

ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ДОВКІЛЛЯ

NUCLEAR POWER AND THE ENVIRONMENT



Науково-технічний журнал

ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ДОВКІЛЛЯ

NUCLEAR POWER AND THE ENVIRONMENT

№ 2 (30) 2024

Співзасновники:

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій
Національної академії наук України (ІПБ АЕС НАН України),
ГО «Українське ядерне товариство»

Виходить до 4 разів на рік

Внесено до Реєстру суб'єктів у сфері медіа
Національної ради України з питань телебачення
та радіомовлення (Рішення № 791 від 31.08.2023 р.,
ідентифікатор медіа R30-01221)

Видання входить до затвердженого Департаментом
атестації кадрів МОН України переліку фахових видань
(Наказ Міністерства освіти і науки України
№ 1643 від 28.12.2019 р.)

Адреса редакції:

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій
НАН України,
03028, м. Київ, вул. Лисогірська, 12, тел.: (044) 525-24-72
E-mail: i.kutsyna@isnpp.kiev.ua

Затверджено до друку вченою радою ІПБ АЕС НАН України
(протокол № 9 від 10 вересня 2024 р.)

Підписано до друку 04.11.2024. Формат 60 × 90 1/8
Папір крейдяний. Друк офсет. Умов. друк. арк. 11
Тираж 120 пр. Зам. № 450

Віддруковано ФОП Капінус Геннадій Миколайович,
04210, м. Київ, вул. Малиновського, 28, кв. 49

Головний редактор

Носовський А. В., акад. НАН України, д-р техн. наук, проф.
(ІПБ АЕС НАН України)

Заступник головного редактора

Паскевич С. А., канд. біол. наук (ІПБ АЕС НАН України)

Редакційна колегія

Бондарьков М. Д., д-р техн. наук (ДНДУ «Чорнобильський
центр з проблем ядерної безпеки, радіоактивних відходів
та радіоекології»),

Борисенко В. І., д-р техн. наук (ІПБ АЕС НАН України),

Васильченко В. М., канд. техн. наук, заслужений енергетик
України,

Габелков С. В., д-р фіз.-мат. наук (ІПБ АЕС НАН України),

Дубковський В. О., д-р техн. наук, проф. (ОНПУ),

Кравченко В. П., д-р техн. наук, проф. (ОНПУ),

Корольов О. В., д-р техн. наук, проф. (ОНПУ),

Прістер Б. С., акад. УААН, д-р біол. наук, проф. (ІПБ АЕС
НАН України),

Протасов О. О., д-р біол. наук, проф. (Інститут гідробіоло-
гії НАН України),

Пишико Г. М., д-р хім. наук (ІКХХВ ім. А. В. Думанського
НАН України),

Рязанов В. В., д-р фіз.-мат. наук (ІЯД НАН України),

Талерко М. М., д-р техн. наук (ІПБ АЕС НАН України),

Шараєвський І. Г., д-р техн. наук (ІПБ АЕС НАН України),

Hyatt N., PhD, BSc, проф. (Ун-т Шеффілда, Велика Британія),

Pretzsch G., Dr. (GRS, Німеччина),

Schillebeeckx P., Dr. (JRC, Бельгія),

Washiya T., Dr. (IAEA, Японія)

Відповідальний секретар

Куцина І. В. (ІПБ АЕС НАН України)

Літературне редагування Троян Л. М. (ІПБ АЕС НАН України)

Комп'ютерна верстка Лютого А. О. (ІПБ АЕС НАН України)

© Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, 2024

© ГО «Українське ядерне товариство», 2024

ЗМІСТ

<i>І. Г. Шараєвський</i> Розпізнавання аварійного режиму погіршеної тепловіддачі в каналах перспективних легководних реакторів із надкритичними термодинамічними параметрами	3
<i>І. С. Скітер, В. В. Деренговський, В. М. Рудько</i> Порівняння майданчиків розміщення АЕС методом експертного оцінювання параметричних критеріїв.....	13
<i>Д. І. Хвалін</i> Актуальність і технічні можливості відмови від водневого охолодження турбогенераторів атомних електростанцій.....	23
<i>І. О. Павленко, О. В. Святун, О. В. Сваричевська, О. В. Гайдар, С. В. Телецька</i> Аналіз радіаційного забруднення в зоні впливу дослідницького ядерного реактора Інституту ядерних досліджень НАН України та створення комплексної інформаційної системи «Моніторинг та безпека»	31
<i>О. В. Балан, Л. І. Павловський, С. С. Підберезний, В. М. Рудько</i> Щодо доступу персоналу в зони розташування нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», що підлягають демонтажу	38
<i>О. В. Михайлов, М. В. Савельєв, М. А. Пантін</i> Результати контролю потужності еквівалентної дозы γ-випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» ЧАЕС.....	51
<i>K. V. Simeiko, O. P. Kozhan, M. A. Sydorenko, V. S. Ryabchuk, K. V. Lobach, O. M. Skoblyk, V. S. Havrylenko, P. A. Sabienin</i> Thermodynamic calculations and hydrodynamic studies of the process of high-temperature purification of graphite in an electrothermal fluidized bed.....	61
<i>О. Г. Тищенко, П. В. Півовар, Н. М. Цидик</i> Оцінка впливу наслідків природних пожеж на лісові екосистеми за даними космічного знімання і таксаційного обстеження лісових насаджень	72
Правила для авторів	84

CONTENTS

<i>I. G. Sharaievskyi</i> Identification of emergency mode of deteriorated heat transfer in channels of advanced light water reactors with supercritical thermodynamic parameters	3
<i>I. S. Skiter, V. V. Derenhovskyi, V. M. Rudko</i> Comparison of NPP siting sites by expert evaluation of parametric criteria.....	13
<i>D. I. Khvalin</i> Actuality and technical possibility of refusal of turbogenerators hydrogen cooling of nuclear power plants	23
<i>I. O. Pavlenko, O. V. Sviatun, O. V. Svarychevska, O. V. Gaidar, S. V. Teletska</i> Analysis of radiation pollution in the zone of influence of the research nuclear Reactor of the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine and the creation of an integrated information system "Monitoring and Safety"	31
<i>O. V. Balan, L. I. Pavlovsky, S. S. Pidbereznyi, V. M. Rudko</i> Regarding personnel access to the location area of the Shelter object unstable structures to be dismantled.....	38
<i>V. O. Mykhailov, M. V. Saveliev, M. A. Pantin</i> Results of monitoring of equivalent dose of γ-radiation in the Shelter object rooms.....	51
<i>K. V. Simeiko, O. P. Kozhan, M. A. Sydorenko, V. S. Ryabchuk, K. V. Lobach, O. M. Skoblyk, V. S. Havrylenko, P. A. Sabienin</i> Thermodynamic calculations and hydrodynamic studies of the process of high-temperature purification of graphite in an electrothermal fluidized bed.....	61
<i>O. G. Tyshchenko, P. V. Pyvovar, N. M. Tsydyk</i> Assessment of the effects of fires on forest ecosystems based on space survey data and forest plantation survey data	72
Author Guidelines	84

