake cost. At the same time, a creative rethinking of these events doesn't let the interest in them fade away.

The final result of the study was the restoration of the chronology of the appearance of allusions to Chernobyl in culturally significant computer games. And also, determining the level of evidence and significance of references to the formation and development of the culture of the gaming community.

#### **Список використаних джерел:**

1. Radio-ecological monitoring of forests in the context of a large nuclear accident / D. A. Vishnevsky, N.E. Zarubina, O. I. Zarubin. — Kyiv, 2015. — 114 p.
2. Black Isle Studios. Fallout 2 : A Post Nuclear Role Playing Game / Irvine (California, US): Interplay Productions, 1998.
3. Степанцев К. Натуральный S.T.A.L.K.E.R. Как игровые локации отличаются от реальных [Электронный ресурс] / К. Степанцев // Игромания. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: [https://www.igromania.ru/article/30175/Naturalnyy\\_S.T.A.L.K.E.R.\\_Kak\\_igrovye\\_lokacii\\_otlichayutsya\\_ot\\_realnyh.html](https://www.igromania.ru/article/30175/Naturalnyy_S.T.A.L.K.E.R._Kak_igrovye_lokacii_otlichayutsya_ot_realnyh.html).
4. Ding, H., Dixon Wilkins, M. C., Gausse, C., та ін. Safely probing the chemistry of Chernobyl nuclear fuel using micro-focus X-ray analysis. Journal of Materials Chemistry A. 2021. No. February. С. 1 – 11.

#### **Інформація про авторів:**

**Sinenko B.V.** – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine;

*e-mail: bogdan.sinenko@gmail.com*

**Ruban Y.V.** – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

## ДОСЛІДЖЕННЯ КУЛЬТУР МІКРООРГАНІЗМІВ, ЩО ЗНДАТНІ РОЗЧИНЯТИ ВІДПРАЦЬОВАНЕ ЯДЕРНЕ ПАЛИВО

Смірнова Г. Ф., Петелін Г. І., Сербінович В. В., Рибалка В. Б.  
ВНТПО НТЦ НАЕК «Енергоатом»  
rybalka\_valery@email.ua

Можливість використання мікроорганізмів для розчинення відпрацьованого ядерного палива у м'яких умовах представляє інтерес як з точки зору перебіжки палива, так и переробки паливовмістних відходів.

З субстрату (вода об'єкту «Укриття», пом. 012/16) виділяли мікроорганізми за класичними мікробіологічними методиками на 12 видів поживних середовищ. Очистку культур проводили пересівом на тих самих середовищах. Одночасно фотографували поверхні частинок ядерного палива за допомогою електронного мікроскопу РЕМ-100. Вносили частинки в стерильні поліпропіленові пробірки, додавали 1 мл відповідного поживного середовища та проводили посів попередньо виділеної чистої культури. Термостатували пробірки при +20°C у свинцевому сейфі та періодично відбирали стерильними піпетками зразки палива на дослідження.

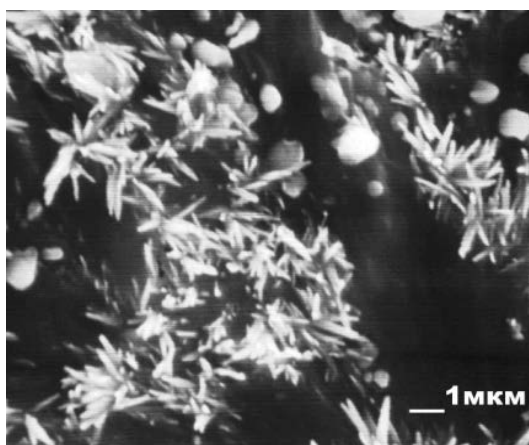


Рисунок 1. Вигляд мікроорганізмів та їх метаболітів у зразках води об'єкту «Укриття»

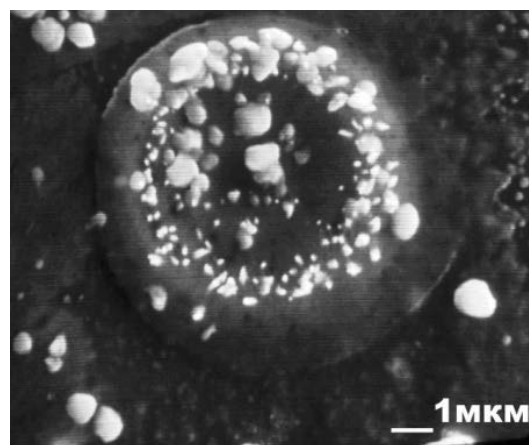


Рисунок 2 Вигляд мікроорганізмів та їх метаболітів у зразках води об'єкту «Укриття»

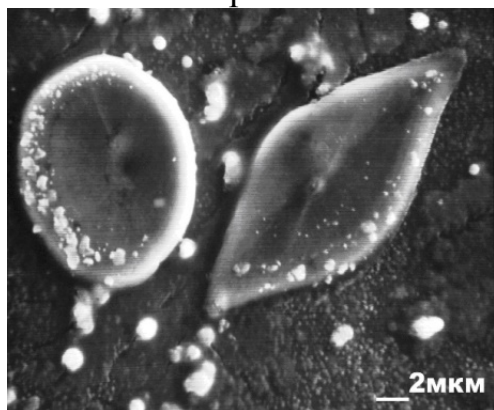


Рисунок 3 Вигляд мікроорганізмів та їх метаболітів у зразках води об'єкту «Укриття»

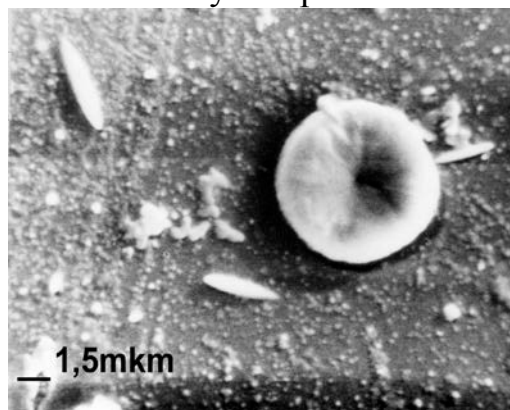


Рисунок 4 Вигляд мікроорганізмів та їх метаболітів у зразках води об'єкту «Укриття»

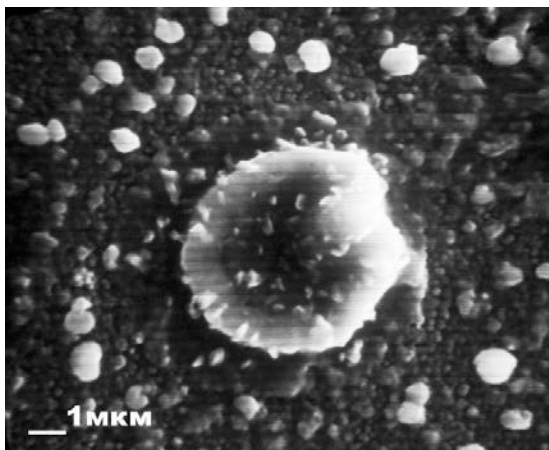


Рисунок 5 Вигляд мікроорганізмів та їх метаболітів у воді об'єкту «Укриття»

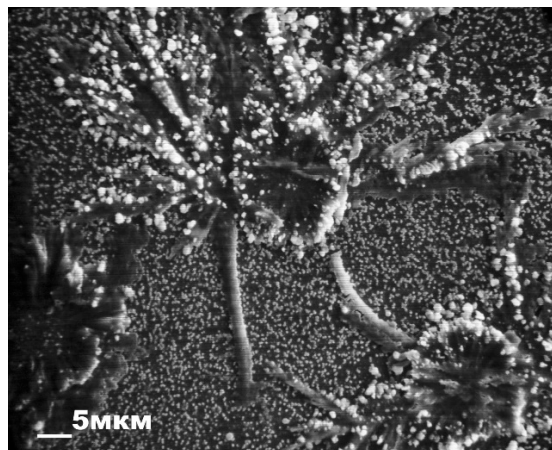


Рисунок 6 Вигляд мікроорганізмів та їх метаболітів у воді об'єкту «Укриття»

Життєдіяльність частини культур багатьох груп харчування призводила не тільки до розчинення частинок ядерного палива, але й до утворення відкладень на його поверхні. Проте значна доля виділених штамів (таблиця 1) розчиняла паливо. Час розчинення паливних частинок на елективних поживних середовищах складав від 30 до 90 діб після проходження лаг фази. Типовий вигляд процесу розчинення приведено на рисунках 9-12. Кількість культур, що показали здатність повністю розчинити ядерне паливо приведена в таблиці 1.

Таблиця 1. Виділення та ідентифікація культур мікроорганізмів за групами харчування, які здійснюють деструкцію опроміненого ядерного палива.

№	Групи мікроорганізмів, що здатні розчиняти відпрацьоване ядерне паливо	Кількість культур, що демонструють здатність до розчинення відпрацьованого ядерного палива (% від загальної кількості виділених)
1	Гетеротрофных аэробных	28
2	Гетеротрофных анаэробных	93
3	Аммонифицирующие	34
4	Денитрифицирующие	19
5	Споровые аэробные	25
6	Споровые анаэробные	64
7	Протеолитические	67
8	Сульфатредуцирующие	69
9	Целлюлозоразрушающие	15
10	Актиномицеты	91
11	Железоокисляющие	18
12	Тионовые	91



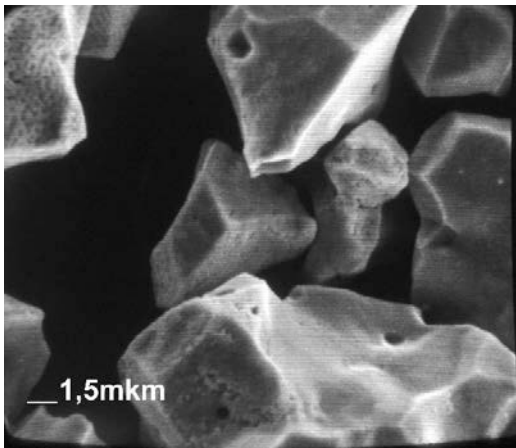


Рисунок 5 Типовий вигляд поверхні частинок ядерного палива, взятого для дослідження, до впливу мікроорганізмів.

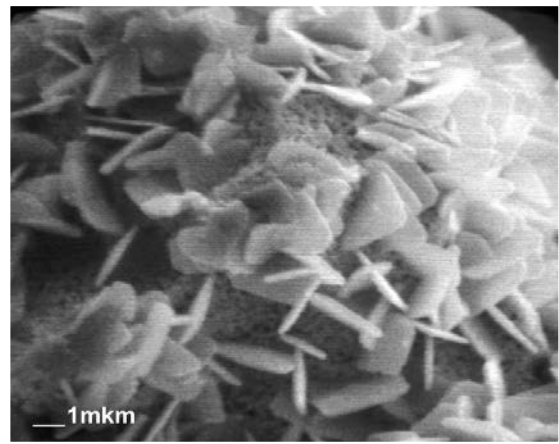


Рисунок 6 Вигляд поверхні частинок ядерного палива з відкладеннями, що утворилися внаслідок життєдіяльності мікроорганізмів.

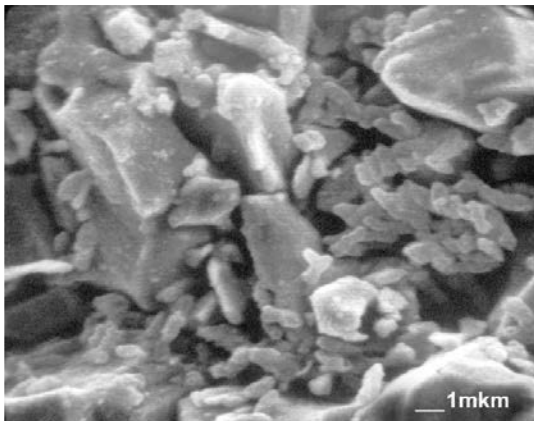


Рисунок 7 Вигляд поверхні частинок ядерного палива з відкладеннями, що утворилися внаслідок життєдіяльності мікроорганізмів.

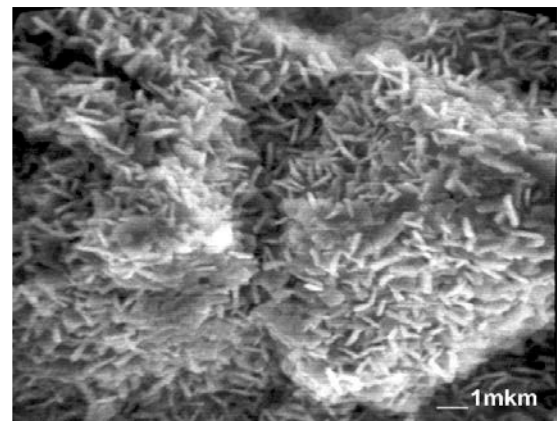


Рисунок 8 Вигляд поверхні частинок ядерного палива з відкладеннями, що утворилися внаслідок життєдіяльності мікроорганізмів.



Рисунок 9. Мікробна активність спостерігається поблизу частинок ядерного палива.

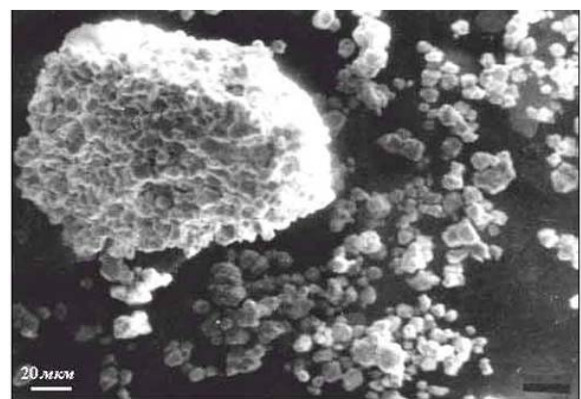


Рисунок 10. Етап розчинення ядерного палива – частинка розсіпається на складові кристаліти

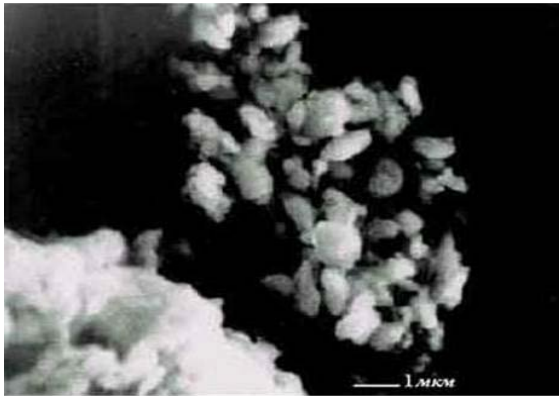


Рисунок 11. Етап розчинення ядерного палива – кристаліти ядерного палива дрібнішають під впливом мікробних метаболітів.

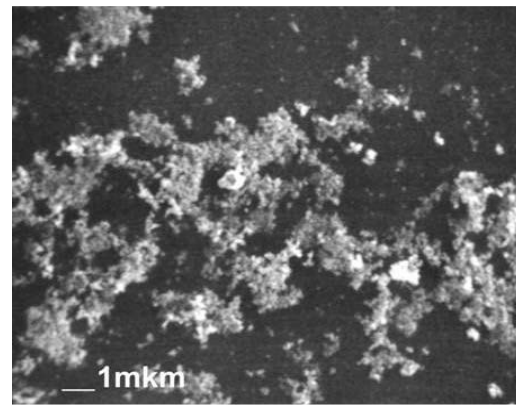


Рисунок 12. Завершальний етап: повне розчинення. Ядерне паливо повністю переходить у вигляд комплексних сполук з мікробними метаболітами.

Проведено скрінінг властивостей сполук, що утворюються за допомогою гель хроматографії та авторадіографії. Результати представлені в таблиці 113. В результаті мікробної корозії ОЯТ образуються комплексные соединения р/н, 97-98% которых связано органическим веществом. Хроматографію проводили впродовж 5 діб. Вміст по Cs-137 та Sr-90 в біомасі досягає  $10E+8$  Бк/г.

Таблиця 2. Скрінінг хроматографічних властивостей форм сполук радіонуклідів, що утворюються при розчиненні біотичної деструкції ядерного палива.

№ п/п	Шифр мікроорганізма	Розподіл β- активність по п'ятнах авторадіограми, %				
		Зона акріламідного гелю (лінія старту)	Зона гелю з епосигрупами	Зона гелю з амінокарбоксильними групами	Зона акріламідного гелю (зона випаровування рухливої фази)	Всього
1	BS-09	35	41	23	<1	100
2	BS-15	50	37	11	2	100
3	VIN-07	63	25	9	3	100
4	POST-05	31	47	21	1	100
5	GET-11	19	56	22	3	100
6	R2A-03	29	21	47	3	100

### Висновки

В рідких радіоактивних відходах об'єкту «Укриття» виявлена велика форма мікроорганізмів, що здатні розчиняти ядерне паливо. В окремих харчових групах це здатні робити 90% виділених культур. Вміст по Cs-137 та Sr-90 в біомасі досягає  $10E+8$  Бк/г. Отримані дані свідчать про можливість використання штамів для переробки відпрацьованого ядерного палива у «м'яких» умовах при відсутності виділення оксидів азоту і проблем очистки (кондиціонування) сильноокислих розчинів перед подальшою іммобілізацією радіонуклідів.