І. Г. Шараєвський*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна*

Розпізнавання аварійного режиму погіршеної тепловіддачі в каналах перспективних легководних реакторів із надкритичними термодинамічними параметрами

Ключові слова:

реактори з надкритичними термодинамічними параметрами теплоносія, теплообмін на поверхні тепловіддачі тепловидільних елементів, автоматична діагностика, спектральна структура діагностичних сигналів

Розглянуто визначальні фізичні відмінності виникнення режиму погіршеної тепловіддачі в активній зоні реакторної установки з надкритичними термодинамічними параметрами (НКТП). Конкретизовано головні діагностичні принципи автоматичної ідентифікації аварійного теплогідрравлічного режиму погіршеної тепловіддачі, що має бути своєчасно виявлений у створюваних перспективних реакторах із НКТП теплоносія. Сформульовано засадничі принципи побудови перспективних систем внутрішньореакторного контролю для легководних реакторів із НКТП. Показано, що ядро математичного забезпечення для перспективних систем внутрішньореакторного контролю реакторів із НКТП легководного теплоносія мають складати інтелектуальні процедури автоматичного розпізнавання початкових фаз виникнення псевдокипіння, що передують руйнації оболонки тепловидільного елемента в режимі погіршеної тепловіддачі. Запропоновано математичну модель превентивної діагностики аварійного режиму погіршеної тепловіддачі, яка має у своїй основі процедури побудови роздільної гіперплощини в багатовимірному ознаковому просторі.

Вступ

Проблема суттєвого підвищення рівня експлуатаційної безпеки та надійності обладнання сучасних АЕС із реакторами основних енергетичних типів має комплексний і системний характер. Не меншою мірою гострота і складність цієї міждисциплінарної проблеми проявляє себе і під час створення перспективних ядерних реакторів (ЯР) з надкритичними термодинамічними параметрами (НКТП) легководного теплоносія для майбутніх АЕС. Відповідно до виконаного в роботах [1, 2] аналізу стану розробок пілотних проєктів дослідно-промислових зразків легководних ЯР з НКТП теплоносія, які активно розробляються в низці провідних країн світу, реалізація цієї проблеми зумовила необхідність попереднього

виконання значного обсягу наукових досліджень, які тривають і донині. Дійсно, створення цих реакторних установок (РУ) наступного, четвертого, покоління поставило на порядок денний наявність всебічно обґрунтованої інформації з низки фундаментальних проблемних питань фізики РУ з НКТП, включаючи практично недосліджену теплофізику виникнення та динаміку розвитку специфічних для цього типу ЯР аварійних теплогідрравлічних процесів (ТГП) на поверхні тепловидільних елементів (ТВЕЛ). Зазначені ТГП розглядаються розробниками цих перспективних реакторів як необхідна передумова для успішного створення цієї новітньої ядерної енерготехнології, історія розробки якої налічує кілька десятиліть. Відомо, що на початку досліджень цієї технології понад півстоліття тому технічні переваги перспективних

реакторів із НКТП, як вважали ініціатори їхнього створення, є незаперечними. При цьому зазначені переваги мали включати не тільки високі техніко-економічні показники термодинамічного циклу ЯР з НКТП, але й підвищений рівень безпеки та надійності цих РУ. Але висока технологічна складність розроблюваної енергетичної технології зумовила гостру потребу в наявності нових, поглиблених фізичних уявлень про ТГП, що реалізуються в активній зоні (АкЗ) уже на молекулярному рівні. З'ясувалося, що ці процеси є критично важливими для адекватного опису мікрокінетики пристінкового шару надкритичного теплоносія на поверхні ТВЕЛ, аварійної динаміки теплогідравлічних режимів у структурі тепловидільних збірок (ТВЗ) ЯР з НКТП, а також молекулярної кінетики умов виникнення та розвитку аварійного режиму погіршеної тепловіддачі, що є характерним лише для РУ з НКТП легководного теплоносія. Очевидно, що відсутність у розробників ЯР з НКТП фундаментальних знань із цих проблемних питань сьогодні зумовила значний дефіцит визначальної інформації для створення фізично обґрунтованої розрахункової бази, без якої прийнятна надійність теплогідравлічного розрахунку ЯР з НКТП не може бути забезпечена.

Як засвідчили нещодавні публікації, зокрема [3, 4], сучасний етап досліджень та розробок перспективних ЯР з НКТП зумовив також пріоритет невідкладного вирішення комплексу актуальних проблем із забезпечення експлуатаційної безпеки зазначених реакторів. Визначальним є те, що реалізація цієї безпекової проблематики має на меті розробку якісно нового функціоналу контролю створюваних ЯР з НКТП, який за своїм діагностичним змістом принципово відрізняється від наявних детермінованих методів оперативного моніторингу та діагностики технічного стану АкЗ легководних РУ з докритичними параметрами теплоносія, насамперед таких як ВВЕР.

У цьому контексті в нещодавній публікації [5] було конкретизовано ті визначальні фізичні відмінності виникнення та розвитку аварійних ТГП на поверхні ТВЕЛ, що є характерними для створюваних ЯР з НКТП. З урахуванням визначальних аспектів аварійної динаміки розвитку режиму погіршеної тепловіддачі в АкЗ цих РУ в зазначеній роботі фізично обґрунтовано принципові відмінності між процедурами діагностики кризових з точки зору теплообміну явищ на поверхні ТВЕЛ, що здатні виникати у водоохолоджуваних докритичних ЯР типу ВВЕР, та виявленням аварійного режиму погіршеної тепловіддачі

в ЯР з НКТП. З огляду на зазначені фізичні відмінності аварійних режимів у РУ з до- та надкритичними термодинамічними параметрами в роботі [5] системно обґрунтована обмеженість застосування детермінованих підходів, що реалізуються комплексами оперативного моніторингу поточного експлуатаційного стану АкЗ реакторів типу ВВЕР. Утім, відповідно до даних роботи [4], функціональна обмеженість детермінованих алгоритмів моніторингу АкЗ, що їх реалізують сучасні системи внутрішньореакторного контролю (СВРК) легководних докритичних РУ, є добре відомою фахівцям.