## ОБСТЕЖЕННЯ ОПРОМІНЕНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ЗА ДОПОМОГОЮ СТЕНДУ ІНСПЕКЦІЇ І РЕМОНТУ ПАЛИВА (СІРП)

*Юрій Соловійов, начальник інженерного центру  
ВП «Атомремонтсервіс» ДП «НАЕК «Енергоатом»  
м. Славутич  
solovyov@ars.atom.gov.ua*

**Анотація** ДП «НАЕК «Енергоатом» являється одним з учасників реалізації «Меморандума о совместных действиях для достижения нулевого уровня отказа ядерного топлива» від 21.07.2014 № 4/3659-Д.

Одним з основних джерел інформації про фактичний стан палива в процесі його експлуатації в активній зоні реактора являється контроль опроміненого палива за допомогою інспекційних стендів. Раніше традиційно післяреакторні дослідження проводилися виключно в умовах «гарячих камер». Дані дослідження мають високу вартість і тому роблять актуальним питання використання на АЕС стендів інспекції. Напрямок використання інспекційних стендів розвивається. На сьогодні використовуються як мобільні стенди так і стаціонарні, розроблені під умови конкретного блоку.

Презентація висвітлює питання обстеження ядерного палива, яке експлуатується на енергоблоках України в контексті пріоритетності безпеки АЕС. Ядерне паливо в Україні інспектується сертифікованим компанією «Westinghouse» персоналом ВП «Атомремонтсервіс» ДП «НАЕК «Енергоатом» за допомогою стенду інспекції і ремонту палива, який дозволяє безпечно виконувати контрольні операції.

Наведена інформація щодо обладнання, яке використовується під час інспекції тепловиділяючих збірок, описаний його первісний функціонал та функціонал, який було набуто внаслідок впровадження удосконалень.

Презентація завершується висновками щодо необхідності виконання обстеження для підвищення безпеки експлуатації палива.

### INSPECTION OF IRRADIATED NUCLEAR FUEL WITH THE USE OF THE FUEL INSPECTION AND REPAIR EQUIPMENT (FIRE) WORKSTATION

The State-owned Enterprise “National Nuclear Energy Generating Company “ENERGOATOM” is one of the signatories participating in implementation of the “Memorandum on Joint Actions to Achieve a Zero Failure Rate of Nuclear Fuel”, dated 21 July 2014, Reference # 4/3659-D.

**Annotation:** One of the main sources of information on the actual condition of nuclear fuel in the process of operation in the reactor core is the performance of fuel inspections through the use of inspection workstations. In the past all traditional post-irradiation examinations of nuclear fuel were carried out under the conditions of “hot cell” facilities only. These examinations are expensive to

conduct, thus bringing forward the issue of using inspection workstations at NPPs. The trend of using inspection workstations for these purposes is picking up momentum. At present, both mobile and stationary workstations customized to suit the needs of a particular power unit are in use.

The presentation highlights the issue of inspection of nuclear fuel used in reactors of the Ukrainian power units with the focus on prioritizing the safety of NPPs. In Ukraine nuclear fuel is inspected with the use of the Fuel Inspection and Repair Equipment (FIRE) Workstation, which allows performing all the required inspection operations safely by the staff of the SD ARS, who have been certified by Westinghouse.

The presentation provides information about the equipment used for performing inspections of fuel assemblies, describes the original functions and the new functions obtained as a result of completing the upgrades.

The presentation concludes to state the need for performing inspections to enhance the safety of fuel operation.

## СЛАВУТИЧ – МІСТО-КОВОРКІНГ, ВІДКРИТЕ ДО ІННОВАЦІЙ

*Старовойтова Арина,  
директор комунального підприємства «Агентство регіонального розвитку»  
Славутицької міської ради,  
Україна, м.Славутич, starovojtova888@gmail.com*

In 2021, the city of Slavutych, Kyiv region, the youngest city in modern Ukraine, founded in 1987 for Chernobyl workers and their families, is once again fighting for its right to renewal.

The Strategic Plan for the development of the city until 2025 has been prepared. The city of Slavutych once again needs new sustainable and strategic solutions. It is time for decisions that lie in the plane of innovative technologies, creative economy and art, the needs of modern man. However, the city community is still not ready to give up the «city of nuclear energy, atomic city», but looks at «energy» from a new angle. The new energy of the city is ideas. Slavutych - a city of new ideas, people, events, investments and successfully implemented projects.

At the initial stage of implementation of the The Strategic Plan for the development of the city until 2025, Slavutych already has a number of achievements and investment advantages. Economic and social, cultural development of the community of Slavutych is a system of solidarity actions of a responsible and creative community, in which there is a place for everyone. The city is open to investors, it is a coworking city, ready to implement creative smart business ideas.

**Keywords:** coworking city, development, Slavutych, investment advantages, smart business ideas.

У 2021 році місто Славутич Київської області, наймолодше місто сучасної України, засноване у 1987 році для працівників ЧАЕС та їх сімей, вкотре виборює своє право на оновлення. Підготовлений **Стратегічний план розвитку міста до 2025 року**, де визначені наступні основні завдання:

- підвищити конкурентоспроможність економіки міста;
- підвищити якість та комфорт життя містян;
- підвищити ефективність муніципалітету та залученість громадянського суспільства.

Сьогодні Славутич потребує **нових стійких та стратегічних** рішень. На часі рішення, що лежать у площині інноваційних технологій, креативної економіки та мистецтва, потреб сучасної людини. Однак, спільнота міста й сьогодні не готова остаточно відмовитися від «*міста енергетиків*», натомість дивиться на «*енергію*» під новим кутом. «*Нова енергія міста – це ідеї. Славутич – місто нових ідей, людей, подій, інвестицій та вдало реалізованих проєктів*» [7].

Свого часу головним глобалізаційним викликом стійкості міста стали вимоги міжнародної спільноти щодо закриття ЧАЕС і відповідні зобов'язання, які взяла на себе Україна. Із закриттям ЧАЕС у 2000 році та з припиненням централізованого цільового фінансування, Славутич зіткнувся з



низкою соціальних та економічних проблем. Головними групами викликів для Славутича й сьогодні залишаються: закриття ЧАЕС і скорочення фінансування заходів; низький рівень диверсифікації економіки та нестача робочих місць для висококваліфікованих фахівців; тенденції старіння населення і зміна соціального складу населення, пов'язана з відтоком молоді і висококваліфікованих кадрів; територіальна відірваність міста від області; зношення міської інфраструктури і житлово-комунального господарства міста; повільне впровадження ринкових механізмів [1].



Фото 1. Місто Славутич Київської області. Автор – Григорій Веприк, The Gate Agency

У 2000 році почалось активне формування механізмів змін та адаптації міста до нових умов, що триває вже більше двадцяти років. Ключовим документом, де зафіксовано ці зміни, у той час став Стратегічний план соціально-економічного розвитку м. Славутича до 2020 р [1]. Чинником диверсифікації економіки міста мала стати Спеціальна економічна зона Славутич [1]. За період 1999-2002 рр. суттєво зросла кількість промислових підприємств, було створено ОВ «Абріс», «Датекс Папір», «Кронпак», «Гобелен», ЗАТ «Перспектива» тощо, почала функціонувати міжнародна радіоекологічна лабораторія, ВП НАЕК Енергоатом «Атомремонтсервіс», громадські організації, Міжнародний центр розвитку бізнесу та інші структури [1]. В той же час, у міста залишалась можливість збереження основного виробничого напрямку (атомної енергетики) в рамках виконання міжнародних проектів щодо вирішення проблем об'єкту «Укриття», пізніше було створено СП «Новарка», також місто отримувало фінансування по програмах TACIS, UNESCO, AMP [1].

Ці заходи дещо загальмували системні трансформації, а після відміни податкових пільг СЕЗ «Славутич» ділова активність в місті дещо знизилась і частина підприємств закрилась. Можна сказати, що місто пододало перший етап адаптації до викликів конкурентного середовища, зберігши свій основний профіль та доповнивши комплекс міста об'єктами інфраструктури, новими потужностями та набувши досвід роботи з міжнародними організаціями [1]. На тому етапі в місто залучено близько 45 мільйонів доларів для реалізації орієнтовно 45 проєктів за напрямками: усунення наслідків Чорнобильської аварії, бізнес-інкубування, розвиток туризму, протидія корупції, інформаційні технології, державно-приватне партнерство, інфраструктурні проєкти, енергоефективність.

На сучасному етапі Славутич стикнувся із викликами, що пов'язані з завершенням терміну фінансування міжнародних проєктів і новою хвилею скорочення робочих місць на ЧАЕС, а також політичною і соціально-економічною кризою в Україні. Завершено дію Стратегічного плану соціально-економічного розвитку м. Славутича до 2020 року. Розпочинається новий, зухвалий і непередбачуваний, етап, коли Славутич залишається майже сам на сам з вищевказаними викликами, коли лише згуртованість громади та злагодженість, консолідованість дій **бізнесу, влади та місцевої громади** може принести конструктивний практичний результат у розвитку міста.



Фото 2. Новий безпечний конфаймент «Арка» ДСП ЧАЕС. Автор – Дмитрій Корчак, ДСП ЧАЕС

Для з'ясування бачення майбутнього міста нами були проведені дослідження громадської думки. Так, в рамках запланованих заходів з розробки Стратегії розвитку міста Славутича-2025 проведено дослідження «Вивчення згуртованості громади міста Славутича». Загальна кількість респондентів – 240,

з них жінок 150 (62,5%), чоловіків – 90 (37,5%). Вік респондентів: до 18 років – 8 осіб (3,3%), 18-25 років – 14 осіб (5,8%), 26-38 років – 85 осіб (35,4%), 39-50 – 74 особи (30,8%), 51-65 – 52 особи (21,7%), 65 і старше – 7 осіб (2,9%). Форма оприлюднення анкети – гугл-форма, друковані бланки, телефонне опитування. Анкета була поширена 500 потенційним респондентам.

Так, за результатами анкетування 40%, респондентів задоволені, а 18,8% дуже задоволені тим, що проживають саме у Славутичі. 47,9% планують й надалі жити і працювати у Славутичі, однак 12% планують переїхати до іншої місцевості у найближчі 3-5 років, 15% – планують переїхати до іншої місцевості, коли завершиться термін їх роботи або навчання їх дітей у місті, а 8,8% – планують жити в Славутичі, але працювати в іншому місті. З оптимізмом та надією дивляться у майбутнє міста 52,9% респондентів, натомість з тривогою та невпевненістю – 34,2%.

Загалом 87,5% респондентів цікавляться тим, що відбувається в місті, а 86,6% відчують себе важливою частиною славутицької громади.

82,9 % відмічають, що влада міста інформує громаду про свою діяльність, а 53,3 % зазначили, що мають реальний вплив на важливі рішення, що приймаються органом місцевого самоврядування, натомість 15% зазначили, що взагалі не мають впливу, а 27,5% скоріше не мають впливу на рішення міської влади. Причому респонденти зазначають, що влада міста в цілому сприяє громадській активності та підтримує ініціативи (48,3%), однак 24,6% вважають, що влада не проявляє зацікавлення ідеями та ініціативами мешканців. 57,9% опитаних вважають, що влада, бізнес і громадськість співпрацюють на користь розвитку міста, 42,1 % зазначили, що так не вважають.

Опитування показало також рівень активності громадян у житті міста. Так, 68,7% беруть участь у публічних заходах, святах, спільних ініціативах мешканців, однак 21,3% вказали, що зазвичай ніхто з членів сім'ї не бере активної участі у житті міста. На думку містян у відносинах між людьми у Славутичі переважають недовіра, обережність та приватний інтерес (60%), почуття солідарності та турбота про загальне благо (17,5%). Загалом задоволені рівнем взаємодії всередині міста Славутича 47,9% респондентів, натомість 45% – скоріше не задоволені, 7,1% – зовсім не задоволені. 77,9% оцінюють містя загального користування у місті як безпечні, а 67,5% оцінюють Славутич як добре місце для проживання.

За можливості множинного вибору респонденти визначили наступні вектори розвитку для Славутича:

- розвиток освіти, науки і ІТ-технологій (61,3%);
- розвиток сфери медицини (санаторне лікування, паліативна допомога тощо) (58,8%);
- розвиток туристичної Дестинації «Славутич – Чорнобиль – Чернігівський регіон» (44,2%);
- розвиток сфери спорту (спорт високих досягнень, параспорт, спортивні змагання) (43,3%);
- розвиток та/або збереження архітектурної ідеї міста як унікальної в Україні (30,8%);



- розвиток сфери зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики (39,6%);
- розвиток в місті енергоефективних та енергоощадних технологій (33,8%);
- розвиток сфери культури (події для різних цільових аудиторій) (27,5%);
- розвиток системи підтримки та преференцій для бізнесу (27,1%).

Серед слабких сторін Славутича респонденти визначили недостатню інвестиційну привабливість з причини не вигідного логістичного розташування (62,8%), відсутність у місті закладу вищої або професійно-технічної освіти (41,4 %), пасивну, інертну, консервативну громаду міста, яка не готова до впровадження підприємницьких ініціатив (36,8 %), відсутність кваліфікованих та низько кваліфікованих робочих місць (32,6 %), нестачу кваліфікованого та низько кваліфікованого персоналу (особливо молоді) (28,9%), неготовність місцевої влади до впровадження проєктів розвитку (23%), недосконалу міську інфраструктуру (дороги, об'єкти соціальної інфраструктури потребують ремонту тощо) (16,3 %), близькість Славутича до Чорнобиля та ЧАЕС (4,2%).

Найбільш сильними конкурентними перевагами Славутича містяни вважають:

- екологічне, пішохідне, компактне місто, комфортне для проживання (76,6%);
- близькість Славутича до Чорнобиля та ЧАЕС, можливість розвитку чорнобильського туризму (34,9%);
- наявність достатньої бази для розвитку медичних та інших супутніх до медицини послуг (28,1%);
- розвинена мережа об'єктів соціальної інфраструктури (22,1%);
- близькість до кордону з обласними центрами України (Київ та Чернігів) та співпраця з сусідніми громадами (20,9%);
- високий рівень життя та купівельної спроможності населення (17%);
- наявність висококваліфікованих фахівців в промисловій сфері, людські ресурси (17%);
- відкритість місцевої влади у впровадженні проєктів розвитку (13,6%);
- підприємлива, активна громада міста, відкрита до нових проєктів та готова до впровадження ініціатив (9,8%);
- наявність потужної освітньої та наукової матеріально-технічної бази (9,4%).

Робочою групою з розробки Стратегії розвитку міста Славутича – 2025 проведені стратегічні сесії для SWOT – аналізу розвитку міста. Долучилися до роботи працівники виконавчого комітету та структурних підрозділів Славутицької міської ради, представники основних підприємств та установ міста, підприємці та громадські активісти міста. Розробка SWOT-аналізу допомогла визначити якісні параметри місцевого розвитку, здійснити систематизацію факторів, працювати над варіантами стратегій. Варіанти сценаріїв розвитку міста були також презентовані на засіданнях Громадської ради при виконавчому комітеті, зібраннях для громадських об'єднань,

засіданні Молодіжної ради «Майбутнє Славутича». На основі зібраних даних був узагальнений SWOT-аналіз Славутича, а також обґрунтований стратегічний вибір (інерційний, модернізаційний сценарії). Бачення міста: «Славутич – місто нових ідей, що пропонує сприятливі умови для їх генерації та впровадження. Ми - молоде інноваційне українське місто, комфортне для проживання, турботливе до людини, сприятливе для легкого започаткування й ведення бізнесу, активно до впровадження креативних ідей та сучасних технологій, з конкурентоспроможною економікою зростання» [7].



Фото 3. Єреванський квартал міста Славутича Київської області. Автор – Григорій Веприк, The Gate Agency

За кожним напрямом була визначена основна проблематика, від якої визначалися цілі та завдання. По кожному напрямку передбачений інтегральний показник, який узагальнює результати роботи по кожному з напрямків [7].

**I. Стратегічна ціль 1 – Підвищити конкурентоспроможність економіки міста.** Має три напрямки:

- Напрямок 1. Умови ведення бізнесу, де інтегральними показниками є рівень зростання МСП та обсягів реалізованої ними продукції, рівень інвестиційної привабливості

- Напрямок 2. Розвиток культури та туризму як складових економіки, де інтегральними показниками є рівень розвитку індустрії гостинності та рівень розвитку культурних та туристичних продуктів.

- Напрямок 3. Розвиток ІТ та енергетики як складових економіки, де інтегральними показниками є рівень розвитку ІТ та енергетики та рівень участі в енергетичній галузі України та світу

## **II. Стратегічна ціль 2 - Підвищити якість та комфорт життя містян.**

Має вісім напрямків:

- Напрямок 4. Освіта, де інтегральним показником є рівень задоволеності якістю освіти.

- Напрямок 5. Здоров'я, де інтегральними показниками є рівень довіри та задоволеності послугами медицини місцевих жителів та рівень здоров'я населення.

- Напрямок 6. Культура, де інтегральним показником є рівень залученості жителів міста до подій у галузі культури.

- Напрямок 7. Соціальний захист, інтегральним показником є рівень забезпечення соціального захисту населення.

- Напрямок 8. Якісні житлово-комунальні послуги, де інтегральним показником є рівень якості житлово-комунальних послуг.

- Напрямок 9. Безпека, де інтегральним показником є рівень безпеки населення.

- Напрямок 10. Екологія, де інтегральним показником є рівень стану довкілля.

- Напрямок 11. Безбар'єрність, де інтегральним показником є рівень фізичної, інформаційної забезпеченості та послуг.