З огляду на вищезазначене та з урахуванням розглянутих у [5] визначальних особливостей молекулярної кінетики процесу виникнення та розвитку на поверхні ТВЕЛ в ЯР з НКТП режиму погіршеної тепловіддачі доцільно відзначити головні діагностичні принципи автоматичної ідентифікації цього аварійного теплогідравлічного режиму, що має бути своєчасно виявленим в АкЗ ЯР з НКТП перспективною СВРК. При цьому слід підкреслити, що: а) виникнення аварійного режиму погіршеної тепловіддачі має бути автоматично виявлене на початковій фазі його утворення; б) ядро математичного забезпечення для створюваних СВРК надкритичних РУ мають складати насамперед інтелектуальні процедури автоматичного розпізнавання потенційно небезпечних початкових фаз виникнення режиму погіршеної тепловіддачі в ТВЗ; в) висока інформативність спектральних складових діагностичних сигналів, сформованих на основі режимних параметрів АкЗ РУ з НКТП, передусім тиску (зокрема, акустичної емісії процесу псевдокипіння на поверхні ТВЕЛ) та флуктуацій нейтронного потоку в АкЗ (особливо нейтронного шуму в ТВЗ) має бути ефективно використана в розроблюваних алгоритмах превентивної діагностики режиму погіршеної тепловіддачі.

Таким чином, на основі представленого вищестислого огляду сучасної проблематики безпеки перспективних ЯР з НКТП слід відзначити таке. По-перше, розробка безпекового функціоналу перспективних технічних засобів оперативного контролю цих РУ з метою раннього автоматичного виявлення аварійних ТГП в їхніх ТВЗ є актуальним науковим завданням. По-друге, розробка методології та відповідних математичного та програмно-алгоритмічного забезпечення для цього функціоналу безпеки є очевидним пріоритетом. Практичній реалізації зазначених актуальних завдань і присвячено представлену публікацію.

Аналіз фізичних передумов превентивної діагностики погіршеної тепловіддачі в надкритичних реакторах

Відомо [3–5], що аварійний режим погіршеної тепловіддачі може непередбачувано виникати на поверхні ТВЕЛ у каналах із НКТП навіть за умови підтримання безперервного штатного охолодження цієї поверхні плинном турбулентного надкритичного теплоносія. При цьому інтегральною фізичною ознакою виникнення зазначеного ТГП, що є притаманним лише надкритичній термодинамічній зоні, вважається значне погіршення тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, яка непередбачувано стає аномально низькою, чим спричиняє її перегрів та невідворотну наступну руйнацію. З огляду на фізичні прояви режиму погіршеної тепловіддачі в аналізі [5] на основі відомих результатів досліджень інтегральних теплогідравлічних характеристик та мікрофізичних ефектів в умовах плину води надкритичних параметрів у циліндричному експериментальному каналі, що їх наведено в попередній роботі [4], було обґрунтовано наукову гіпотезу щодо фізичної природи та динаміки розвитку цього аварійного режиму тепловіддачі. Показово, що головні теплофізичні засади цієї гіпотези пояснюють процес виникнення та подальшого еволюційного погіршення тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ в області НКТП, у першу чергу, ефектами молекулярної кінетики, що реалізуються в пристінковому шарі надкритичного теплоносія. Таким чином, відповідно до даних досліджень [4, 5], засадничими постулатами сформульованої гіпотези є такі:

- 1) між фазовим переходом в умовах кипіння з недогрівом за докритичних термодинамічних параметрів та процесом псевдофазового переходу в надкритичній області існує аналогія, основою якої є доведений факт визначального впливу фізики поверхневих ефектів на формування границь фазового розділу в до- та надкритичній області;

- 2) виникнення перших псевдопарових утворень у зоні НКТП, що їх генерують рухомі осердя турбулентних вихорів у пристінковому шарі в безпосередній близькості до поверхні ТВЕЛ, становить необхідну фізичну передумову для наступного переходу цього аномального теплогідравлічного стану поверхні тепловіддачі до її передаварійного режиму, яким є нестабільне псевдоплівкове кипіння;

- 3) подальша еволюція передаварійного режиму на основі коагуляції нестабільних псевдопарових утворень сприяє їхній гідродинамічній стабілізації

на поверхні ТВЕЛ і фізично зумовлює поступове погіршення тепловіддачі з цієї поверхні, яке відповідає умовам початку аварійного підвищення її температурного стану.

З огляду на розглянуту вище аварійну динаміку послідовної зміни характеру теплообміну в області НКТП у процесі виникнення та подальшого розвитку макромолекулярних ансамблів у вигляді псевдопарових утворень фізично обґрунтованим видається превентивний підхід до реалізації раннього виявлення аварійного режиму погіршеної тепловіддачі на основі автоматичного розпізнавання початку процесу псевдокипіння надкритичного теплоносія, що розглядається далі. З огляду на це та відповідно до даних досліджень [4, 5] простір діагностичних ознак, які можуть бути сформовані на основі спектральної структури сигналів акустичної емісії процесу псевдофазового переходу, дає змогу виявити визначальні особливості цієї трансформації, що реалізується на молекулярному рівні. Наочною ілюстрацією високої інформативності спектральних сигнатур цих сигналів, особливо в зоні початку псевдофазового переходу в області НКТП, можуть слугувати наведені на рис. 1 спектрограми початку псевдокипіння води в експериментальному циліндричному каналі з внутрішнім діаметром 6,3 мм та довжиною обігріву 0,6 м за величини тиску теплоносія $P = 23,5$ МПа; його масової швидкості $\rho w = 250$ кг/(м²с); вхідної температури $T_{\text{вх}} = 250$ °С та різних рівнів густини теплового потоку q з роботи [5].

У контексті аналізу частотної структури наведених на рис. 1 спектральних сигнатур пульсацій тиску надкритичного теплоносія в експериментальному каналі слід звернути увагу на їхні визначальні особливості. Так, спектр, представлений на рис. 1, а, відповідає умовам відсутності теплового навантаження поверхні тепловіддачі за наявності в експериментальному каналі циркуляції надкритичного теплоносія. Показово, що присутність у низькочастотній частині цього спектра інтенсивних спектральних складових акустичного шуму, що генерується в контурі за відсутності теплового навантаження поверхні тепловіддачі, свідчить про визначальний вплив на формування відповідного акустичного поля імпульсів тиску, що їх генерує насосна група контуру. Остання, відповідно до гідравлічної схеми стенду з роботи [4], забезпечує рух надкритичного теплоносія в експериментальному каналі. Крім того, показовим є спектр на рис. 1, б, зареєстрований за наявності суттєвого теплового навантаження робочої поверхні експери-