## **III. Стратегічна ціль 3 - Підвищити ефективність муніципалітету та залученість громади.** Має три напрямки:

- Напрямок 12. Прозорість та комунікації, де інтегральним показником є рівень якості зовнішніх та внутрішніх комунікацій міста.

- Напрямок 13. Ефективний менеджмент команди міста, де інтегральним показником є рівень ефективності команди міста.

- Напрямок 14. Залучення громадськості, де інтегральним показником є рівень залучення громади в прийнятті рішень та проявленні ініціатив.

Слід підкреслити, що у 2021 році, на початковому етапі реалізації «Стратегії розвитку міста Славутича – 2025», Славутич вже **має низку досягнень та інвестиційних переваг**. Економічний та соціальний, культурний розвиток громади Славутича – це система солідарних дій відповідальної та креативної спільноти, у якій є місце для кожного. Місто відкрите для інвесторів, це **місто-коворкінг**, готове втілювати креативні smart бізнес-ідеї.

Так, наймолодше, але амбітне, українське місто у 2020 році отримало статус **Малої культурної столиці України – 2021** від Українського культурного фонду, а отже підтвердило свій рух до прагнення стати всеукраїнською та європейською платформою для реалізації сміливих ініціатив у культурній сфері. Маємо для цього не лише амбіції, а й реалізовані проекти, потужну команду, розвинену інфраструктуру та гостинну громаду.

У Славутича наявні: діючі угоди про співпрацю з 8 іншими містами і громадами, в тому числі міжнародні, запроваджені програми «Відкрите місто», «Розумне місто»; «Безпечне місто», «Громадський Бюджет участі», «Залучення інвестицій» [4], інвестиційний паспорт та інвестиційний веб-портал міста [investslavutyche.org.in.ua](http://investslavutyche.org.in.ua) [3], енергоменеджмент та енергомоніторинг. Місто працює за ініціативами ЄС «Угода мерів», «Мери за економічне зростання», впроваджуються План дій сталого енергетичного розвитку та План місцевого економічного розвитку.

Сьогодні у місті працюють більше 2000 суб'єктів підприємницької діяльності. Основні галузі економіки міста: ядерна енергетика (зняття з експлуатації, управління РАВ та ВЯП), легка промисловість (пошиття одягу, текстилю, гобеленове виробництво), будівництво житлових та нежитлових приміщень, виробництво електричного устаткування, паперове виробництво та виготовлення канцелярії, виробництво медичної техніки та фотоматеріалів, діяльність у сфері інжинірингу, геології та геодезії, виробництво миючого обладнання. Зайнятість по секторах – промисловість (16%), торгівля (10%), послуги (28%), будівництво (18%), інше (28%). До основної виробничої інфраструктури входять: ДСП ЧАЕС, ВП НАЕК Енергоатом «Атомремонтсервіс», ТОВ «ДІОРО», ТОВ ВКФ «Промкомплект», ПП ТВФ «Влад», ТОВ «Компанія «ВІТАВА», ПП «Фірма «Оніко», ТОВ «Політара», ТОВ «Буденергомонтаж», ТОВ «Індустріальне миюче обладнання», ТОВ «Українські базальтові технології». Загальний обсяг прямих іноземних інвестицій за 2020 рік склав 7,4 млн. доларів США, темп зростання обсягу прямих іноземних інвестицій становив 101,4%. Прямі іноземні інвестиції з розрахунку на 1 особу складають 296,5 доларів США. В місті працює дві структури підтримки бізнесу та інвестицій – КП «Агентство регіонального розвитку» Славутицької міської ради та Славутицький міський фонд підтримки підприємництва.

У 2021 році у Славутичі відкритий Перший в Україні муніципальний інноваційний індустріальний Бізнес-парк «Славутич»: площа будівлі 1 570,2 м<sup>2</sup>, виробничих приміщень 10, офісних – 10. Керуючою компанією бізнес-парку є КП «Агентство регіонального розвитку» [7], яке пропонує повний спектр послуг для відкриття та ведення бізнесу, надає постійний інвестиційний супровід діяльності [3]. Для ведення підприємницької діяльності в місті достатньо корисних площ, наявні земельні ділянки та будівлі індустріального використання, придатні для оренди, купівлі або договорів концесії. Вартість оренди за 1 м<sup>2</sup> (від 3,77 грн до 55 грн. станом на 01.04.2021 р.) є конкурентною в регіоні.



Фото 4. Перший муніципальний індустріальний Бізнес-парк «Славутич»



Славутич поступово стає освітнім хабом та нетворкінг платформою для фахівців зі зняття з експлуатації ядерних енергетичних установок. Тут відкрито перші в Україні курси дуальної освіти за програмою навчання «Зняття з експлуатації ядерних енергетичних установок», проводиться унікальна в Україні подія для фахівців атомної енергетики – Міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища» INUDECО [2], на полях якої також проводиться хакатон «Місто – нових ідей» для молодих науковців та програмістів.

Сьогодні в місті працюють 4 ІТ-компанії, в центрі міста та у більшості громадських будівель є вільний WI-FI, впроваджені 7 програмних продуктів в управлінні містом. ЦНАП надає 281 послугу, у т.ч. 34 електронні муніципальні послуги веб-платформи електронних послуг «Єдине вікно» для суб'єктів бізнесу.

Спільна успішна практика створення муніципального енергокооперативу «Сонячне місто» у Славутичі для будівництва сонячної електростанції шляхом спільнокошту місцевих мешканців отримала диплом І ступеня конкурсу Мінрегіону «Кращі практики місцевого самоврядування 2020» у номінації «Формування безпечного, комфортного та привабливого життєвого середовища» [8].

Славутич – невід'ємна частина туристичного магніту за маршрутом до Чорнобильської Зони Відчуження [2]. Нині 25 турсоператорів працює в Чорнобильському туризмі. У 2020 році в місті відкритий туристично-інформаційний центр, є готель, три хостели, 13 ресторанів та кафе, 5 мережевих супермаркетів. Серед основних завдань економічного розвитку міста сьогодні є розвиток діяльності туристичної Дестинації «Славутич – Чорнобиль – Чернігівський регіон» [5].

Славутич – затишне планове еко-місто, зі зручною для життя архітектурою та інфраструктурою. Тут чисте повітря та високий рівень благоустрою, відсутній громадський транспорт, але всюди пішохідна доступність, наявна міська мережа велодоріжок. Рівень безпеки життя, якість повітря та озеленення значно кращий ніж середній показник в Україні, радіаційний фон міста та прилеглої території знаходиться під постійним контролем та не перевищує затверджених норм (радіаційний фон - 130 нЗв/год) Питна вода у Славутичі одна із найкращих по якості в Україні, підіймається зі свердловин глибиною 235м. Проєкт «Славутич – міжрегіональна велорекреація для оздоровлення та відпочинку» Славутицької міської ради став одним з переможців конкурсного відбору проєктів регіонального розвитку, які можуть реалізовуватися за рахунок коштів державного бюджету, отриманих від ЄС у 2021 році, головним розпорядником цих коштів є Мінрегіон.

Славутич є лідером рейтингу інституційної спроможності і сталого розвитку малих та середніх громад України з населенням до 150 тисяч. З 2021 року місто є лабораторією безбар'єрних рішень в рамках ініціативи Першої Леді «Без Бар'єрів». До 2027 року місто прагне стати першим в Україні малим безбар'єрним містом.

Місто пишається плідною співпрацею з багатьма державними та громадськими інституціями України та зарубіжними партнерами, а міська влада відкрита до нових спільних проєктів. Безпосередньо у Славутичі ми успішно організуємо та співпрацюємо в рамках різноматичних проєктів (інфраструктурні та енергоефективні, соціальні, молодіжні та культурні проєкти, навчальні візити, конференції тощо), де учасниками та бенефіціарами ставали муніципалітети, представники громадянського суспільства, науковці та студенти тощо з різних країн світу, які досліджували міські практики, простір, екологію та економіку, програмні продукти в управлінні містом та енергоменеджмент тощо. Найчастіше подібні події супроводжувалася публічною програмою для місцевих мешканців за участю відомих вчених, письменників, громадських діячів та музичних зірок з різних країн світу. У 2020 році муніципалітетом вперше запроваджено почесне звання «Амбасадор Славутича». Таке звання отримуватимуть люди, які опікуються брендом «Славутич», просувають його та розділяють з нами його філософію та бренд-меседж «Славутич – місто нових ідей, подій, людей, місто, яке перевинаходить себе, відроджується та є стійким до викликів». Одним з найважливіших результатів такого партнерства з амбасадорами ми вважаємо привернення уваги не тільки української, а й міжнародної спільноти до Славутича, збільшення туристичного потоку та зацікавлення інвесторів.

Славутицька громада, маючи достатній досвід з реалізації та фасилітації проєктів міжнародного рівня, прагне подальшого розвитку та готова реалізовувати конкретні дії для використання інвестиційного потенціалу виробничих, соціальних, культурних та креативних індустрій міста. Місто пост-катастрофи в процесі трансформації у місто соціального оптимізму, місто-першопрохідця децентралізації і сталих міських реформ в Україні. Славутич – місто-коворкінг, відкрите до інновацій.

#### **Список використаних джерел:**

1. Brunn, S. D., Dronova, O., & Kononenko, O. (2020). Slavutych atomograd as the last ideal city of the USSR: Challenges and adaptation mechanisms of resilience. *GeoJournal*, 1-17. [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: <https://rdcu.be/b4H2U/>. – 30.03.2021. – Назва з екрану.
2. Веб-сайт Міжнародної конференції «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища» INUDECО у м. Славутичі (Україна) [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: <https://inudeco.pro/> – 30.03.2021. – Назва з екрану.
3. Веб-сайт Туристично-інформаційного центру міста Славутича «Відвідайте Славутич» [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: <http://visitslavutych.com/>. – 30.03.2021. – Назва з екрану.
4. Інвестиційний портал «Славутич-Чернігівський регіон» [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: <https://investslavutych.arr.in.ua/>. – 30.03.2021. – Назва з екрану.
5. Програма залучення інвестицій в економіку Славутицького регіону на 2021 рік, затверджена рішенням сесії Славутицької міської ради від 24.12.2020 № 60-1-

VIII [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: [http://deputat.slav.gov.ua/\\_layouts/public/Decisions.aspx](http://deputat.slav.gov.ua/_layouts/public/Decisions.aspx). – 30.03.2021. – Назва з екрану.

6. Програма розвитку муніципального туризму Славутицького регіону на 2020 рік, затверджена рішенням Славутицької міської ради 23.12.2019 № 1675-64-VII [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: [http://deputat.slav.gov.ua/\\_layouts/public/Decisions.aspx](http://deputat.slav.gov.ua/_layouts/public/Decisions.aspx). – 02.01.2020. – Назва з екрану.

7. Стратегічний план розвитку міста до 2025 року [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: <https://cutt.ly/ng15S8v>. – 30.03.2021. – Назва з екрану.

8. Славутич – місто нових ідей [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: <https://arr.in.ua/rozvitok-gromadi/>. – 30.03.2021. – Назва з екрану.

9. Сонячне місто. Славутич – енергетичний кооператив [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: <https://solartown.com.ua/>. – 30.03.2021. – Назва з екрану.

**PROGRAM FOR RADIATION AND HEALTH SAFETY OF  
PERSONNEL OF CONTRACTORS ENTERPRISES, WHICH  
PARTICIPATED IN WORKS FOR CONSTRUCTION NEW SAFE  
CONFINEMENT OF OBJECT "SHELTER" OF SSE CHERNOBYL NPP" (15  
YEARS OF EXPERIENCE AND INOVATIONS)**

*Sushko V., Bazyka D, Likhtarev Il., Loganovskiy K., Lyashenko L., Berkovskiy  
V., Nechaev S., Kolosynska O., Shvayko L.,  
Perchuk I., Nezgovorova G., Iliencko I.  
State Institution "National Research Center  
for Radiation Medicine of The National Academy of Medical Sciences of  
Ukraine", Kyiv*

Object "Shelter" (OS) is characterized as a place of superficial storage of unorganized RAW. The unicity of works that was conducted at OS for New Safe Confinement consists in that personnel executes the put productive tasks in the conditions of action of high-activity open radionuclide sources of ionizing radiation in a direct closeness to him on radioactively contaminated territory. Works at OS were performed under multifactor occupational hazardous conditions with a dominant radiation factor that is increased with the general industrial hazardous and contaminated conditions, in difficult to access workplaces of destroyed nuclear reactor.

**Materials and methods.** The interdependence complex program of medical and biophysical (internal and external irradiation) control of personnel, which executes productive tasks in the conditions of action of ionizing radiation and open sources of ionizing radiation was developed (2004) and shown strong positive results for radiation protection (prevent the overdose) and saving health and workability of workers (2004-2019). Program included check-in / check-out, periodical, individual inspection and special forms of control in combination with differentiation of category of health of personnel that influence on radiation protection and effective management of staff that have experience for work in radiation hazard conditions. Realization of medical examination envisages the estimation of the status of haemopoietic, immune, endocrine, respiratory systems, organ of sight, nervous system, psyche and psychophysiological adaptation, ear, system of blood circulation, digestion system, urogenital system, al bone-muscular system. More than 30 000 cases of medical control of personnel were conducted.

**Results.** The results of check-in medical control testify to such: it is admitted to works 50.4 %, shut out – 49.6 %. The individual annual effective doses of external irradiation in repressing part of cases did not exceed 12 mSv. Particular group of workers receive Ministry of Health of Ukraine admission for works under dose till 50 mSv. There were more 2845 cases of  $^{239+240}\text{Pu}$  content in excrements exceeding the level of 1.5 mBq/sample at a current biophysical control. The individual doses of internal irradiation did not exceed 1 mSv for mane part of workers. At the same time internal exposure from transuranium elements for more than 400 workers were from 1 to 3 mSv.

Medical investigation shown clinical and morphological features of damage of endobronchial, stomach and duodenum mucosae among workers who performed



radiation-hazardous work on OS. Bronchopulmonary system damage in cases of overdosage above 20 mSv also included decreasing functional lung tests indexes and developing signs of endobronchial inflammation. The risk of exacerbations development in chronic inflammatory and ulcerative diseases of the stomach and duodenum significantly developed when radiation doses exceed 20 mSv per year. The study confirms the presence of radiation-induced changes in gene regulation of epithelial and immune cell proliferation, telomere function and apoptosis in radiation workers exposed to external and internal exposure at doses above professional limits. Neuropsychiatric examination found cognitive deficiency and features of cortical limbic system dysfunction mainly in dominant left hemisphere with key involvement of hippocamp that can be qualified as a result of influence of several harmful factors including ionized radiation.

**Conclusions.** The program of the medical and biophysical services for reconstruction works of OS witnessed its necessity and efficiency because results showed that in unique radiation-hygienical conditions the most critical are not engineer and technical problems, but - how to save the health and workability of people and prevent the overdose of personnel including and due to an internal irradiation. As a result of work the unique in the world scientific and practical experience of innovative medical and biophysical technologies of effective maintenance of radiation safety of emergency radiation objects and the enterprises of the nuclear industry is received.

# COMPREHENSIVE ANALYSIS AND INTERPRETATION OF A NEUTRON INCIDENT REGISTERED AT THE PERIPHERALS OF NUCLEAR DANGEROUS FISSILE MATERIALS CLUSTER IN JUNE 1990

*Kostyantyn Sushchenko, Roman Godun.*

**Abstract:** It is presented the comprehensive analysis and interpretation of available data on the neutron anomaly, which was registered on June 1990 inside the object "Shelter" (OS) at the periphery of Fuel-containing Materials' (FCM) clusters, that localized in premise 305/2. It is presented the argumentation that this event can be interpreted as a local "cold critical incident" in the volume of FCM accumulation.

According to the accepted hypothesis the recorded decreasing of detector's count rate is the result of this breeding system's overmoisting. Thus, under the NSC conditions a high water's concentration inside OS is a stabilizing factor, which provides acceptable subcriticality of fissile materials. This hypothesis is indirectly confirmed by the growth of neutron flux density after the installation of the NSC into design position.

**Keywords:** object "Shelter"; nuclear hazardous fissile materials; fuel-containing materials; data analysis; neutron flux density; neutron anomaly; self-sustaining chain reaction of neutron fission; nuclear safety.

## **The main theses:**

It was restored the dynamics of neutron flux density (NFD) during the neutron incident, registered on June 1990 on the periphery of nuclear dangerous fissile materials (NDFM) clusters. Existing data were comprehensive analyzed.

Eight hypotheses concerning the possible causes of this neutron anomaly are considered and it is given the rationale for excluding seven of them. It is shown that the only possible explanation may be the occurrence of a self-sustaining neutron fission chain reaction (SNFCR) in the volume of the NDFM cluster, located in room 305/2 of object "Shelter" (OS). The main argument in favor of interpreting a neutron incident as SNFCR is the estimation of the neutron multiplication factor's ( $K_{ef}$ ) changes, obtained on results of NFD dynamics analysis with taking into account the reduction of response efficiency of the detectors, located at the periphery of fissile materials. Thus, the event in June 1990 can be interpreted as a "cold critical incident".

The fact of detectors count rate (CR) decreasing can be explained by two hypotheses. According to the first one this is the result of destruction of the breeding system's structure, which accordingly excluded the conditions for further incident development. According to the second option, the decreasing of detectors CR occurred due to overmoisting of this breeding system (i.e., due to the increase of water concentration inside the NDFM cluster above the optimal water to fissile materials' ratio). According to the existing experimental data, it is not possible to exclude any of these options, but within the framework of a conservative approach to safety's ensuring of a nuclear-dangerous facility (OS), we are obliged to accept the most unfavorable – the second one. In the framework of second option of the neutron

incident interpretation, it is presented a description of possible processes, that explain existing experimental and calculated data.

In the framework of accepted hypothesis, until the NSC installation the Kef of NDFM cluster in room 305/2 decreased to the values, determined by the moisture capacity (available porosity) of the breeding system and remained virtually unchanged due to the replenishing and retaining of atmospheric, condensing and technical waters.

The current potential nuclear danger is that for the NDFM cluster in room 305/2, a uniform (through volume) reduction process of water concentration from the pore space is allowed while maintaining the critical parameters. Thus, under the NSC conditions a high water's concentration inside OS is a stabilizing factor, which provides acceptable subcriticality of fissile materials. Therefore, if the critical composition's structure is remains (in framework of second option) the SNFCR occurrence are possible. Moreover, incident will have the dynamics and consequences that difficult to predict due to the value of the reactivity's margin and the already positive temperature reactivity coefficients.

**Authors' information:**

**Konstantin Sushchenko** – Junior researcher, Institute for Safety Problems of NPP of NAS of Ukraine; e-mail: [kosts2@ukr.net](mailto:kosts2@ukr.net)

**Major Fields of Scientific Research:** nuclear safety; subcriticality control, preventive measures to suppress self-sustaining chain reaction.

**Roman Godun** – Head of Department of Nuclear Safety, Institute for Safety Problems of NPP of NAS of Ukraine; e-mail: [rgl.wmw@gmail.com](mailto:rgl.wmw@gmail.com)

**Major Fields of Scientific Research:** the ensuring of nuclear and radiation safety of “Shelter” object (SO); the increasing of efficiency of monitoring control systems; the radioactive waste management; remote-controlled devices for sampling

## МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ПІД ЧАС ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ТА ПИЛОВОЇ БУРІ У ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ В 2020 Р.

*Талерко М. М., Лев Т. Д., Кашиур В. О., Яценко Ю. В.  
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ,  
03028, Україна, n.talerko@isprpp.kiev.ua*

Results of modeling the dispersion of radionuclides released into the atmosphere during the period of intense forest fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020 are presented. Additionally, the impact of radionuclide resuspension from burned-out areas in the meadow biocenoses of the Exclusion Zone on 16-17 April was estimated. Calculations of the dynamics of the  $^{137}\text{Cs}$  activity concentration field in the surface air on a regional scale (in Ukraine) and on a local scale (within the Exclusion Zone) were performed. Maximum values of the  $^{137}\text{Cs}$  activity in the surface air of Kyiv in some periods during April 3–20 could reach 2 - 4  $\text{mBq m}^{-3}$ , and the integral value of  $^{137}\text{Cs}$  activity in the air of Kyiv for the whole period was about 450  $\text{Bq s m}^{-3}$ . The estimated total activity of  $^{137}\text{Cs}$  that entered the atmosphere during the dust storm was about 162  $\text{GBq}$ , ie up to 20% of the total activity emitted into the air during the entire period of forest fires on April 3-20, 2020. The  $^{137}\text{Cs}$  activity resuspended during the dust storm on April 16 and 17 amounted to 0.24% of the total stock of  $^{137}\text{Cs}$  in the burned-out area.

В квітні 2020 року на території Чорнобильської зони відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення (далі ЧЗВ) відбулась найбільша за всю історію існування ЧЗВ лісова пожежа [1, 2]. В цей же період, протягом 16-17 квітня 2020 р. в північних областях України спостерігалась сильна пилова буря. Обидва явища призвели до значного короточасного підвищення об'ємної активності радіонуклідів в приземному повітрі в ЧЗВ (до 2-х порядків) та за її межами, включаючи Київ (до одного порядку величини). В доповіді представлено результати моделювання атмосферного перенесення радіонуклідів, що потрапили в повітря внаслідок інтенсивних пожеж в радіоактивно забруднених біоценозах Чорнобильської зони відчуження та Овруцького району Житомирської області в період 3-20 квітня 2020 року. За допомогою модельного комплексу LEDI, розробленого в ІПБ АЕС НАН України, проведено розрахунки динаміки поля концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  в приземному повітрі на регіональному масштабі (для території України) та на локальному масштабі (в межах зони відчуження) [3]. Максимальні значення активності  $^{137}\text{Cs}$  у поверхневому повітрі Києва в окремі періоди протягом 4–20 квітня могли досягати 2 - 4  $\text{мБк м}^{-3}$ , а інтегральне значення активності  $^{137}\text{Cs}$  у повітрі Києва за весь період становило близько 450  $\text{Бк с м}^{-3}$ .

Результати моделювання емісії радіонуклідів від лісових пожеж достатньо добре узгоджуються з даними вимірювань концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  у повітрі ЧЗВ та в Києві протягом 3-13 квітня. Для періоду після поновлення

інтенсивних пожеж з 16 квітня отримано заниження модельних результатів порівняно з даними вимірювань радіоактивного забруднення приземного повітря в ЧЗВ. Показано, що основною причиною розбіжностей є додатковий внесок інтенсивного вітрового підйому радіонуклідів зі згарищ на території лучних біоценозів зони відчуження, які сформувались за попередній період, протягом 16-17 квітня під впливом сильних вітрів та пилової бурі. Вітровий підйом радіоактивно забруднених частинок на згарищах, що утворилися після пожеж, може бути потужним джерелом забруднення повітря в самій зоні, а також збільшувати винесення радіонуклідів за її межі.

Отримано, що емісія аерозольних частинок зі згарищ в зоні відчуження під час пилової бурі 16-17 квітня 2020 р. порівняна з інтенсивністю емісії внаслідок природних пожеж в цей період. Оцінка сумарної активності  $^{137}\text{Cs}$ , яка надійшла в атмосферу протягом пилової бурі склала близько 162 ГБк, тобто до 20% від загальної активності, піднятої в повітря за весь період інтенсивних лісових пожеж 03-20 квітня 2020 р. Оцінка загальної маси аерозольних частинок, які надійшли в атмосферу протягом пилової бурі від усіх згарищ в ЧЗВ, склала  $2,8 \cdot 10^7$  кг.

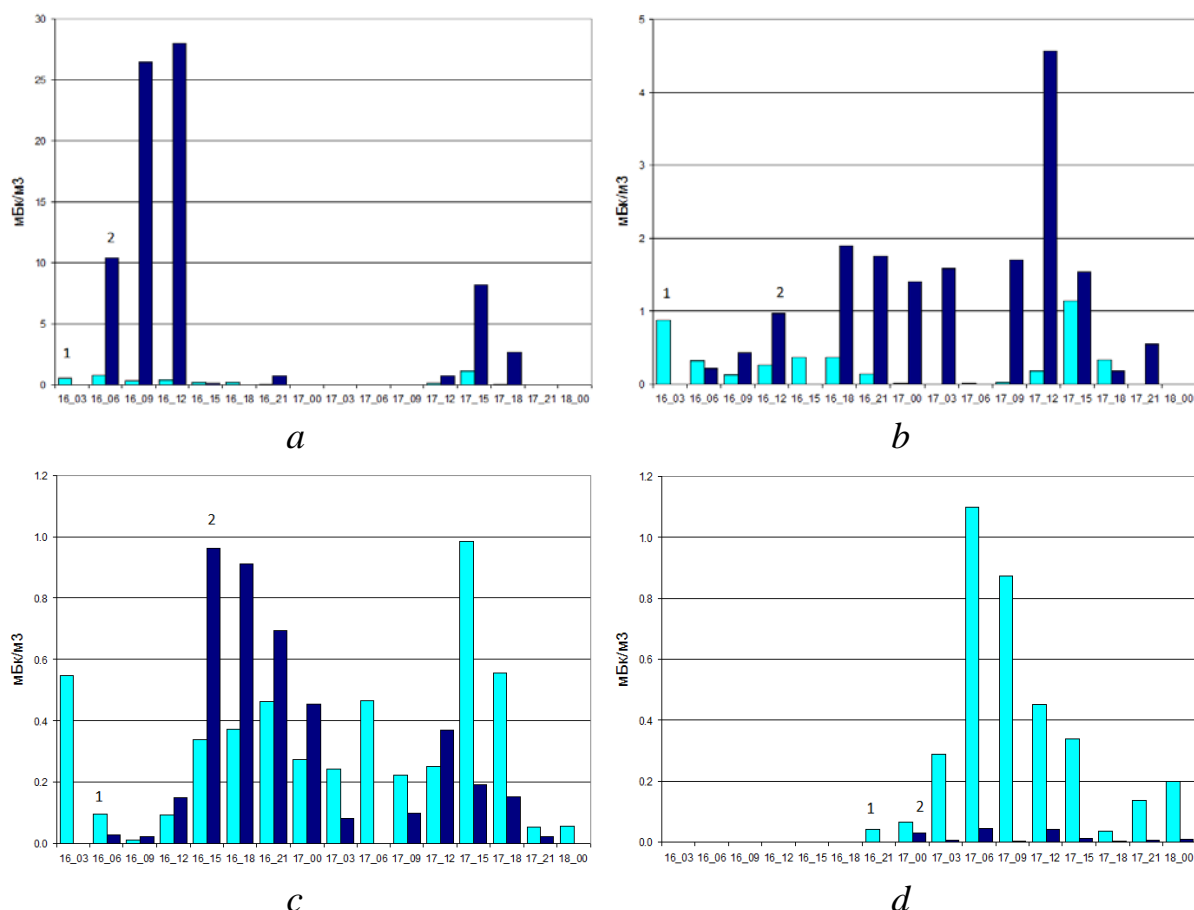


Рис. 1. Модельна динаміка усередненої за 3 год об'ємної концентрації активності  $^{137}\text{Cs}$  (мБк/м<sup>3</sup>) в районі розташування ЧАЕС (ВРУ-750) (a), Чорнобилі (b), Дитятках (c) та Києві (пр. Науки) (d), обумовленої пожежами в природних біоценозах (1) та вітровим підйомом радіоактивних частинок зі згарищ внаслідок пилової бурі (2) в зоні відчуження протягом 16–17 квітня 2020 р. По осі абсцис – час у форматі (дата \_ година).

Згідно з результатами моделювання атмосферного перенесення частинок, піднятих внаслідок пилової бурі, підйом аерозольних частинок зі згарищ лучних біоценозів протягом періоду існування пилової бурі 16-17 квітня на 80-95% визначав рівень радіоактивного забруднення приземного повітря поблизу ЧАЕС та в м. Чорнобиль в порівнянні зі внеском природних пожеж (Рис. 1). При збільшенні відстані до джерел емісії радіонуклідів це значення зменшується. В Києві внесок радіоактивних частинок, піднятих в повітря пиловою бурею в зоні відчуження, склав лише близько 4 % від загальної активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі.

Винос активності з території згарищ в лучних біоценозах внаслідок пилової бурі протягом двох діб 16 та 17 квітня склав 0,24% від загального запасу активності  $^{137}\text{Cs}$  на території, що вигоріла.

### **Список використаних джерел:**

1. Зібцев С. В. Прес реліз Регіонального Східноєвропейського центру моніторингу пожеж щодо площ пожеж у зоні відчуження, 29.03 – 16.04.2020 / С. В. Зібцев, В. В. Миронюк. – Режим доступу: <https://nubip.edu.ua/node/75436>.

2. Моделювання атмосферного розповсюдження радіоактивності, винесеної в повітря в результаті лісових пожеж у зоні відчуження у квітні 2020 р. / М. М. Талерко, Т. Д. Лев, І. В. Ковалець, Ю. В. Яценко // Ядерна енергетика та довкілля. – 2020. – Вип. 3 (18). – С. 86 - 104.

3. Процак В. П. Оцінка динаміки виносу радіонуклідів за межі зони відчуження повітряним шляхом під час пожежі 02 – 20.04. 2020 р. / В. П. Процак, О. В. Войцехович, Г. В. Лаптев // Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України. – Режим доступу: <https://uhmi.org.ua/msg/fire2020/analytical.pdf>.

# ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ОЦІНКИ УШКОДЖЕННЯ РОСЛИННОСТІ ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ

*Тищенко О. Г. , Ландін В. П. , Цидик Н. М.*

*Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України (м. Київ, Україна), e-mail: 634444@ukr.net; ORCID:0000-0002-4116-2220; e-mail: vlad\_land@ukr.net; ORCID:0000-0003-4612-3682; ORCID:0000-0001-8518-7529; nmvasko25@gmail.com*

Проаналізована ефективність застосування мультиспектральних знімків і карт вегетаційних індексів рослинності для уточнення карт рослинного покриву, а також діагностики ушкодження рослинності внаслідок пожеж. Дослідження проводилося на прикладі пожежі 2020 р. в зоні відчуження ЧАЕС (ЗВ) і зоні безумовного (обов'язкового) відселення (ЗБ(О)В). Визначення периметру проходження вогню проведено з використанням радіометричних даних осередків вогню NASA у квітні 2020 року. Розробка мультиспектральних знімків основана на синтезуванні спектральних даних супутників Landsat 8 та Sentinel 2 у різні фази вегетаційного розвитку рослинності. З використанням синтезованих зображень підстильної поверхні уточнено карту просторового розподілу рослинного покриву до М 1:25 000 у периметрі проходження вогню. Визначено, що найбільш придатними для розробки великомасштабних карт є знімки супутника Sentinel 2, а для масштабу М 1:100 000 - Landsat 8. Аналіз стану рослинності включав розрахунок значень вегетаційних індексів: NDVI, NBR, deltaNBR. Показана ефективність застосування вегетаційних індексів для визначення ділянок з верховою та низовою пожежею в лісі. Використання геоінформаційних технологій дозволило отримати карти ушкодження різних типів рослинного покриву. Розроблена карта просторового розподілу ушкодженої пожежею рослинності містить: типи рослинних угруповань (біоценоз): хвойного, листяного, мішаного лісу та трав'янистої рослинності, ступінь ушкодження, їх площу, часові терміни пожежі.

**Ключові слова:** рослинний покрив, лісові пожежі, згарища, дистанційне зондування Землі, геоінформаційні технології, NDVI, NBR, deltaNBR

**Annotation:** The abstracts present an analysis of the effectiveness of the use of multispectral images and vegetation indices to refine maps of the spatial structure of vegetation and diagnose vegetation damage due to fires. The consequences of the fire in 2020 in the Chernobyl Exclusion Zone and the Unconditional Mandatory Resettlement Zone (EZ та ZU(O)R) studied. Radiometric data from NASA fires in April 2020 helped determine the perimeter of the fire. The spectral data of the Landsat 8 and Sentinel 2 satellites in different phases of vegetative development of vegetation became the basis for the development of multispectral images necessary for the differentiation of vegetation. The use of synthesized images of the underlying surface helped to clarify the map of the spatial distribution of vegetation M 1:25,000 on the territory of the fire. It has been determined that the most suitable for the development of large-scale maps are images from the Sentinel 2 satellite, and for the scale M 1: 100,000 these are images from Landsat 8. Analysis of vegetation status included calculation of values of vegetation indices: NDVI, NBR, deltaNBR. The authors

concluded that the use of vegetation indices to determine areas with upper and lower forest fires is effective. The use of geographic information technologies allowed obtaining maps of damage to different types of vegetation. The developed map of the spatial distribution of fire-damaged vegetation are contains: types of plant communities (biocenosis): coniferous, deciduous, mixed forest and grassy vegetation, degree of damage, their area, time of fire.

Метою вивчення впливу пожежі на рослинний покрив зони відчуження та безумовного відселення у квітні 2020 р. була оцінка ступеню екологічних наслідків пожежі, визначення ділянок, які потребують лісовідновлення, кількісна оцінка площі ушкодження рослинності та картування отриманих результатів.

Для виконання поставленої задачі було досліджено ефективність показників: нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI), нормалізований індекс випалювання (NBR) та різниця значень NBR до та після пожежі ( $\Delta$ NBR). З цією метою була підготовлена і проаналізована серія знімків, що базувалася на використанні спектральних даних видимого та інфрачервоного спектрів електромагнітного випромінювання. Порівняння і аналіз проводився за знімками супутників Landsat 8 та Sentinel 2 за періоди до і після ушкодження території пожежами з урахуванням вегетаційного розвитку рослинності [1, 2]. Обробка вхідних даних, удосконалення тематичних картографічних шарів та їх аналіз проводилися з використанням інструментів та технологій геоінформаційних систем (ГІС) професійних картографічних пакетів: ArcGIS, ERDAS IMAGEN та MapInfo.

Для ідентифікації периметра випалювання були використані радіометричні дані температури поверхні, розміщені на інтернет платформі FireMaps за період з 03 до 29 квітня 2020 р. [3]. Потрібно підкреслити, що найбільша точність картування була досягнута у разі комплексного використання радіометричних даних, синтезованих зображень підстильної поверхні та вегетаційних індексів, отриманих за спектральними даними космічних супутників.

Для діагностики ушкодження рослинності від впливу вогню був розрахований нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI) як відношення різниці та суми даних каналів ближнього інфрачервоного і видимого червоного спектрів [4]. Показник NDVI був застосований для визначення ступеню відновлення біомаси рослинності після пожежі. Визначено, що сукупність пікселів з низькими значеннями NDVI від 0 та менше 0,3 визначають ділянки з сильним ушкодженням рослинності внаслідок верхової пожежі. Нормалізований індекс випалювання (NBR), отриманий як різниця спектральної яскравості діапазонів короткого інфрачервоного (SWIR) та ближнього інфрачервоного випромінювання (NIR) [5].