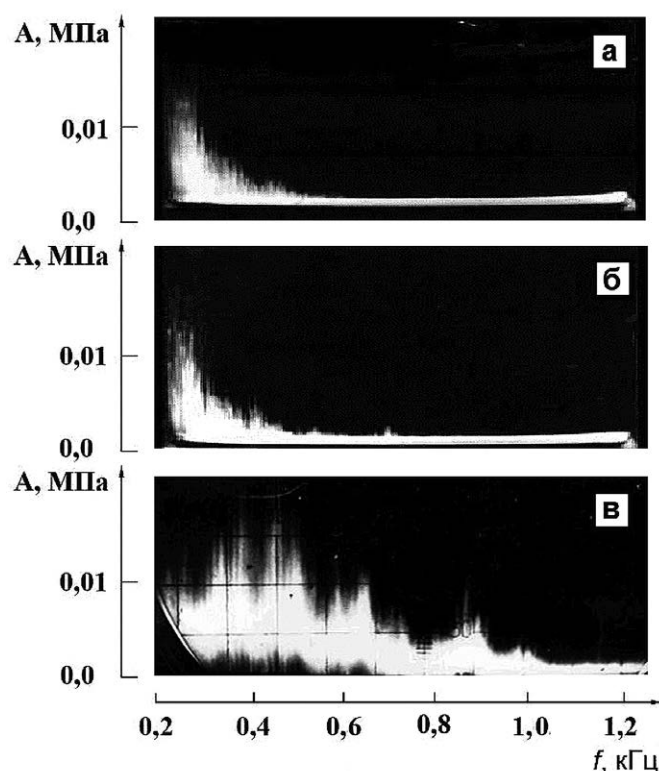


Рис. 1. Спектральна структура сигналів акустичної емісії початку псевдокипіння води в області НКТП у разі поступового підвищення густини теплового потоку за даними [5] (A – амплітуда пульсації, f – частота пульсації): а — $\rho w = 250 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$, $T_{\text{вх}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 0$ — теплове навантаження відсутнє; б — $\rho w = 250 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$, $T_{\text{вх}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 280 \text{ МВт/м}^2$ — псевдокипіння відсутнє; в — $\rho w = 250 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$, $T_{\text{вх}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 0,325 \text{ МВт/м}^2$ — початок псевдокипіння надкритичного теплоносія

ментального каналу. Тепловіддача від цієї поверхні реалізується в режимі турбулентної конвекції до однофазного потоку «гарячого газу» з надкритичного теплоносія, що рухається вздовж поверхні нагріву робочої ділянки каналу.

Характерним для спектра, зображеного на рис. 1, б, є збереження його низькочастотної структури, яка, подібно до спектра на рис. 1, а, є сформованою виключно акустичним шумом насосної групи циркуляційного контуру. З огляду на вищенаведені спектральні сигнатури показовою є статистична усталеність спектральних компонент на рис. 1, а і б та їхній низькочастотний характер, який свідчить про відсутність псевдофазового переходу на поверхні тепловіддачі в області НКТП. Цей висновок підтверджується експериментальними даними, що їх наведено в роботах [4, 5]. Звертає на себе увагу формування в спектральній структурі на рис. 1, в розвиненої високочастотної області, виникнення якої спричинено початком процесу псевдофазового переходу в умовах подальшого збільшення густини теплового потоку на поверхні тепловіддачі робочої ділянки експериментального каналу.

Відповідно до даних [4, 5], цей процес фізично проявляє себе як виникнення в каналі макромолекулярних утворень надкритичного теплоносія, що генеруються випадково розподіленими у пристінко-

вому шарі осердями турбулентних вихорів. Показовим у цьому контексті є той факт, що дані досліджень з аналізу спектральної структури акустичного шуму процесу кипіння докритичного теплоносія добре корелюють із вищезазначеною фізичною гіпотезою з роботи [5] щодо існування фізичної аналогії між процесами фазового та псевдофазового переходу, які реалізуються відповідно в докритичній та надкритичній термодинамічних областях. Саме про наявність такої аналогії наочно свідчить амплітудно-частотна структура спектрів акустичного супроводу основних режимів кипіння теплоносія, системний аналіз якої виконано в роботах [4, 5], а також характерний вигляд широкополосних спектральних ознак процесу псевдокипіння, представлених у наведених на рис. 1, в спектральній сигнатурі процесу акустичної емісії псевдофазового переходу в області НКТП.

Таким чином, з огляду на наведені вище результати аналізу фізичних передумов для реалізації процедур превентивної діагностики режиму погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в АкЗ ЯР з НКТП за шумами технологічних параметрів РУ необхідно підкреслити таке.

1. Мікрокінетичні процеси, що реалізуються у пристінковому шарі надкритичного теплоносія і зумовлюють утворення макромолекулярних ансамблів у вигляді псевдопарових утворень, є безпосередньою

причиною їхнього подальшого динамічного переходу до просторової коагуляції в безпосередній близькості до поверхні ТВЕЛ.

2. Просторова коагуляція псевдопарових утворень у плинні надкритичного теплоносія біля поверхні тепловіддачі ТВЕЛ призводить до теплової ізоляції цієї поверхні від турбулентного однофазного потоку «гарячого газу» і створює тим самим необхідні передумови для подальшого розвитку аварійного режиму погіршеної тепловіддачі.

3. Спектральні структури процесу акустичної емісії режимів псевдофазового переходу в області НКТП містять достатню фізичну інформацію щодо виникнення початкових фаз та можливої подальшої динаміки мікрокінетичних процесів, що реалізуються у пристінковому шарі надкритичного теплоносія.

4. Наявність статистичного зв'язку між режимом початку псевдофазового переходу на поверхні ТВЕЛ та спектральними параметрами процесу акустичної емісії цього режиму слід розглядати як необхідну передумову для розробки обчислювальних процедур з автоматичного розпізнавання аварійного режиму погіршеної тепловіддачі на початкових стадіях його виникнення.

5. Обчислювальні алгоритми автоматичного розпізнавання початкових фаз процесу псевдокипіння у пристінковому шарі надкритичного теплоносія слід розглядати як функціональне ядро перспективних технічних засобів превентивної діагностики аварійного режиму погіршеної тепловіддачі у структурі СВРК створюваних ЯР з НКТП.

6. Розробка математичного та програмного забезпечення для реалізації процедур превентивної діагностики потенційно небезпечних нештатних теплогідрравлічних режимів АкЗ ЯР із НКТП має розглядатися як засаднича основа функціоналу безпеки перспективних надкритичних реакторів.

Таким чином, підсумовуючи наведені результати аналізу фізичних ознак аварійної динаміки процесу виникнення режиму погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в області НКТП, можна конкретизувати такі пріоритетні напрями наукових розробок та пов'язані з ними актуальні завдання зі створення функціоналу безпеки перспективних СВРК для створюваних ЯР з НКТП:

1) створення методології автоматичного розпізнавання початкових фаз виникнення процесу псевдофазового переходу в області НКТП;

2) розробка алгоритмічного та програмного забезпечення для реалізації процедур автоматичного

розпізнавання аномального теплогідрравлічного режиму початку псевдокипіння на поверхні ТВЕЛ за шумами технологічних параметрів АкЗ перспективних ЯР з НКТП;

3) відпрацювання методології превентивної діагностики АкЗ ЯР з НКТП на основі використання спектральних параметрів сигнатур акустичної емісії процесу псевдофазового переходу в експериментальному каналі в надкритичній області.

Очевидно, що важливою складовою конкретизованих вище напрямів розробок є насамперед математична формалізація розглянутої вище в загальних рисах фізичної концепції превентивної діагностики аварійного режиму погіршеної тепловіддачі в АкЗ ЯР з НКТП. З огляду на це математичній формалізації запропонованої в цій роботі комп'ютерної моделі автоматичного розпізнавання початкових фаз псевдофазового переходу та практичний перевірці цієї моделі присвячено наступні розділи цієї публікації.

Математична формалізація задачі превентивної діагностики режиму погіршеної тепловіддачі

З позицій конкретизованих у вступі до цієї публікації завдань щодо розробки та практичної реалізації запропонованого автором превентивного діагностичного підходу до раннього виявлення в АкЗ ЯР з НКТП початку виникнення на поверхні ТВЕЛ режиму погіршеної тепловіддачі, у роботі [5] теоретично обґрунтовано засадничі питання обчислювальної реалізації процедури автоматичного розпізнавання. Її головний принцип полягає в реалізації алгоритму ідентифікації двох різних класів фізичних об'єктів, зокрема теплогідрравлічних режимів, кожен з яких представлено окремим вектором у багатовимірному ознаковому просторі і компактно займає в ньому, відповідно до своєї приналежності, певну область. При цьому процедура розпізнавання невідомого вектора полягає у визначенні його орієнтації відносно до попередньо побудованої гіперповерхні, що розділяє дві компактні групи фізичних об'єктів, приналежність яких є попередньо відомою. Ці групи, що представлені кінцевими масивами спектральних реалізацій, становлять вихідну статистичну вибірку для попереднього навчання системи розпізнавання.

Запропонована модель автоматичної ідентифікації випадкових об'єктів передбачає застосування відомої в теорії розпізнавання образів концепції мінімізації середнього ризику формування помил-

кових діагностичних рішень. При цьому зазначена концепція мінімізації передбачає заміну невідомого функціоналу середнього ризику близькою за своїм змістом функцією $R_{\text{емп}}(\gamma)$. Реалізація цієї заміни передбачає виконання наведених нижче основних етапів з мінімізації функціоналу R_γ .

Етап 1. Пошук (на основі вибірки випадкових векторів розпізнаваних класів $X_1, X_2, \dots, X_r$) параметра $\gamma = \gamma^{\text{опт}}$, що забезпечує $\min R_{\text{емп}}(\gamma^{\text{опт}})$.

Етап 2. Визначення (на основі параметра $\gamma = \gamma^{\text{опт}}$) пошукової функції $G[\gamma^{\text{опт}}(X)]$.

У контексті аналізованого геометричного підходу до розпізнавання випадкових об'єктів визначальним є той факт, що реалізація вищевказаних етапів 1, 2 на основі методу впорядкованої мінімізації ризику фактично зводиться до формування в N -вимірному ознаковому просторі з апіорно заданою навчальною послідовністю, представленою кінцевими множинами $X_1 = x_1, \dots, x_a; X_2 = x_1, \dots, x_b$ гіперплощини Γ , що розділяє опуклі оболонки X_1 та X_2 множини $A(M=2)$ так, що $\rho = \max$. При цьому варто підкреслити, що дві кінцеві множини векторів (множина $X = x_1, \dots, x_a$ і множина $\bar{X} = \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_b$) є розділними орієнтованою гіперплощиною в тому випадку, якщо для деякого $k < 1$ існує такий вектор φ , який забезпечує виконання нерівності

$$x_i^T \varphi \geq 1, i = 1, \dots, a; \bar{x}_j^T \varphi \leq k, j = 1, \dots, b. \quad (1)$$

Очевидно, якщо існує вектор φ , для якого виконується нерівність (1), то існує і множина векторів φ , що задовольняють цій умові.

Характерно, що серед однопараметричної (за параметром $k < 1$) спорідненості цих векторів існує вектор φ_0 , що визначає такий напрямок, на якому проєкції множин X і $\bar{X}$ є найбільш дистанційованими одна від одної, тобто

$$\varphi_0 = \arg \max_{\varphi} \left[\min_{x_i \in X} x_i^T \varphi - \max_{\bar{x}_j \in \bar{X}} \bar{x}_j^T \varphi \right]. \quad (2)$$

Цей вектор φ_0 й обумовлена ним розділяюча гіперплощина, а саме:

$$x\varphi_0 = C_0, \quad (3)$$

де

$$C_0 = \frac{\min_{x_i \in X} x_i^T \varphi_0 + \max_{\bar{x}_j \in \bar{X}} \bar{x}_j^T \varphi_0}{2}, \quad (4)$$

є оптимальними. При цьому гіперплощина відокремлює елементи множини $\bar{X}$ (для цих елементів виконується нерівність $x\varphi_0 < C_0$) від елементів множини X (для цих елементів спрацьовує нерівність $x\varphi_0 > C_0$). Крім того, зазначена гіперплощина найбільш віддалена від елементів об'єднаної множини $X \cup \bar{X}$. Геометрична інтерпретація алгоритму впорядкованої мінімізації ризику на основі формування оптимальної розділяючої гіперплощини представлена на рис. 2.

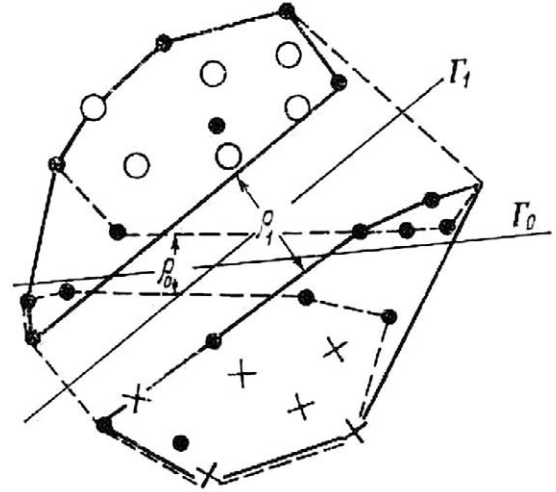


Рис. 2. Геометрична інтерпретація процедури автоматичного поділу спектральних сигнатур шатних та аномальних теплогідрравлічних режимів у багатовимірному ознаковому просторі на основі побудови оптимальної розділяючої гіперплощини

Показово, що для пошуку напрямного вектора φ_0 оптимальної розділяючої гіперплощини розглядається кінцева множина векторів Z , що сформована з векторів множин X і $\bar{X}$: $Z = \{z_j = x_i - \bar{x}_j\}, i = 1, \dots, a; j = 1, \dots, b$; (усього $a \times b$ елементів).