Розрахунок індексів NBR і NDVI проведений за спектральними даними Landsat 8 за періоди: червень 2020 р. і вересень 2019 р., Sentinel 2 - за березень, серпень і вересень 2020 р. З метою уточнення термінів вигорання окремих ділянок розглядалися також готові синтезовані зображення за 07 та 17 квітня 2020 р. [1]. Ці дані відповідали стану території до та після пожежі.

Індекс NBR представляє собою нормовану різницю шарів спектральних діапазонів, яка визначає небезпеку зменшення у клітинах рослин вмісту



вологи і як наслідок є дуже чутливою до впливу вогню на рослинність, індекс розраховується за формулою (1).

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (1)$$

Наступним кроком для визначення змін був розрахований масштабований коефіцієнт випалювання  $\Delta NBR$ , отриманий як різниця стану рослинності до пожежі  $NBR_1$  та після пожежі  $NBR_2$ :

$$\Delta NBR = NBR_1 - NBR_2 \quad (2)$$

Аналіз та картування виконано засобами геопросторової обробки даних за наступними кроками:

- синтезування комбінацій спектральних даних каналів видимого та інфрачервоного діапазонів;
- оцифрування периметру пошкодженого пожежею рослинного покриву, визначеного за дешифрувальними ознаками мультиспектральних знімків Landsat 8 та за точковими векторними даними NASA осередків вогню;
- розрахунок показників NDVI;
- розрахунок показників NBR для стану до пожежі і після пожежі та різниці між ними -  $\Delta NBR$  масштабованого на  $10^3$ .
- аналіз просторової структури ушкодженої рослинності з використанням карт рослинності, уточнених за допомогою супутникових знімків високої роздільної здатності та зонування за ступенем ушкодження рослинного покриву від вогню.

Отримані результуючі шари були оцифровані з метою визначення зони впливу пожежі на біоценози ЗВ і ЗБ(О)В. На основі просторового розподілу індексу NBR отримана класифікація за градаціями показаними на рис. 1.

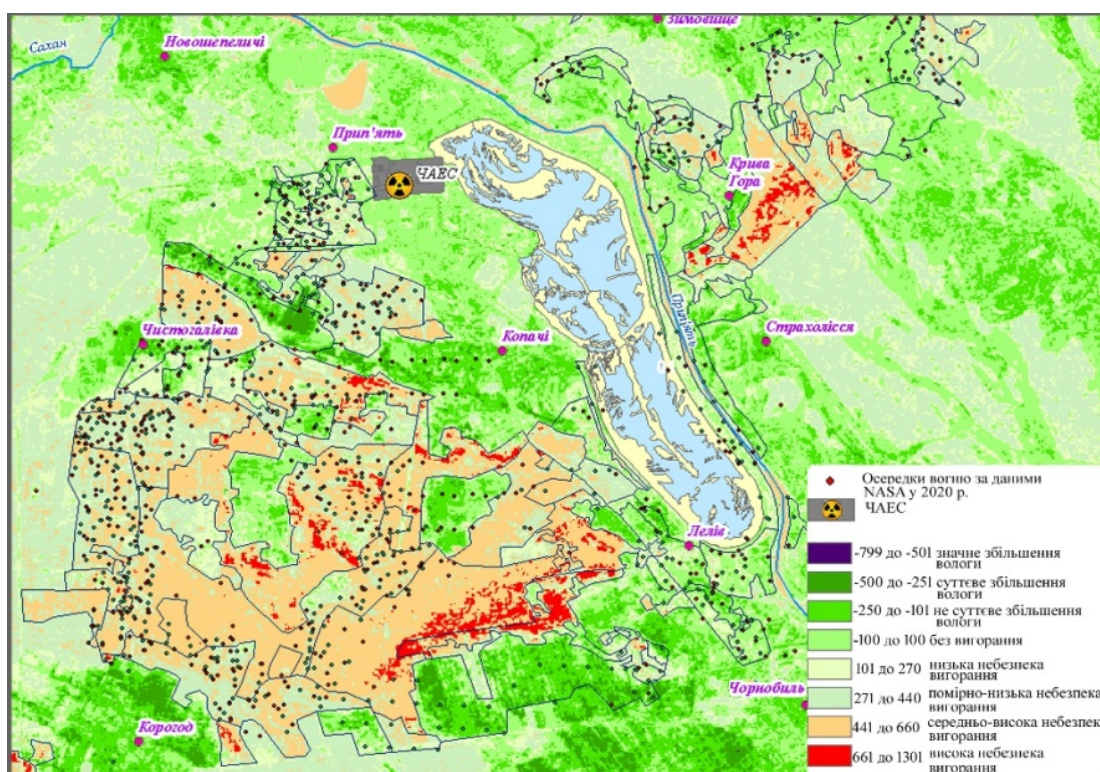


Рис. 1. Класифікація рослинності ураженої пожежею у 2020 р. в межах 15 км від ЧАЕС

Для визначення типів ушкоджених біоценозів використовувалась уточнена цифрова карта рослинного покриву М1:25 000.

Рослинний покрив був розділений на асоціації лісової рослинності з хвойними та листяними породами, а також трав'янистою рослинністю. Хвойні ліси є найкращим природним фільтром, що затримує аерозольні часточки, що піднімаються з поверхні, і в той же час, саме хвойні ліси зазнали найбільшого ушкодження внаслідок пожежі 2020 року у ЗВ та ЗБ(О)В. Швидкість проходження вогню та потужність пожежі у біоценозах і, як наслідок, ступінь ушкодження рослинності в значній мірі визначають запаси (т/га), структура та щільність накопичених наземних горючих матеріалів.

Отриманий картографічний матеріал може бути використаний для визначення ділянок, що потребують лісовідновлення після пожежі, а також для планування пробовідбору з метою визначення співвідношення кількості загального запасу радіонуклідів в компонентах екосистем та їх емісії у навколишнє середовище під час пожежі.

### **Висновки**

Застосування мультиспектральних знімків високої роздільної здатності за різні періоди вегетації є ефективним інформаційним джерелом для розробки великомасштабних карт рослинного покриву. Комплексне використання космічних зображень рослинного покриву з on-line даними радіометричних вимірювань платформи FireMaps показує найкращу точність картування периметру пожежі.

Ефективним засобом для класифікації периметру пожежі за ступенем зниження вмісту вологи у рослинності є масштабований показник різниці значень індексу NBR до та після пожежі. Застосування вегетаційних індексів та великомасштабних карт рослинності дозволяє виділити ділянки трав'яної пожежі, низової та верхової пожежі в лісі.

### **Список використаних джерел:**

1. Imagery Digital data LANDSAT – Режим доступу: <https://landlook.usgs.gov/landlook/viewer.html> (дата звернення: 01.07.2020).

2. Imagery Digital data SENTINAL-2 BANDS – Режим доступу: <https://eos.com/landviewer> (дата звернення: 01.06; 01.10.2020).

3. Дані радіометричних вимірювань NASA [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_V1\\_163064.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_V1_163064.zip), [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_J1V-C2\\_163063.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_J1V-C2_163063.zip), [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_M6\\_163062.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_M6_163062.zip) (дата звернення: 01.08.2020).

4. Кохан С. С., Востоков А. Б. Дистанційне зондування Землі. Теоретичні основи – Київ: Вища школа, 2009. 510 с.

5. Carl H. Key Nathan C. Benson. Landscape Assessment (LA) Sampling and Analysis Methods. Sampling and Analysis Methods. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. 2006.

### **References**

1. Imagery Digital data LANDSAT – Retrieved from: <https://landlook.usgs.gov/landlook/viewer.html> [in English].

2. Imagery Digital data SENTINAL-2 BANDS – Retrieved from: <https://eos.com/landviewer> [in English].

3. Dani radiometrychnykh vymiryuvan' NASA. (2020). [NASA radiometric measurement data] – Retrieved from: [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_V1\\_163064.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_V1_163064.zip), [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_J1V-C2\\_163063.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_J1V-C2_163063.zip), [https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL\\_FIRE\\_M6\\_163062.zip](https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_M6_163062.zip) [in English]

4. Kokhan S. S., & Vostokov. A. B. (2009). Dystantsiine zonduvannia Zemli. Teoretychni osnovy [Remote sensing of the Earth. Theoretical foundations]. Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].

5. Carl H. Key Nathan C. Benson. (2006). Landscape Assessment (LA) Sampling and Analysis Methods. Sampling and Analysis Methods. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. [in English].

## УТИЛІЗАЦІЯ РАДІОАКТИВНО - ЗАБРУДНЕННІ ДЕРЕВИНИ МЕТОДОМ ГАЗИФІКАЦІЇ

*Толмачов Микола Григорович. Фірма “ТММ” – ТОВ. Київ.  
mykola.tolmachov@tmm.ua*

Беручи до уваги серйозне ослаблення бар'єрних функцій на третині території ЧЗВ, подальше погіршення радіоекологічної ситуації у зв'язку із вторинним забрудненням екосистем радіоактивно забрудненими продуктами горіння значну кількість накопиченої сухостійної і горілої деревини, яка щороку збільшується, ситуація із утриманням депонованих радіонуклідів у ЧЗВ потребує термінового втручання.

Однак, до цього часу, не вирішеним залишалось питання поводження із вилученою радіоактивно забрудненою деревиною. Так донині не утилізовано чи безпечно захоронено близько 2 млн.м<sup>3</sup> деревини, пошкодженої пожежами 2015 року, не прийнято рішення щодо поводження із понад 10 млн.м<sup>3</sup> деревини, пошкодженої пожежами 2020 року. Відбувається активна міграція продуктів горіння (РАВ) повітряним та водним шляхом.

Існуючі наукові розробки та технічні рішення, новітні світові технології поводження із радіоактивними відходами сьогодні вже дозволяють напрацювати та прийняти ряд управлінських рішень, спрямованих на реалізацію проектів із відновлення деградованих екосистем, посилення бар'єрних функцій, підвищення рівня пожежної безпеки та радіаційного захисту населення.

Фірма “ТММ”-ТОВ бере активну участь у розробленні стратегічних документів державного планування у сфері радіаційного захисту населення України, відновлення деградованих екосистем та довгострокового планування розвитку ЧЗВ з метою відновлення і утримання бар'єрних функцій для радіаційно-екологічного захисту населення та забезпечення соціального, економічного, науково-технологічного розвитку ЧЗВ, поступового повернення дезактивованих територій у господарський обіг, створення на довічно виведених із господарського обігу землях зони спеціального промислового використання.

Маємо за честь, як співавтори, презентувати сьогодні проект Концепції комплексного відновлення і розвитку територій зони відчуження і зони безумовного (обов'язкового) відселення, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи на 2021-2070 роки (додається).

Загальний алгоритм дій із відновлення ЧЗВ, відповідно до Концепції, пропонується такий:

1. Вилучення із екосистем, пройдених пожежами 2015 та 2020 років, горілої і сухостійної деревини разом із лісовою підстилкою та пнями сучасною технікою із дотриманням вимог радіаційної безпеки та пилоподавленням.

2. Переміщення вилученої радіоактивно забрудненої деревини до 10 кілометрової зони на нижній склад для підготовки до тимчасового зберігання методом торрифікації.

3. Відновлення деградованих екосистем шляхом сприяння природньому поновленню корінних лісових екосистем та відновленням водності водно-болотних угідь за допомогою ремонту і реверсного використання існуючої меліоративної системи.

4. Підготовка торрифікованого РАВ до утилізації шляхом подрібнення.

5. Утилізація проводиться у збудованому на умовах державно-приватного партнерства заводі за сертифікованою МАГАТЕ технологією із використанням обладнання британської фірми Tetronics.

6. Отриманий під час утилізації гарячий синтез-газ ( $H_2+CO$ ) очищується від пилу та радіонуклідів до хімічної та енергетичної чистоти, після чого пил із поглинутими радіонуклідами (до 1,5 %) передаються на захоронення на спеціалізоване підприємство.

7. Гарячий синтез-газ надходить на хімічний комбінат, що використовує чистий синтез-газ у якості сировини для виробництва “зелених” водню та перекису водню, біометанолу та інших хімічних продуктів із високою доданою вартістю, у т.ч. – мінеральних добрив, засобів захисту рослин, стимуляторів росту, засобів протипожежного захисту лісів та ін.

Проект має виключне значення як унікальна практика ліквідації наслідків радіоактивного забруднення та передбачає вирішення унікального комплексу технічних завдань щодо вилучення радіоактивно забрудненої деревини та прийняття неординарних управлінських рішень в частині відмови від тотального засадження лісом на користь сприяння природньому поновленню, доведення лісистості території до 80 %, відновлення водно-болотних екосистем та ін.

Виконання масштабних робіт у стислі терміни обумовлені високою здатністю радіоактивного попелу до міграції, швидкістю усихання соснових насаджень, високою ймовірністю виникнення нищівної пожежі із катастрофічно непередбачуваними транскордонними наслідками для усього Європейського континенту.

Реалізація проекту передбачається за рахунок мобілізації залучення фінансових ресурсів з усіх джерел, зокрема за рахунок розвитку міжнародного партнерства, державної підтримки та залучення приватного сектору, а також за рахунок міжнародної технічної та фінансової допомоги та інших джерел фінансування – коштів міжнародних партнерів, банківського сектору та залученого капіталу.

Механізм державно-приватного партнерства та законодавчі новели щодо державної підтримки великих інвестиційних проектів створили унікальну ситуацію для реалізації проекту такого масштабу за підтримки держави, залучення в Україну стратегічних інвесторів, підвищенню інвестиційної привабливості країни, а також зростання конкурентоспроможності української економіки.

Реалізація проекту сприятиме приведенню екосистем ЧЗВ у стан, який максимально та комплексно забезпечить їхню бар’єрну функцію для утримання радіоактивних забруднень та унеможливлення їх розповсюдження за межі ЧЗВ в результаті впливу будь-яких внутрішніх та зовнішніх факторів, радіаційному захисту населення України.

## **UTILIZATION OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED WOOD BY GASIFICATION METHOD**

Due to large-scale forest fires, 2015 and 2020, the buffer function of radiation protection of the population in the Chernobyl Exclusion Zone is significantly weakened. The solution to the problem is not possible without the development of scientific and practical approaches to the rapid restoration of the buffer function of forest ecosystems and the use of environmentally friendly technologies for the utilization of radioactively contaminated wood. It is proposed to adopt a strategic decision on complete withdrawal of burnt wood and dead-wood as well as forest litter in a 10 kilometer zone to accelerate the restoration of typical forest ecosystems. In addition, for the restoration of wetland ecosystems, it is proposed to carry out repair and reverse connection of the existing reclamation network. In order to utilize the seized wood, it is necessary to create a recycling plant on the terms of public-private partnership. Radionuclides withdrawn during gasification of wood chips, along with radioactively contaminated dust, are transferred to a specialized facility for disposal. The purified hot synthesis gas is used on a chemical plant for the production of “green” hydrogen and other chemical products. The specified comprehensive approach can be implemented with the support of the State, as a partner for strategic investors. Implementation of the project will ensure decontamination of a significant territory, strengthening the barrier function of radiation protection of the population of Ukraine, restoring indigenous ecosystems, increase in water content in the region, significant reduction of the level of fire hazard, creation of economic prerequisites for the development of the Zone of Special Industrial Use in the territory of the Chernobyl Exclusion Zone.

# INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR INCREASING ENVIRONMENTAL SAFETY OF ATOMIC ENERGY COMPLEX

Chernysh Yelizaveta<sup>1,3</sup>, Plyatsuk Leonid<sup>1,3</sup>,  
Shtepa Vladimir<sup>2,3</sup>,  
Skydanenko Maksym<sup>1</sup>, Kononenko Mykola<sup>1</sup>,  
Tsutsumiuchi Kaname<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sumy State University, Sumy (Ukraine);

<sup>2</sup>Polissya State University, Pinsk (Belarus);

<sup>3</sup>International Innovation and Applied Center “Aquatic Artery”, Sumy (Ukraine);

<sup>4</sup>Chubu University, Kasugai (Japan)

**Annotation.** The paper is devoted to the concept of development of nuclear power facilities as a complex natural-technogenic system, analysis of technology development aimed at increasing the level of environmental safety. This study focuses on the analysis of the processes in the system “extraction and production of nuclear fuel – nuclear energy production – radioactive waste and their disposal”, review innovative technological solutions to improve the environmental safety of nuclear power complex functioning. To achieve the aim the following tasks were set: analysis of directions to improve the environmental safety of nuclear facilities and radiation contamination zones; justification of the concept of radioactive waste management for energy purposes. It is indicated that the problem of using water to satisfy the demands of agriculture and the population from potentially contaminated areas in possible emergencies at nuclear power plants requires the introduction of functional parameters and design solutions for the components of the complex of means of rapid response to the actions of radioactive substances. Technological peculiarities of production and use of MOX is fuel, requirements for their use are considered. The possibility of using radiolysis for processing the radioactive waste for energy purposes is substantiated. This process is important for the complex approach to the problem of radioactive waste management.

The impact of the Chornobyl and Fukushima nuclear disasters is significant and requires active international cooperation to find environmentally friendly ways to develop nuclear energy in the world. Both catastrophes have led to the general deterioration in the health and well-being of the population of radiation-contaminated areas [1]. As stated in [2], "measures are being taken to improve the safety of existing NPPs following the requirements of national norms and rules on nuclear and radiation safety, the recommendations of the International Atomic Energy Agency and taking into account many years of experience and international practice.

To build up an integrated concept for the development of nuclear power facilities as a complex natural and man-made system with the recycling of radioactive waste is extremely important. So, the purpose of this study is to review innovative technological solutions to increase the level of environmental safety of the nuclear power plant.

A generalized flow chart of the nuclear fuel production, its use, and further treatment of radioactive waste is shown in Figure 1.



Such technological processes as a quarry method and borehole mining (BHM) are used to extract ore for nuclear fuel from mines. The BHM method is currently widely used to extract uranium. The technology is based on the selective dissolving of natural uranium compounds using a special chemical reagent, which is introduced directly into the rock without extracting ore from the deposits. Then the resulting solution is brought to the surface and exposed to hydrometallurgical treatment. This is an advanced technology. In 2010, 38% of the world's production of uranium came from underground mines, opencast mining (quarries) accounted for 30%, borehole mining - for 21%, and another 11% was obtained as a by-product when extracting other minerals.

BHM method, in comparison with quarry mining, causes much less pollution of the environment with radioactive dust [3].

In the production process of fuel elements (FE) for nuclear reactors and to increase the technical and environmental safety of their operation, considerable attention is paid to the properties of nuclear fuel (combustion uniformity and chemical composition homogeneity, lack of local zones of overheating, and melting), strength and corrosion resistance of the FE shell [4].

The reprocessing of spent nuclear fuel (SNF) provides some economic benefits by enriching the unused uranium and introducing spent plutonium into energy. It enables to reduce the amount of highly radioactive and hazardous wastes that must be properly stored. SNF contains approximately 1% of Pu. This nuclear fuel can also be used for loading into fast neutron reactors [5].

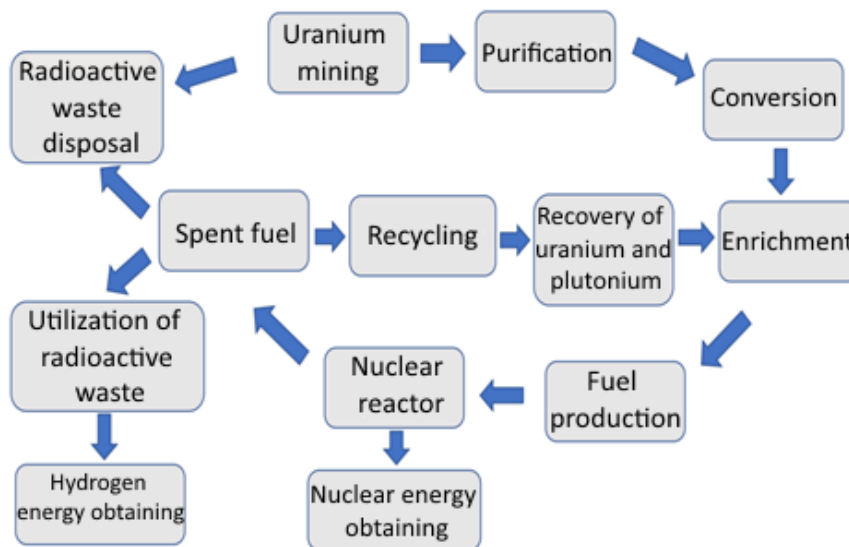


Figure 1 – Flow chart of the system “nuclear fuel - energy - radioactive waste”

MOX fuel is a nuclear fuel consisting of a mixture of uranium dioxide and plutonium. The main reason the use of MOX fuel is currently increasing in the energy industry is that it enables to get rid of accumulated excess plutonium by burning it in the reactor. Depleted or natural uranium in the form of dioxide, nuclear energy, and weapons-grade plutonium can be used in the production of MOX fuel. Thus, the ideologues of MOX fuel use, emphasize its two main benefits: namely, burning of the



excess plutonium, and burning of uranium, unsuitable for use in thermal reactors, while obtaining energy.

At the same time, the physical and technical characteristics of MOX fuel, with its partial use in thermal reactors, negatively affect the safety level of NPPs. In particular, MOX fuel causes heterogeneity in the reactor core, which leads to difficulties in calculating the power distribution near the interfaces between the uranium fuel and fuel assemblies with MOX [3,6].

A number of the following methods have been developed for the production of mixed uranium-plutonium fuel [7]: mechanical mixing and co-grinding of  $\text{PuO}_2$  and  $\text{UO}_2$ ; powders; sol-gel technique; granulation of hydroxide precipitation; ammonium carbonate co-precipitation; plasma chemical conversion; the pyro-electrochemical process of obtaining granular mixed dioxide (solid solution) with subsequent compression in the shell of FE, etc.

The most promising way to obtain particles for fuel cells, including MOX fuel, is to obtain them by the sol-gel technique. It enables the distribution of  $\text{PuO}_2$  and  $\text{UO}_2$  smoothly all over the microsphere, which enables to increase safety in the manufacture of fuel cells.

According to the State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management, a radioactive waste process plant has been set up at the site of the decommissioned Chernobyl NPP in the Kyiv region. Liquid waste is processed in several stages, as a result of which it hardens to the form of cement mixture, which is a safer form of storage and disposal of radioactive waste [8]. But the situation with the processing and disposal of radioactive waste, including the liquid phase, is not completely resolved; there are many questions regarding the environmental safety of processes and technological implementation of the most energy-efficient solutions. As studies have shown in [9], pyro-gasification processing of radioactively contaminated materials and radwaste in the mine furnace makes it possible to implement low-temperature treatment (1000–1100 °C) decreasing the temperature of the source gases (200 °C). Thus, the furnace-charge amount can be reduced up to 140 times and it is possible to process mixtures with high humidity (up to 60%). It is established that the introduction of inorganics stabilizes the heat treatment process. Thermodestructured inorganics (concrete), after sieving from ash, can be used as a filler for concreting of RW disposal [9].

Modern nuclear power plants provide various options for the treatment of circulating water and radioactive effluents, for example:

- purification of reactor water by diverting the part of it from circulation;
- condensate treatment;
- disinfection of water for household purposes (washing of clothes, floor, etc.);
- treatment of storage pond water;
- treatment of regenerated water

Research in the field of water radiolysis in connection with the disposal of radioactive waste and the use of mineral systems with different sorption capacities to increase hydrogen yield is an innovative technological solution that requires further development and implementation [10,11]. The following tasks are important for the technical implementation of the process [11]:

- development of methods to increase the uniformity of energy absorption of ionizing radiation;
- increasing the depth of low-energy electrons penetration into the irradiated system;
- regeneration of volatile pollutants;
- building up of a closed circulation system at water treatment facilities;
- setting up the research facilities to implement the combined methods of treatment of radioactively contaminated wastewater with hydrogen generation.

It is necessary to separate the problem of water use to meet the needs of irrigated farming, agriculture, population, etc., from areas potentially contaminated in possible emergencies (EM) at nuclear power plants. Various types of hazardous radioactive substances, insufficient control on quantity and concentration of hazardous radioactive substances (HRS), lack (low productivity and obsolescence) of equipment for disposal and removal of HRS, lack of necessary reagents, and many other factors cause the danger not only for modern engineering buildings, equipment, and devices for obtaining water from natural sources, its purification, transportation, and supply but also for irrigation of lands, industrial and domestic water users, etc. Such potential conditions of emergency appearance remain the degraded lands and water sources unprotected from transferring HRS in case of conducting melioration and remediation.

Functional parameters and design features of the components of a set of tools for rapid response to HRS in emergencies, by analogy with modern sets of tools to combat degradation of water sources, soils, and air, must be aimed at reducing losses (consequences) from water, land and air pollution by HRS. Determining parameters for choosing the measures and means of rapid response is the place and duration of the emergency.

To reduce the time of HRS contact with the objects of influence, the latter must have technological equipment to counter emergencies. At the same time, HRS mustn't be removed outside the contaminated area.

It is important to mention that such advances are formed on the basis of the International Innovation and Applied Center "Aquatic Artery", functioning at Sumy State University (SSU), which operates based on an interdisciplinary approach and focuses on industrial implementation of engineering solutions for rational use of water resources, energy-efficient solutions for water treatment and water purification, introduction of closed systems for handling secondary water resources, etc.

SSU has carried out research work on the wet supply of nuclear fuel using chemical methods. Nuclear materials are used in the form of nitrate solutions after the secondary treatment of irradiated fuel. These solutions are the starting product for obtaining particles using wet chemical methods. SSU has experience in designing and developing equipment for the wet chemical method of obtaining microspheres from salts of thorium and uranium solutions or their mixtures.

*Acknowledgments: The presented experimental research has been carried out within the Scientific Research "Creation of New Granular Materials for Nuclear Fuel and Catalysts in the Active Hydrodynamic Environment" ordered by the Ministry of Education and Science of Ukraine (State Reg. No. 0120U102036).*

## References

1. Kondratiev S.M., Borozenets G.P., Yarmosh I.V., Kutuzova T. Ya., Chepurny Yu. V. Management of radioactive waste at nuclear power plants of Ukraine. Condition and problems. *Nuclear and radiation safety*. 2016, № 2 (70), pp. 41–46. [https://doi.org/10.32918/nrs.2016.2\(70\).09](https://doi.org/10.32918/nrs.2016.2(70).09)
2. Report on the state of nuclear and radiation safety in Ukraine in 2019. URL: [https://snriu.gov.ua/storage/app/sites/1/imported\\_content/5f5ba835f2116.pdf](https://snriu.gov.ua/storage/app/sites/1/imported_content/5f5ba835f2116.pdf)
3. Nuclear fissile materials: (handling practice, review of technologies, problems and prospects): report of the Bellona association, 2012 / A. Nikitin [and others]; Environmental Rights Center Bellona, St. Petersburg: Bellona, 2012, 149 p., ISBN 978-5-905415-04-3.
4. Zherebtsov A. A., Mochalov Yu. S., Shadrin A. Yu., Zaikov Yu. P., Gorbachev M. K., Sokolov K. A., Kislyi V. A., Goncharov D. A. Development of a design project for the nuclear fuel and energy complex of the industrial energy complex. Coll. of rep. of the industry conf. of Rosatom State Corporation on the topic «Closing the fuel cycle of nuclear energy based on fast neutron reactors». 2018, P. 92
5. Yefimov O. V., Pilipenko M. M., Potanina T. V., Kavertsev V. L., Garkusha T. A. Reactors and steam generators of NPP power units: schemes, processes, materials, structures, models. Kharkiv: LLC "V Spravi", 2017, 420 p.
6. Thermal physics of the reliability of active zones: monograph / A. A. Klyuchnikov [and others]; IPB NPP NASU. - Chernobyl: Institute of NPP Safety Problems, 2015, 772 p.
7. Kravchenko G. A., Rassamagin S. V., Rusanov S. V., Kosarev I. Yu. Obtaining MOX fuel as one of the stages of closing the nuclear fuel cycle. *Nuclear and alternative energy*. 2013, No. 2 (4), P. 60 - 64.
8. A radioactive waste processing plant has started operating at the Chernobyl NPP. Information from the site of the multimedia platform of foreign broadcasting "Ukrinform" URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/2742155-na-caes-rozpocav-robotu-zavod-iz-pererobki-radioaktivnih-vidhodiv.html>
9. Lourenço J., Mendo S., Pereira R. (2019) Rehabilitation of Radioactively Contaminated Soil: Use of Bioremediation/Phytoremediation Techniques. In: Gupta D., Voronina A. (eds) Remediation Measures for Radioactively Contaminated Areas. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-73398-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73398-2_8)
10. Agayev T. N., Garibov A. A., Guseinov V. I. Influence of gamma-radiation on the hydrogen yield at water radiolysis on the surface of nano-zirconium, *PAST*. 2017, №5(111). P. 27 – 30.
11. Chernysh Y., Plyatsuk L., Azarov S., Tsutsumiuchi K., Kotova I. Modeling of innovation research clusters in the field of radioactive waste utilization. *Journal of Engineering Sciences*. Vol. 7(2). P. H1–H9.

## SEPARATE ENTITY "ATOMREMONTSERVICE" - 20 YEARS OF EVOLUTION

*Vitaliy Shikun*

*Director of the separate entity "Atomremontservice" of the state enterprise*

*"National Nuclear Energy*

*Generating Company "Energoatom"*

*E-mail: kanc@ars.atom.gov.ua*

**Abstract:** The repair company at NPP is switching of the power unit's equipment to carry out pre-regulated types of repairs in the planned terms. In general, the repair company aims to restore the resource of equipment and troubleshooting for the possibility of further operation of power units in a timely manner and with minimal costs. Therefore, since the late 1990s, the main task of the State Enterprise "National Nuclear Energy Generating Company" "Energoatom" was minimizing dependence of repairing at nuclear power plants from external factors. Thus, in 2000 it was decided to create a specialized repair subdivision of the "Energoatom" - "Atomremontservice" that could perform overtime repairing works on NPP's equipment, its reconstruction and modernization, constantly mastering new technologies and types of repair work.

The presentation review and analyze the main milestones in the evolution of the repair subdivision "Atomremontservice", as the main specialized entity of the state enterprise "National Nuclear Energy Generating Company "Energoatom" to perform complex overtime work on repair, reconstruction and modernization of NPP's equipment.

**Key words:** Atomremontservis, repair, NPP equipment, performance of works.

## ДО ПИТАННЯ ФІКСАЦІЇ ПАЛИВНИХ ЧАСТОК В ЗРАЗКАХ МУЛУ З ВОДОЙМИ-ОХОЛОДЖУВАЧА ЧАЕС

*Шинкаренко В. К.*

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль,  
shynkarenko.viktor@gmail.com*

Водойма-охолоджувач ЧАЕС є найбільшою і водночас найбільш забрудненою радіонуклідами замкненою водоймою зони відчуження. За роки після аварії відбулось концентрування радіонуклідів в донних відкладеннях за рахунок осідання високоактивних часток опроміненого палива - гарячих часток (ГЧ), а також сорбції розчинених в воді радіонуклідів (переважно  $^{137}\text{Cs}$ ) мінеральними частками та органічною складовою мулу. В процесі осушення водойми відбувалось перенесення мулистих часток з прибережного мілководдя до більш глибоких ділянок, що супроводжувалось перерозподілом ГЧ по шарах мулу з виносом в його верхні шари ГЧ, які до цього часу були перекриті більш пізніми післяаварійними шарами. Оскільки верхній шар радіоактивно-забрудненого ґрунту на осушених ділянках днища водоймища є найбільш схильним до водної та вітрової ерозії, висушена поверхня мулу є потенційним джерелом вторинної міграції радіоактивного забруднення на суміжні території. Особливу загрозу при вітровій ерозії несуть саме дрібні ГЧ, які можуть бути перенесені на значні відстані. Наслідки такого процесу значною мірою залежать від сил зчеплення ГЧ з іншими частками мулу та ролі органічної складової мулу в зв'язуванні ГЧ.

Умови відбирання проб, підготування лічильних зразків, одержання авторадіограм описані в [1].

Для відокремлення ГЧ від більш легких часток мулу та ґрунту автори роботи [2] проводили седиментацію часток у важкій рідині. Використання важких рідин на основі концентрованих сольових розчинів, як це було зроблено в [2], може привести до інтенсивної коагуляції часток мулу. Для застосування ж електронейтральних важких органічних рідин типу бромформу ( $\text{CBr}_4$ ,  $\rho \approx 2,9 \text{ г/см}^3$ ) потрібні сухі, слабо зв'язані між собою частки. Але при висушуванні зразків мулу його частки злипаються під дією сил поверхневого натягу, що приводить до незворотних змін їхніх властивостей.

Для вирішення цього протиріччя осад мулистих часток переводили в ацетонітрил (АЛ), який добре змішується як з водою, так і з бромформом. Після збовтування з АЛ осаду давали осісти протягом доби, декантували розчинник і замінювали його порцією чистого АЛ. Процедуру повторювали доки додавання краплі розчинника після відстоювання до бромформу не переставало викликати помутніння.

Схема досліду наведена на рис. 1. З перемішаного зразка сирого мулу були відібрані дві наважки – з однієї визначали вологість зразка та вміст органіки окисленням пероксидом водню [3], друга була розведена водою (1:50),

ретельно перемішана та профільтрована крізь сито 0,2 мм для відокремлення крупних органічних решток. Промитий струменем води і перенесений на лічильний зразок залишок на ситі – фракція Ф1. Після відстоювання фільтрату разом з промивними водами осад був переведений в АЛ та перенесений на шар важкої рідини [ВР] – бромформу.

Після відстоювання протягом доби відокремлювали плаваючу частину - фракція Ф2 та фракцію Ф3 - осад у бромформі. Фракцію Ф2 осаджували додаванням АЛ, осад переносили на новий шар важкої рідини. Повторенням послідовності цих операцій були одержані фракції Ф4 - Ф6.

Після відстоювання фракції Ф6 плаваюча частина була осаджена АЛ та переведена у воду. Далі було проведене окислення органічної складової фракції Ф2 пероксидом водню [3]. Відстоюний осад був переведений в АЛ.

Далі було проведено чотирикратне осадження важких частинок згідно наведеного вище алгоритму з одержанням фракції Ф7 - Ф10. Остання фракція Ф2 була осаджена АЛ. Зауважимо, що плаваючі у ВР частки в процесі відстоювання утворювали рихлі агрегати які, захоплюючи ГЧ, заважали їхньому відділенню.