При цьому мінімальний за модулем вектор ψ_0 має задовольняти нерівності:

$$z_{ij} \psi^3 \geq 1, z_{ij} \in Z \quad (5)$$

У цьому зв'язку може бути доведено, що вектор ψ_0 збігається за напрямком з оптимальним вектором φ_0 , а величина $1/\|\psi_0\|$ є відстанню між проєкціями множин X і $\bar{X}$ на напрямок вектора ψ_0 . У результаті пошук вектора ψ_0 та обумовленої ним розділяючої гіперплощини зводиться до мінімізації функціоналу

$$I = \psi^T \psi \quad (6)$$

при виконанні обмежень (5). Іншими словами, розв'язувана задача фактично зводиться до задачі квадратичного програмування. Причому необхідні і достат-

ні умови мінімізації функціоналу (6) визначаються наслідком з теореми, яку наведено далі. Слід зазначити, що ця теорема свого часу була доведена М. Кунем та Г. Такером в теорії оптимізації. При цьому зазначена теорема формулюється в такий спосіб.

Теорема 1. Мінімальний за модулем вектор ψ_0 , що задовольняє умові (5), може бути представлений у вигляді

$$\psi_0 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b z_{ij} \alpha_{ij}^0, \quad \alpha_{ij}^0 \geq 0, \quad (7)$$

причому вектор параметрів α_{ij} відповідає умові

$$\alpha_{ia}^0 [z_{ij}^T - 1] = 0, \quad i = 1, \dots, a; \quad j = 1, \dots, b; \quad (8)$$

Показово, що серед множини всіх векторів ψ , що задовольняють нерівності (5), деякий вектор ψ , що забезпечує виконання умов (7) і (8) є мінімальним за модулем. Відповідно до зазначеної теореми пошуковий напрямний вектор може бути представлений у вигляді лінійної комбінації крайніх векторів. При цьому очевидно, що вектори z_{ij}^* , для яких виконуються умови $z_{ij}^* \psi_0 = 1$, є крайніми, оскільки їхні формуючі вектори $x_i, \bar{x}_j$ є визначальними. Крім того, з теореми 1 випливає, що задача знаходження напрямного вектора ψ_0 пошукової гіперплощини фактично зводиться до аналізу функції $W(\alpha)$ з вектором параметрів α_{ij} , яка має вигляд

$$W(\alpha) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \alpha_{ij} - \frac{1}{2} \psi^T \psi, \quad (9)$$

де вектор Ψ є

$$\Psi = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \alpha_{ij} z_{ij}.$$

При цьому необхідними й достатніми умовами досягнення максимуму функції $W(\alpha)$ в точці α_0 є співвідношення

$$\frac{\partial W(\alpha_0)}{\partial \alpha_{ij}} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \alpha_{ij}^0 > 0, \quad i = 1, \dots, a; \\ \leq 0, & \text{якщо } \alpha_{ij}^0 = 0, \quad j = 1, \dots, b. \end{cases} \quad (9)$$

Аналіз цих співвідношень з урахуванням наведених у виразі (7) позначень, а саме $\psi_0 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \alpha_{ij}^0 z_{ij}$, приводить їх до вигляду

$$1 - z_{ij}^T \psi_0 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \alpha_{ij}^0 > 0, \quad i = 1, \dots, a; \\ \leq 0, & \text{якщо } \alpha_{ij}^0 = 0, \quad j = 1, \dots, b. \end{cases} \quad (10)$$

Іншими словами, це має такий вигляд:

$$\begin{aligned} z_{ij}^T \psi_0 &\geq 1, \quad \alpha_{ij}^0 \geq 0, & i = 1, \dots, a; \quad j = 1, \dots, b; \\ \alpha_{ij}^0 (1 - z_{ij}^T \psi_0) &= 0, & j = 1, \dots, a; \quad j = 1, \dots, b; \end{aligned} \quad (11)$$

Відповідно до визначень теореми 1, що представлені у виразах (7) і (8), умови вигляду (12) визначають мінімальний за модулем напрямний вектор ψ_0 . У результаті задача побудови гіперплощини, яка розділяє множини X_1 і X_2 (див. рис. 2) фактично зводиться до пошуку максимуму функції $W(\alpha)$ з формули (9) з умовою (12) і вектором параметрів α_{ij} , який локалізований у позитивному квадранті. При цьому синтез алгоритму розпізнавання, що сформований на основі функції (9) за виконання умови (12) забезпечується на основі розглянутої далі теореми 2. Зазначена теорема була свого часу доведена В. Н. Вапником і А. Я. Червоненкісом під час аналізу статистичних проблем навчання. При цьому зазначена теорема формулюється в такий спосіб.

Теорема 2. Якщо поділяюча гіперплощина, що обумовлена вектором ψ_0 при умовах (5), існує, то максимум функції $W(\alpha)$ в позитивному квадранті визначається співвідношенням

$$W(\alpha_0) = \frac{\|\psi_0\|^2}{2}.$$

Прямим наслідком наведеної теореми 2 слід вважати можливість використання відстані $\rho(\psi)$ між проєкціями множин X та $\bar{X}$ на напрямок Ψ , а саме

$$\rho(\psi) \geq [2W(\alpha_0)^{-0,5}], \quad (13)$$

як критерій роздільності підлягаючих розпізнаванню векторів-реалізацій. При цьому показовим є той факт, що рівність у співвідношенні (13) досягається при векторі параметрів $\Psi = \Psi_0$, тобто при $\alpha = \alpha_0$.

Вищезазначене дозволяє засвідчити, що дві кінцеві множини векторів X і $\bar{X}$ не є роздільними гіперплощиною в тому випадку, якщо відстань між проєкціями цих множин на будь-який напрямок менша заданої відстані ρ_0 . Це означає, що роздільність неможлива, якщо знайдуться такі параметри $\alpha_{ij}^* > 0$, що

$$W(\alpha_{ij}^*) > \frac{1}{2\rho_0^2} = W_0 \quad (14)$$

Зрештою завдання визначення мінімального за модулем напрямного вектора Ψ_0 зводиться до реалізації таких етапів обчислень:

- 1) знаходження максимуму за умови (10) квадратичної форми $W(\alpha)$ в позитивному квадранті $\alpha_{ij}^* > 0$;
- 2) установлення того факту, що максимум функції $W(\alpha)$ перевищує задану величину W_0 .

Відповідно до першого з вищевказаних обчислювальних етапів алгоритм максимізації негативно визначеної квадратичної форми виду $F(y) = b^T y - y^T A y$ з векторами b, y і позитивно визначеною матрицею A реалізується на основі методу сполучених градієнтів. Відповідно до реалізації другого з вищевказаних обчислювальних етапів передбачено також визначальну процедуру функціоналу навчання діагностичної системи, а саме: алгоритм формування оптимальної розділяючої гіперплощини, що дає змогу мінімізувати можливі похибки розпізнавання.

Таким чином, підсумовуючи теоретичний аналіз головних обчислювальних процедур, що складають функціональне ядро запропонованої діагностичної моделі на основі оптимального лінійного класифікатора, необхідно відзначити таке.

Обчислювальна реалізація запропонованої моделі превентивної діагностики аварійного режиму погіршеної тепловіддачі з використанням оптимального лінійного класифікатора дає змогу своєчасно виявити режим початку псевдофазового переходу на поверхні ТВЕЛ і тим самим запобігти подальшому формуванню коагульованих об'ємів макромолекулярних утворень, що безпосередньо спричиняють виникнення режиму погіршеної тепловіддачі в АкЗ ЯР з НКТП.

Запропонована в цій роботі модель багатовимірної геометричного розпізнавання потенційно небезпечної теплогідрравлічної аномалії — початку процесу псевдофазового переходу на поверхні ТВЕЛ в АкЗ ЯР з НКТП — дає змогу мінімізувати можливі похибки розпізнавання, а також використовувати при реалізації процедури навчання суттєво обмежені обсяги апріорної інформації для попередньої адаптації (навчання) діагностичної системи.

Комп'ютерна реалізація розглянутих у роботі процедур автоматичної діагностики режиму псевдокипіння теплоносія в експериментальному циліндричному каналі з внутрішнім діаметром 6,3 мм в області НКТП (параметри експерименту вказані на рис. 1) показали можливість безпомилкового розпізнавання цього режиму з надійністю близько 100 %. Методичні особливості цих обчислювальних експериментів мають бути викладені в наступній публікації.

Математично формалізований у представленій публікації багатовимірний лінійний класифікатор має розглядатися як основний елемент математично-

го забезпечення розглянутого діагностичного функціоналу безпеки перспективних СВРК для ЯР з НКТП наступного покоління.

Висновки

1. Реалізація широкого спектра завдань безпекової проблематики перспективних реакторів із НКТП теплоносія зумовлює необхідність розробки якісно нових засобів оперативного контролю АкЗ легководних ЯР з НКТП, функціонал яких за своїм діагностичним змістом принципово відрізняється від існуючих підходів до побудови систем детермінованого контролю, управління та діагностики поточного технічного стану сучасних РУ типу ВВЕР.

2. Суттєва обмеженість діагностичних функцій детермінованих алгоритмів оперативного контролю АкЗ сучасних СВРК реакторів типу ВВЕР не дає змоги використати існуючі підходи для ідентифікації таких потенційно небезпечних імовірнісних теплогідрравлічних процесів, якими є режими кипіння теплоносія в ТВЗ існуючих докритичних реакторів, а також аномальні явища псевдофазового переходу на поверхні ТВЕЛ у перспективних ЯР з НКТП.

3. Динаміка виникнення процесу псевдофазового переходу на поверхні ТВЕЛ в області НКТП та подальше еволюційне погіршення тепловіддачі з цієї поверхні є зумовленими ефектами молекулярної кінетики, що реалізуються в пристінковому шарі в умовах плинну надкритичного теплоносія.

4. Формування перших псевдопарових утворень в області НКТП, що їх генерують рухомі осердя турбулентних вихорів у пристінковому шарі та в безпосередній близькості до поверхні ТВЕЛ, становить необхідну фізичну передумову для наступної трансформації цього аномального теплогідрравлічного режиму в надкритичній термодинамічній області до передаварійного стану поверхні тепловіддачі, яким є перехід до нестабільного псевдоплівкового кипіння.

5. Мікрокінетичні процеси, що реалізуються у пристінковому шарі надкритичного теплоносія і зумовлюють утворення макромолекулярних ансамблів у формі псевдопарових утворень є безпосередньою причиною їхньої наступної коагуляції, яка спричиняє виникнення погіршеної тепловіддачі ТВЕЛ в ЯР з НКТП.

6. Динамічний еволюційний розвиток режиму нестабільного псевдоплівкового кипіння в його стабільний плівковий надкритичний різновид, зумовлений процесами коагуляції псевдопарових утворень та їхньою наступною гідродинамічною стабілізацією на

поверхні ТВЕЛ в області НКТП, безпосередньо призводить до теплової ізоляції поверхні тепловіддачі, зовнішнім проявом якої є суттєве зниження інтенсивності тепловіддачі на цій поверхні та її наступна незворотна руйнація.

7. Формування спектральних складових у сигналах діагностичних сигналів акустичної емісії процесу псевдофазового переходу в області НКТП є зумовленим процесом виникнення макромолекулярних об'ємів в надкритичному теплоносії, що генеруються випадково розподіленими у пристінковому шарі осередками турбулентних вихорів.

Список використаної літератури

1. Світові тенденції розвитку конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, Л. Б. Зімін [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 2 (17). — С. 3–15.
2. Головні напрями російських розробок перспективних конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 3 (18). — С. 34–41.
3. Проблемні питання теплогідравлічного розрахунку активних зон перспективних водоохолоджуваних реакторів з надкритичними параметрами / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 4 (19). — С. 3–15.
4. Актуальні проблеми забезпечення теплогідравлічної надійності перспективних ядерних реакторів з надкритичними параметрами / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — № 1 (20). — С. 27–38.
5. Проблеми аварійної динаміки теплогідравлічних процесів у перспективних реакторах із надкритичними параметрами легководного теплоносія / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — № 2 (21). — С. 3–16.