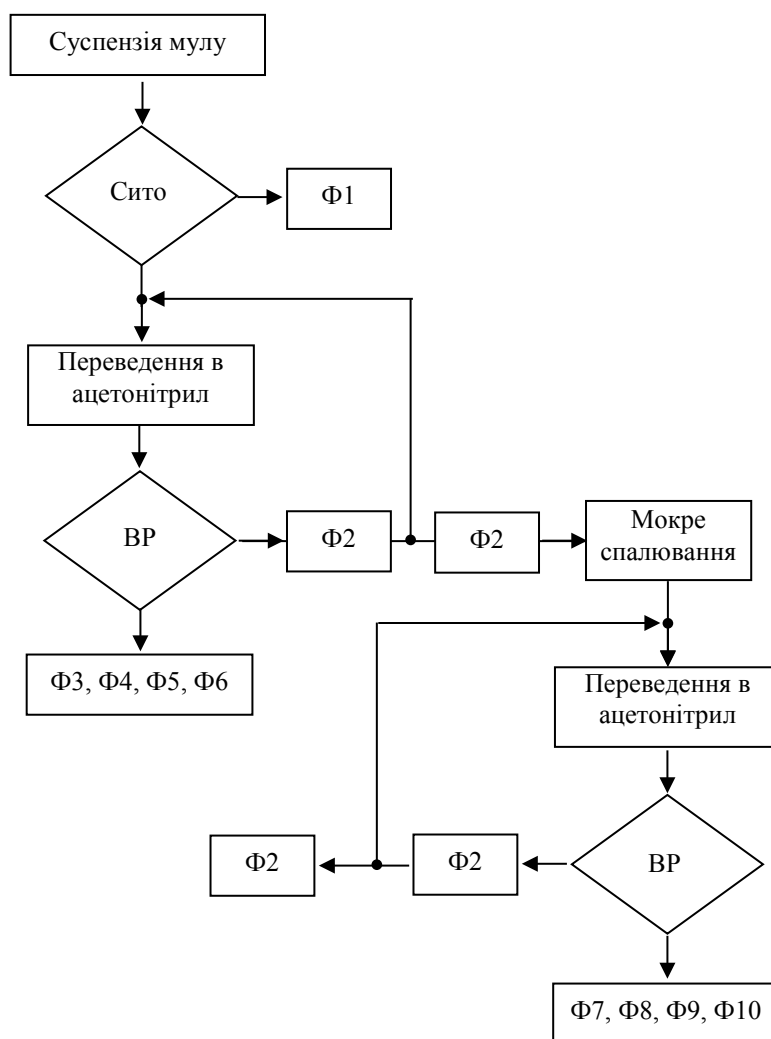


Рис. 1. Схема проведення досліджень.

Фракції Ф1 – Ф10 були перенесені на лічильні зразки для проведення авторадіографії. Для фіксації фракції Ф1 була використана добавка до суспензії 3% желатину, фракції Ф3 – Ф10 в АЛ-суспензії фіксували добавкою 2% каніфолі. Визначені за допомогою авторадіографії активності фракцій наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати авторадіографічного визначення активностей ГЧ фракцій.

Фракція	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6	Ф7	Ф8	Ф9	Ф10
Число ГЧ N	206	6	8	6	8	14	26	14	10
% N	69	2,0	2,7	2,0	2,7	4,7	8,7	4,7	3,4
$A_{\text{фракції}}$	150	81,3	190,7	0,9	2,4	0,8	4,5	0,8	13,0
% $A_{\text{сум}}$	33,8	18,3	42,9	0,2	0,5	0,2	1,0	0,2	2,9
$A_{\text{max}}$	36,8	32,1	125	0,7	2,3	0,24	2,1	0,21	11,6
$A_{\text{min}}$	0,056	0,015	0,021	0,011	0,008	0,005	0,005	0,005	0,005

З даних таблиці бачимо, що не зважаючи на 8 кратне осадження відокремлення ГЧ відбувалось далеко не повністю – не осадженими у складі фракції Ф2 виявились 69% ГЧ, з активністю, що склала 33,8 % від загальної. Після спалювання органіки мулу не відбулось різкого зростання швидкості осідання ГЧ, але дещо зменшились активності найбільш дрібних осаджених ГЧ, що може свідчити на користь гіпотези про деяке зв'язування таких ГЧ органічною складовою мулу. Низька ефективність відділення ГЧ зі зразків мулу за допомогою важкої рідини ймовірно пов'язана з утворенням як міцних агрегатів ГЧ з частками мулу, так званих часток-наїздників, так і кластерів часток мулу у важкій рідині.

With the help of sedimentation method in a heavy liquid, hot (fuel) particles (HP) were separated from the mud of the ChNPP cooling pond. The bromoform  $\text{CHBr}_3$  ( $\rho \approx 2.9 \text{ g / cm}^3$ ) was chosen as the heavy liquid. There fuel particles precipitate out and the main components of the pond mud particles of sand, clay and organic residues break the surface in this liquid. To avoid irreversible adhesion of sludge particles under the action of surface tension forces during drying, the water in the sludge sample was replaced by acetonitrile  $\text{CH}_3\text{CN}$ , which is completely miscible with bromoform. The efficiency of HP separating turned out to be rather low - after 8-fold separation, 69% of the total number of hot particles remained in the floating fraction, which was 33.8% of their total activity. Such low separation efficiency is possibly associated with the formation of both strong aggregates of HPs with sludge particles and clusters of sludge particles in a heavy liquid during sedimentation. Oxidation of sludge organic matter with hydrogen peroxide, carried out after the 4-th precipitation, did not significantly affect the process of HPs separation.

#### Список використаних джерел:

1. Шинкаренко В. К., Паскевич С. А., Талерко М. М., Городецький Д. В. Авторадіографічні дослідження зразків мулу з водойми-охолоджувача ЧАЕС. // Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECО 2020) в режимі он-лайн: збірник

матеріалів IV Міжнародної конференції (27–29 квітня 2020, м. Славутич). – Чернігів: ЧНТУ, 2020. С. 261 – 264.

2. Богатов С. А., Боровой А. А. О некоторых свойствах топливосодержащих частиц, образовавшихся при аварии на Чернобыльской АЭС, и особенностях формирования топливного выброса. // Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова ИАЭ-5444/3. м., 1991. 30 с.

3. ДСТУ ISO 11277-2005. Якість ґрунту. Визначання гранулометричного складу мінерального матеріалу ґрунту. Метод просіювання та седиментації. Держспоживстандарт України, 2006, 59с.



# ОБ'ЄМНА АКТИВНІСТЬ $^{137}\text{Cs}$ В ПОВІТРІ БЛИЖНЬОЇ ЗОНИ ЧАЕС В 2019 РОЦІ

*Шинкаренко В. К., Кашиур В. О., Скоряк Г. Г.*  
*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль,*  
*shynkarenko.viktor@gmail.com*

Відомо, що створення об'єкта «Укриття» (ОУ) повністю не ліквідувало проблему викидів радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище [1,2]. Будівництво нового безпечного конфайнмента (НБК) є одним з основних етапів перетворення 4-го енергоблоку Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС) на екологічно безпечну систему, покликану забезпечити безпеку персоналу, населення та навколишнього середовища [3]. Крім завдання ізоляції 4-го енергоблоку від навколишнього середовища, будівництво НБК повинно забезпечити безпечне проведення робіт із його залишками, при цьому проектом допускаються досить високі рівні об'ємної активності радіоактивних аерозолів всередині НБК – до  $210 \text{ Бк/м}^3$  за загальною бета-активністю [4].

Спорудження НБК суттєво вплинуло на радіоаерозольну ситуацію в ближній зоні ЧАЕС. Спочатку в ході виконання підготовчих робіт і власне будівництва спостерігалися періоди значного підвищення (до  $5 \text{ Бк/м}^3$ ) рівня об'ємних активностей  $^{137}\text{Cs}$ , а відповідно й трансуранових елементів та сумарної бета-активності [5-7]. При цьому високі рівні об'ємних активностей під час будівництва спостерігалися лише поблизу місць виконання робіт і не реєструвалися вже на відстані 0,5 - 1,5 км від них [5]. Після встановлення об'єкта «Арка» та його герметизації об'ємні активності радіоактивних аерозолів на прилеглий території різко знизились [5-7]. Але питання про вплив цього об'єкта на радіоаерозольну ситуацію в ближній зоні залишається відкритим з огляду на заплановані високі рівні при виконанні робіт усередині об'єкта «Арка».

Метою даної роботи є дослідження динаміки аерозольної ситуації в ближній зоні ЧАЕС під впливом НБК на протязі 2017 року.

Відповідно до програми контролю радіаційного забруднення приземного шару атмосфери поблизу об'єкта «Укриття» протягом року працювали чотири фільтровентиляційні установки (ФВУ): ФВУ-1 «Ventmesa» – розташована на схід від санпропускника СП-1430 приблизно за 500 м від південно-західного кута машинного залу; ФВУ-2 «Тайфун» – знаходиться на відстані 1,4 км, біля адміністративного корпусу (АК) ОУ; ФВУ-3 «Град-1.8» була розміщена безпосередньо біля південної стіни машинного залу. Після монтажу об'єкта «Арка» ця ФВУ опинилась усередині НБК, де і продовжує працювати. ФВУ-4 «Град-1.0» розташована з північної сторони 4-го енергоблоку. Матеріал повітряних фільтрів – тканина Петрянова ФПП-15-1,5. Періодичність зміни фільтрів 7 діб.

Динаміка питомої активності повітря в приземному шарі атмосфери поблизу об'єкта «Укриття» протягом 2013 – 2018 рр. представлена в роботі [7], а більш детально протягом 2019 р. - на рис 1. Необхідно відзначити, що на ФВУ, розташованих поза межами НБК, як і в 2018 році [7] спостерігається суттєве зниження об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в порівнянні з роками до будівництва НБК і особливо в період будівництва самого НБК. У той же час

активність  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі під накриттям НБК внаслідок виконання робіт з демонтажу радіоактивно забруднених об'єктів залишалася досить високою. Різкий сплеск активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі під Аркою спричинений обвалом конструкцій в приміщенні 402/3. Той факт, що цей сплеск не проявився на інших ВФУ свідчить про практичну відсутність поширення хмари радіоактивного аерозолі за межі НБК.

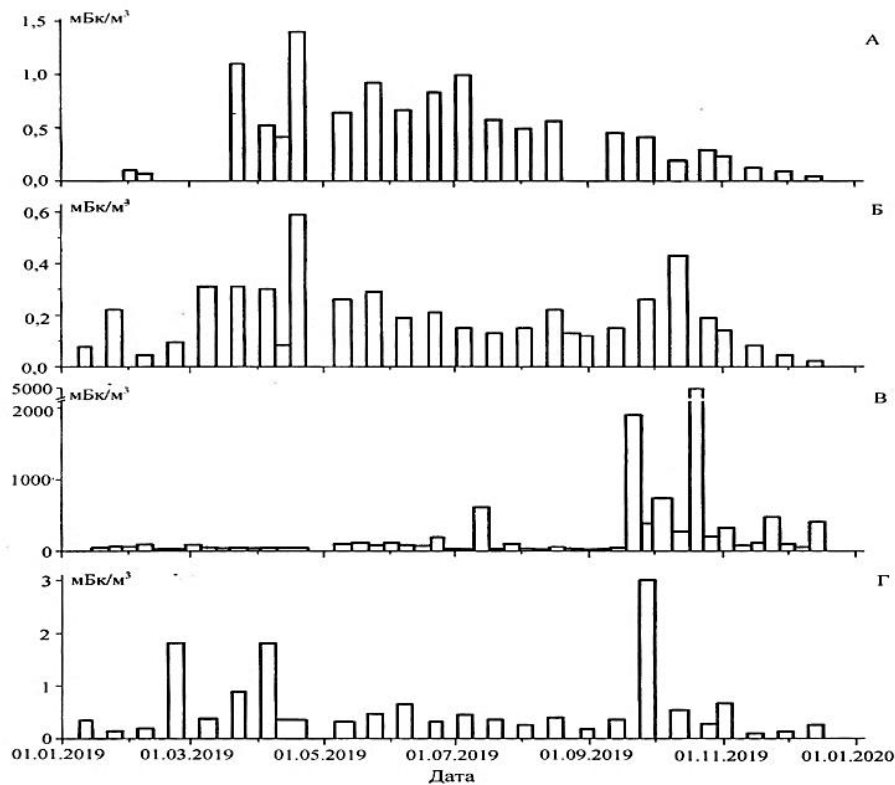


Рис. 1. Динаміка об'ємної активності  $^{137}\text{Cs}$  в повітрі поблизу об'єкта «Укриття». А – ФВУ-1 «Wentmesa»; Б – ФВУ-2 «Тайфун»; В - ФВУ-3 «Град-1.8»; Г – ФВУ-4 «Град-1.0».

### Висновки

1. Після встановлення арки НБК у проектне положення в ближній зоні об'єкта «Укриття» спостерігається зменшення рівня забруднення приземного шару повітря, незважаючи на те що внаслідок проведення монтажних робіт питома активність повітря під накриттям НБК залишається досить високою.

2. Відсутність кореляцій між об'ємними активностями  $^{137}\text{Cs}$  у повітрі всередині (ФВУ-3) і зовні НБК свідчить про відсутність суттєвого впливу виносу радіоактивних аерозолів з-під об'єкта «Арка» на об'ємну активність аерозолі в інших пунктах спостережень.

The construction of a new safe confinement (NSC) is one of the main stages in transforming the 4th power unit of the Chernobyl Nuclear Power Plant into an environmentally safe system designed to ensure safety of personnel, public and environment. In addition to the task of isolating the 4th power unit from the environment, the construction of the NSC should enable safe work with residues of the 4th unit, while the project allows quite high levels of volumetric activity of radioactive aerosols inside the NSC - up to  $210 \text{ Bq/m}^3$  in total beta activity. Data on the

contamination with radioactive aerosols of the near-surface atmosphere in the near zone of the Chernobyl nuclear power plant after the construction of the arch of the NSC are presented. Despite a relatively high specific activity of the air under the NSC roof as a result of building and construction works, there is a decrease in the level of contamination of the surface air layer in the adjacent territory, not only compared to the level during the construction of the “Arch” object, but also to levels preceding the start of construction. The absence of reliable correlations between the  $^{137}\text{Cs}$  volumetric activities in the air inside and outside the NSC indicates the absence of a significant effect of the outside transport of radioactive aerosol from the “Arch” on the radio-aerosol situation in the near zone of the NSC.

#### **Список використаних джерел:**

1. Гаргер Е. К. Физико-химические характеристики аэрозоля 30-километровой зоны ЧАЭС в 1986–2013 гг. / Е. К. Гаргер, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, В. К. Шинкаренко // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2014. – Вип. 23. – С. 54 – 65.
2. Огородников Б. И. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986–2006 гг. : монография / Б. И. Огородников, Э. М. Пазухин, А. А. Ключников. – Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2008. – 456 с.
3. Закон України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» від 11.12.1998 р. № 309-XIV // Відомості Верховної Ради України. – 1999. – № 4. – С. 33.
4. Документ з безпеки в рамках концепції проекту ПК-1 НБК / SIP-N-LI-22-A500\_-CDS-001-01. Revision 1-Appendix. – 2008. – 63 с.
5. Шинкаренко В. К. Оценка аэрозольной радиационной обстановки на промплощадке ЧАЭС во время проведения работ по строительству НБК / В. К. Шинкаренко, В. А. Кашпур, Г. Г. Скоряк, А. К. Калиновский // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2016. - Вип. 27. - С. 58 - 66.
6. Шинкаренко В. К. Новый безопасный конфайнмент і радіоактивні аерозолі в ближній зоні ЧАЕС. / В. К. Шинкаренко, В. А. Кашпур, Г. Г. Скоряк // Ядерна енергетика та довкілля. - 2019. - № 1 (13). – С. 76 – 82
7. Шинкаренко В. К. Радіоактивні аерозолі в ближній зоні Чорнобильської атомної електростанції у 2018 р. / В. К. Шинкаренко, М. М. Талерко, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, О. А. Свирид // Ядерна енергетика та довкілля. - 2020. - № 1 (16). – С. 57 – 67

# ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНСОЛІДОВАНОГО РУХУ АВТОНОМНИХ АГЕНТІВ

*Ярмілко Андрій, Нікітюк Владислав*

*Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького  
м. Черкаси a-ja@ukr.net*

Сучасна практика досліджень і впровадження нових рішень у сфері надзвичайних ситуацій та діяльності в середовищах з небезпечними умовами фокусує увагу на застосуванні, поряд з людським компонентом або автономно, роботизованих пристроїв та штучного інтелекту [1]. При цьому у загальній тематиці досліджень штучного інтелекту важливе місце посідає вивчення взаємодії декількох елементів штучного інтелекту між собою. Підвищення уваги до таких систем обумовлене швидким зростанням парку роботизованих пристроїв та прогнозами щодо їхнього впровадження у найрізноманітніші сфери життя [2, 3]. Радикально нові способи взаємодії, притаманні промисловим практикам за концепцією Industry 4.0, також передбачають взаємодію та співпрацю кіберфізичних систем між собою та з людьми в єдиному безбар'єрному просторі [4, 5].

Методи та засоби управління групами мобільних роботів, як напрям досліджень та практичної діяльності, демонструють інтенсивний розвиток вже протягом двох останніх десятиліть та відомі під назвою «swarm robotic» (групова робототехніка). Увага до використання у прикладних задачах груп роботів цілком виправдана, оскільки вони забезпечують охоплення більшого функціонального простору, надають більш широкий набір функціональних можливостей, підвищують ймовірність успішного виконання завдань. Очевидною є висока складність таких систем та потенційні ризики від використання кіберфізичних пристроїв як окремо, так і у складі груп таких агентів, об'єднаних спільним простором та/або спільними функціональними завданнями. Тому типовим рішенням є застосування моделювання на всіх етапах життєвого циклу пристроїв зі штучним інтелектом.

Серед різноманіття методів та засобів моделювання групової поведінки агентів зі штучним інтелектом використовуються програмні засоби імітаційного моделювання. На жаль, дослідники не завжди мають доступ до систем з функціоналом, придатним для багатофакторного аналізу мультиагентних інтелектуальних систем зі складними сценаріями взаємодії. Зокрема, великий інтерес є до дослідження консолідації груп агентів при виконанні спільних завдань. З огляду на це, нами проводяться роботи зі створення оригінальних програмних засобів моделювання з актуальними для даної постановки задачі можливостями.

Реалізація програмного середовища моделювання поведінки групи автономних самокерованих модулів ґрунтується на моделі, яка будується за біонічними принципами. Даний підхід є доцільним, зважаючи на подібність типових завдань та сценаріїв групової поведінки автономних роботів і представників живої природи. У якості базового прецеденту використано дослідження поведінки зграй риб [6, 7]. Модель угруповання самокерованих агентів представлено графом з визначеною конкретною задачею топологією взаємозв'язків. Консолідація групи має відбуватися за рахунок виконання кожним з агентів маневрів, які формуються та здійснюються ними самостійно на основі спостереження за іншими членами групи. Очевидною є обмеженість

взаємної видимості таких агентів внаслідок ситуативних просторово-геометричних конфігурацій їхнього розташування та характеристик сенсорів (видимими є лише деякі сусіди). Разом з тим, дослідження [6, 7] доводять, що відстань до сусіда не є визначальною для рішення щодо використання спостереження за ним для формування власної траєкторії, а для консолідації зграї достатньо взаємодії особини лише з одним іншим членом угруповання.

Таким чином, у модельованій мультиагентній системі, яка складається з лідера та певної кількості підпорядкованих йому агентів, будь-яка вершина графа має не більше ніж дві дуги, кожна з яких замкнута на сусідів. Одна з дуг однієї вершини з множини агентів обов'язково замкнута на вершину-лідера. Динаміку лідера та агентів описано системами диференціальних рівнянь. Обчислення за такою математичною моделлю дозволяють отримати залежності для знаходження положення та напрямку руху кожного елемента в певний момент часу [8]. Зазначимо, що в ході реалізації задачі було вжито додаткових заходів для зменшення громіздкості формул, запропонованих у згаданому джерелі.

Оскільки реальні прикладні системи з угрупованнями агентів актуального для даного дослідження типу мають значну складність як на рівні опису її топології, структури, алгоритмів функціонування та комунікаційних зв'язків агентів, так і на рівні урахування властивостей функціонального середовища, а деталізація часткових моделей негативно відбиватиметься на конструктивності загальної моделі багатоагентної системи, у запропонованій моделі встановлення консенсусу урахування додаткових чинників було виконано шляхом введення до неї узагальнюючих коефіцієнтів. Таким чином, на базі запропонованого рішення можуть бути побудовані дослідницькі моделі з достатнім рівнем адекватності конкретним прикладним системам.

Для проведення експериментів була сформована дослідна сцена, яка складалася з агента-лідера та шести агентів-переслідувачів. Координати початкового положення агентів, їхній статус у групі та траєкторія руху лідера задавалися експериментатором. Консолідація виконувалася за сценарієм, який наразі реалізовано у моделюючому середовищі: сходження агентів до рухомого лідера. В процесі відпрацювання сценарію в реальному часі відбувається анімаційне відтворення руху групи агентів відповідно до алгоритму стеження за рухом сусідів.

Отримані результати імітаційного моделювання є адекватними властивостям реальних систем-прототипів. На поведінку складових моделі впливають їхнє просторове положення у групі, топологія групи, параметри руху агента-лідера. Варіація результатів експериментів відповідає варіації властивостей досліджуваних моделей. Зокрема, введення стохастичного коефіцієнту дозволило ускладнити поведінку агентів відповідно до реальних ситуацій виконання функціональних завдань у відкритому виробничому просторі зі складними властивостями.

Таким чином, можна очікувати на позитивний ефект від використання програмного середовища моделювання в задачах попередньої перевірки поведінки автономних самокерованих пристроїв (роботів) з метою визначення очікуваних часових характеристик колективного виконання прикладних завдань, визначення оптимального початкового розміщення цих пристроїв, підбору оптимальних характеристик агентів. Подальший розвиток дослідницького середовища вбачається у розширенні його функціональних

можливостей як шляхом поглиблення аналізу динаміки агентів, так і шляхом створення засобів формування модельних сцен з властивостями, наближеними до реальних прототипів, вдосконалення опису властивостей агентів, системи комунікації у групі, розширення номенклатури базових сценаріїв консолідації.

### **Abstract**

The paper focused on the problem of modeling in swarm robotic. The experience of creating a research environment for the study of the consolidated movement of autonomous agents is presented. The choice of the bionic type model is substantiated. The environment provides the creation of a given scenario in real time with an animated reproduction of the movement of a group of agents in accordance with the algorithm for tracking the movement of neighbors. Compliance with real application systems is ensured with a set of parameters describing their topology, structure, algorithms and communication connections of agents. Additional parameters of agents and functional environment are taken into account by introducing a generalizing stochastic coefficient into the model. The results of experiments in the experimental scene, which consisted of a leader agent and several pursuing agents with consolidation according to the scenario of convergence of agents to a moving leader, are presented. The obtained results of simulation modeling are generally adequate to the properties of real prototype systems. The variation of the experimental results corresponds to the variation of the properties of the studied models.

### **Список використаних джерел:**

1. SUCRÉ: Reliability and Resilience for the cooperative control and management of sociotechnical systems: Human(s)-Robot(s) cooperation in hostile environment. LAMIH, <https://www.uphf.fr/LAMIH/en/reliability-and-resilience-cooperative-control-and-management-sociotechnical-systems-humans-robots>
2. Harold L. Sirkin, Michael Zinser, Justin Ryan Rose. The Robotics Revolution. The Next Great Leap in Manufacturing. The Boston Consulting Group (BCG), 2015. – Available at: [https://www.automationsmaland.se/dokument/BCG\\_The\\_Robotics\\_Revolution\\_Sep\\_2015.pdf](https://www.automationsmaland.se/dokument/BCG_The_Robotics_Revolution_Sep_2015.pdf).
3. Аналитическое исследование: Мировой рынок робототехники. НАУРР – 2016. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://robotforum.ru/assets/files/000\\_News/NAURR-Analiticheskoe-issledovanie-mirovogo-rinka-robototehniki-%28yanvar-2016%29.pdf](http://robotforum.ru/assets/files/000_News/NAURR-Analiticheskoe-issledovanie-mirovogo-rinka-robototehniki-%28yanvar-2016%29.pdf).
4. Fourth Industrial Revolution: From Wikipedia, the free encyclopedia. – Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fourth\\_Industrial\\_Revolution](https://en.wikipedia.org/wiki/Fourth_Industrial_Revolution)
5. "As soon as they have to start thinking about safety fencing, most of them opt out". Ulrike Goetz, 7. September 2018, <https://www.blog.kuka.com/2018/09/07/collaboration-and-coexistence/?lang=en>
6. Jiang L, Giuggioli L, Perna A, Escobedo R, Lecheval V, Sire C, et al. (2017) Identifying influential neighbors in animal flocking. PLoS Comput Biol13(11): e1005822. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005822> pmid:29161269
7. Jhawar J., Morris R.G., Amith-Kumar U.R. et al. Noise-induced schooling of fish // Nat. Phys. 16, 488–493 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0787-y>
8. Wen G. Distributed Cooperative Control for Multi-Agent Systems, Ph.D. Thesis, 2013.

# ДОСВІД РЕАБІЛІТАЦІЇ ЗОНИ ВІДСЕЛЕННЯ В ПРЕФЕКТУРІ ФУКУСИМА НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ РАДІОЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЙОГО ВПРОВАДЖЕННЯ ДЛЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ В РАМКАХ ЯПОНСЬКО – УКРАЇНСЬКОГО ПРОЕКТУ SATREPS

*Nanba K.<sup>1</sup>, Насвім О.<sup>2</sup>, Igarashi Y.<sup>1</sup>, Железняк М.<sup>1</sup>, Кірєєв С.<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Institute of Environmental Radioactivity  
at Fukushima University, Fukushima, Japan*

*<sup>2</sup>Державне агентство України управління зоною відчуження*

*<sup>3</sup>Державне спеціалізоване підприємство  
«Екоцентр», Чорнобиль*

**Abstract.** The evacuation order issued in 2011 for the areas at Fukushima - Daiichi NPP in 2016-2018 being lifted for the significant part of the initially evacuation-designated territories. Therefore the area of the restricted territory nowadays diminished to 350 km<sup>2</sup>. We describe the set of the implemented scientifically grounded measures which provide possibilities for remediation of these territories to return population and to revitalize business activities at the initially evacuation-designated areas. Japanese researchers experienced in the radioecological studies in the Fukushima Prefecture together with 12 Ukrainian R&D institutions since 2017 are involved into the project of the Japanese program SATREPS which main goal is strengthening of monitoring and management of Chornobyl Exclusion Zone. The achieved project results and the tasks of the final phase of the project are overviewed.

Аварія 11.03.2011 року на АЕС Фукусіма -Дайічі ( ФДАЕС), що сталася внаслідок землетрусу і цунамі призвела до широкомасштабного радіоактивного забруднення західної і центральної частини префектури Фукусіма в довгостроковій перспективі головним чином за рахунок випадінь <sup>137</sup>Cs. Вже 11 березня була оголошена евакуація мешканців з трьох- кілометрової зони навколо АЕС, а 12 березня було оголошено послідовно про евакуацію з 10-кілометрової зони та 20 -км зони. З 22 квітня зона евакуації була розширена полозою на північний захід від АЕС до населеного пункту Iitate на відстань 30-40 кілометрів в головному напрямку випадінь <sup>137</sup>Cs. Всього було евакуйовано станом на травень 2011 біля 165 тис осіб, що перевищує майже в півтора рази кількість евакуйованого населення з Зони Відчуження ЧАЕС.

Принципової відмінністю адміністративних рішень з управління відселених територій в Японії від ситуації в СРСР після аварії на ЧАЕС було те, що території відселення населення навколо ФДАЕС залишились в управлінні місцевих громад, керуючи органи яких, евакуйовані в інші місця префектури Фукусіма, продовжували управління своїми територіями у взаємодії з органами управління Префектури і державними агенціями Японії, відповідальними за комплекс заходів з радіаційного контролю та реабілітації забруднених територій. Не створювалась на відміну від УРСР нова спеціалізована державна агенція для управління аварійно забрудненими територіями. Збережені органи місцевого управління в префектурі Фукусіма в

значній мірі сприяли прискоренню розробці системи науково обґрунтованих заходів з зняття обмежень на проживання і господарчу діяльність на значній частині територій, населення яких було відселено в 2011 році.

Вже в перші роки після аварії на основі результатів моніторингу і комплексних наукових досліджень було проведено виділення на території проведеної евакуації трьох зон за радіологічними критеріями. "Зона, в яку важко повернутися" включає території найближчі до АЕС, де річна сукупна доза опромінення перевищує 50 мЗв/рік і не спускатиметься нижче 20 мЗв/навіть через 6 років після аварії. Наступна «Зона обмеженого проживання» включає території де річна сукупна доза опромінення становила від 20 до 50 мЗв станом на 2011 р. В цій зоні людям в основному заборонялося залишатися на ніч, але їм дозволялося знаходитись вдень і вести деяку підприємницьку діяльність. "Зони підготовки до зняття наказу про евакуацію", в якій людям переважно заборонялося залишатися на ніч, але їм дозволялось щоденно приїжджати і вести господарську діяльність

Вже в липні 2016 року були зняті обмеження з частини територій "Зони підготовки до зняття наказу про евакуацію" і початкова територія зони евакуації скоротилась до 726 км<sup>2</sup>, а в 2018 році, коли обмеження були зняті не лише в цій зоні, але і в «зоні обмеженого проживання» для районів населених пунктів Iitate, Kawamata, Nami, Tomioka, Katsurao, територія дії наказу про евакуацію зменшилась до 350 км<sup>2</sup>. Для наочності відмітимо, щоб якщо б ця зона біля ФДАЕС мала форму круга, то її радіус був би лише 10.5 км. Підготовка до зняття цих обмежень включала

- детальний моніторинг радіаційного стану території, дослідження міграції радіонуклідів в усіх компартментах навколишнього середовища, забруднення харчових ланцюгів наземних і водних екосистем,

- впровадження системи заходів з дезактивації території і реабілітації сільськогосподарчих угідь,

- реалізацію системи поводження з радіоактивними відходами, що накопичувалися в результаті дезактиваційних заходів.

В умовах також ліквідації наслідків катастрофічного землетрусу 11.03.2011 значна увага приділялась створенню нової житлової і транспортної інфраструктури для населення та інфраструктури для трудової діяльності зі створенням нових робочих місць в перспективних напрямках промислового розвитку – робототехніка, зелена енергетика, медичне приладобудування.

Науковий супровід цієї діяльності разом з науковцями багатьох відомств проводився створеним в 2013 році Інститутом радіоактивності довкілля Університету Фукусіма у тісній співдружності с Центром дослідження ізотопів Університету Цукуба. Ці два наукових колективи у взаємодії з Державним агентством України управління зоною відчуження (ДАЗВ) в 2016 р. ініціювали проект японської програми технічної допомоги та наукової співпраці з країнами світу SATREPS «Покращення радіаційного контролю навколишнього середовища та законодавчої бази в Україні для екологічної реабілітації радіоактивно забруднених територій», бенефіціаром якого є ДАЗВ, а реципієнтами технічної допомоги і партнерами в наукових дослідженнях є 12 наукових установ України. Початково запланований термін виконання проекту



«04.2017- 03.2022», нещодавно було продовжено до березня 2023 року у зв'язку у з неможливістю робіт японських дослідників в Україні в період пандемії COVID-19.

Проект «SATREPS-Чорнобиль» включає чотири головних цілі:

1. Дослідження забруднення Водойми -охолоджувача ЧАЕС (ВО) та гідрогеологічного середовища й екосистем навколо нього, прогнозування змін навколишнього середовища, які будуть спричинені зниженням рівня Водойми-охолоджувача.

2. Моніторингові дослідження і прогнози ризиків і шляхів міграції радіонуклідів в лісах та водних системах

3. Розвиток системи моніторингу та бази даних щодо радіоактивних аерозолів, які генеруються лісовими пожежами та розробка моделей, верифікованих на основі даних моніторингу лісових пожеж.

4. Підготовка разом з українськими фахівцями на основі результатів перших трьох тем пропозицій щодо покращання системи управління Зоною відчуження, а саме для уточнення зон її використання в задачах відновлення навколишнього середовища та промислового використання, в тому числі з урахуванням задач підтримки функціонування НБК ЧАЕС, поводження з радіоактивними відходами та радіаційного захисту відвідувачів ЗВ.

З урахуванням досвіду досліджень в префектурі Фукусіма японські дослідники рекомендували українським установам новітнє наукове обладнання для польових і лабораторних досліджень. На поточній стадії проекту більшість з цього переліку обладнання на загальну суму біля 1.3 млн доларів вже отримане в Україні в якості технічної допомоги, встановлено в інститутах реципієнтах проекту і вже використовувалось для моніторингу в тому числі для вимірювань під час лісових пожеж 2020 року. Результати досліджень і нові технічні засоби вимірювань вже впроваджуються в розвиток системи радіаційного моніторингу ЗВ, яка управляється ДСП «Екоцентр». Отримані нові наукові результати щодо міграції  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  в у воді, ґрунті, повітрі, біологічних об'єктах Зони відчуження, які представляються в нових наукових публікаціях в рейтингових міжнародних виданнях. В 2017-2019 роках українськи науковці і фахівці з управління Зоною відчуження мали змогу ознайомитись з досвідом наукових досліджень і управлінських рішень з реабілітації території в префектурі Фукусіма.

Важливим завданням заключної фази проекту до березня 2023 року стане впровадження результатів досліджень сучасного стану міграції радіонуклідів в навколишньому середовищі заснованого на моделюванні, прогнозуванні ризиків збільшення виносу радіонуклідів із Зони відчуження в надзвичайних ситуаціях природного і техногенного характеру в реалізацію Завдання 4, - підготовку спільних рекомендацій з покращання управління Зоною відчуження в тому числі за рахунок наукового обґрунтованого зонування території ЗВ для різних видів діяльності. Успішне виконання цього завдання буде залежати від спільних зусиль японських і українських науковців та ДАЗВ з розробки таких документів і подальшої взаємодії ДАЗВ з Держатомрегулювання і комісіями Верховної ради України, щодо внесення відповідних змін в законодавстві для впровадження в управління Зоною Відчуження.





**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**

**VI Міжнародна конференція**

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

**Sixth International Conference  
on Nuclear Decommissioning  
and Environment Recovery  
INUDECO 21**

(27–29 квітня 2021 року, м. Славутич)

Збірник матеріалів

Комп'ютерна верстка і макетування

К. П. Гузь

Підписано до друку 23.03.2021. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. – 18,14.  
Тираж 150 пр. Замовлення № 10/21.

---

Редакційно-видавничий відділ Національного університету «Чернігівська політехніка»  
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,  
виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції  
серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.