I. G. Sharaievskyi

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysohirska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

Identification of Emergency Mode of Deteriorated Heat Transfer in Channels of Advanced Light Water Reactors with Supercritical Thermodynamic Parameters

From the standpoint of physical analysis of the micro-kinetics of the near-wall layer of the supercritical coolant, as well as the emergency dynamics of the heat transfer process from the surface of the fuel rods under these conditions, the features of the emergency mode development of deteriorated heat transfer in the channels of advanced light water reactors with supercritical thermodynamic parameters are analyzed. The defining physical differences in the onset of the deteriorated heat transfer mode in the reactor core with supercritical thermodynamic parameters are specified. The fundamental differences between the procedures for operational diagnostics of heat exchange crises on the surface of fuel rods, which may arise in water-cooled reactors under subcritical parameters, and the development of the emergency mode of deteriorated heat transfer in the core under supercritical parameters are physically substantiated. The fundamental impossibility of applying deterministic approaches to the implementation of existing monitoring and diagnostics systems for the current operational state of subcritical reactors of the VVER type to solve the problem of early detection of the initial phases of the deteriorated heat transfer mode is justified. Taking into account the defining features of the molecular kinetics of the onset and development of the deteriorated heat transfer mode on the surface of fuel rods in the reactor core with supercritical thermodynamic parameters, the main diagnostic principles for the automatic identification of this emergency thermal-hydraulic mode, which must be timely detected in future reactors with supercritical coolant parameters, are specified. In this context, the fundamental principles of building advanced in-core monitoring systems for light water reactors with supercritical parameters are formulated. It is justified that the onset of the emergency mode of deteriorated heat transfer on the surface of fuel rods in a supercritical light water reactor must be detected at the initial phase of this emergency mode. It is shown that the core of the mathematical software for advanced in-core monitoring systems for reactors with supercritical thermodynamic parameters of the light water coolant should consist of intelligent procedures for automatic recognition of the initial phases of the pseudo-boiling mode, which precedes the pseudo-film boiling mode and the destruction of the fuel rod cladding in the deteriorated heat transfer mode. A mathematical model of preventive diagnostics of the emergency mode of deteriorated heat transfer is proposed, based on procedures for constructing a separating hyperplane in a multidimensional feature space. The adequacy of the developed model for automatic recognition of the pseudo-boiling

mode in an experimental cylindrical channel under the conditions of a thermal-hydraulic stand with supercritical thermodynamic parameters was verified based on the spectral parameters of the acoustic emission process during the pseudo-phase transition process. A 100% reliability of correct identification of the pseudo-boiling mode was achieved.

Keywords: reactors with supercritical coolant parameters, heat exchange on the heat transfer surface of fuel rods, automatic diagnostics, spectral structure of diagnostic signals.

References

1. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Nosovskyi A. V., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2020). World trends of construction development of water-cooled supercritical pressure reactors. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 17, no. 2, pp. 3–15. (in Ukr.)
2. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2020). Main Directions of Russian Developments of Prospective Structures of Water-Cooled Supercritical Pressure Reactors. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 18, no. 3, pp. 34–41. (in Ukr.)
3. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2020). Problem issues of cores thermal-hydraulic calculation for prospective water-cooled reactors with supercritical parameters. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 19, no. 4, pp. 3–15. (in Ukr.)
4. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2021). Actual problems of the thermal hydraulic reliability ensuring of prospective nuclear reactors with supercritical parameters nuclear energy and the environment. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 20, no. 1, pp. 27–38. (in Ukr.)
5. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2021). Problems of abnormal dynamics of thermal hydraulic processes in prospective reactors with supercritical parameters of light water coolant. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 21, no. 2, pp. 3–16. (in Ukr.)

Надійшла 19.08.2024
Received 19.08.2024

І. С. Скітер, В. В. Деренговський, В. М. Рудько

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

Порівняння майданчиків розміщення АЕС методом експертного оцінювання параметричних критеріїв

Ключові слова:

майданчик розміщення,
атомна електростанція,
експертне оцінювання,
відносна цінність альтернативи,
аналіз безпеки,
оцінка впливу,
довкілля

Представлено спосіб порівняння майданчиків розміщення АЕС за допомогою методів експертного оцінювання параметричних критеріїв. Для узагальненого оцінювання майданчиків запропоновано такі фактори з відповідними критеріями: економічний (критерії «Мережі передачі енергії», «Експлуатаційні витрати», «Впливи на економіку»); соціальний (критерії «Транспортна мережа», «Юридичні аспекти», «Вплив туризму», «Права власності на землю», «Історичні місця», «Громадське визнання»); безпеки (критерії «Геологія та сейсмологія», «Густота населення», «Впливи на територію розміщення», «Вода для охолодження», «Метеорологія», «Гідрологія», «Топографія», «Землекористування», «Близькість до заболочених місць», «Шляхи евакуації», «Близькість до небезпечних об'єктів»). При цьому експертне оцінювання проводиться кожним експертом методом парного порівняння альтернатив. Критерії альтернатив розглядаються експертами комплексно і враховуються під час парного порівняння. Такий спосіб дає змогу в короткі терміни без значних фінансових витрат проводити оцінку й порівняння майданчиків розміщення нових ядерних установок. На прикладі проекту будівництва нових реакторів AP1000 показано процес порівняння майданчиків із трьох запропонованих. У результаті виконаного аналізу за критерієм максимального значення відносної цінності оптимальним майданчиком є альтернатива А1 — майданчик Хмельницької АЕС.

Вступ

Виробництво енергії на АЕС вважається одним із таких, що зумовлює низький рівень викидів парникових газів на етапі генерації. Проте існує негативний вплив на екосистему на інших етапах ядерно-паливного циклу: наприклад, виготовлення палива (видобутку руди і збагачення урану), поводження з відходами. Однак у липні 2022 р. Європарламент відніс газ і атомну енергетику до «зеленої» таксономії — переліку екологічно чистих видів економічної діяльності, що відповідають концепції сталого розвитку. Крім того, розпорядженням

Кабінету Міністрів України № 373-р від 21 квітня 2023 р. схвалена «Енергетична стратегія України на період до 2050 року», в якій Україна розглядає атомну енергетику як одне з найбільш економічно ефективних низьковуглецевих джерел енергії. На підтвердження такого вектору розвитку енергетики на сьогодні акціонерне товариство «Національна атомна енергогенеруюча компанія “Енергоатом”» (АТ «НАЕК “Енергоатом”») підписало угоду з компанією Westinghouse Electric Company на реалізацію проекту зі зведення двох енергоблоків за технологією AP1000 Westinghouse. Крім того, «Енергоатом» та американська компанія Holtec International підписа-

© І. С. Скітер, В. В. Деренговський, В. М. Рудько, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

ли генеральну угоду про передавання «Енергоатому» технології Holtec із виготовлення компонентів малих модульних реакторів. Для реалізації цих планів першочерговим постає питання вибору майданчика розміщення нових реакторів.

Мета представленої роботи — розробити прийнятний спосіб порівняння майданчиків розміщення АЕС за допомогою методів експертного оцінювання параметричних критеріїв.

Аналіз підходів до вибору майданчика розміщення АЕС

Вимоги до вибору майданчика встановлюють законодавчі та нормативно-правові акти України. Порядок ухвалення рішень та вимоги до матеріалів, що обґрунтовують необхідність спорудження ядерних установок, визначено ст. 37 Закону України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», Законом України «Про порядок прийняття рішень про розміщення, проектування, будівництво ядерних установок і об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами, які мають загальнодержавне значення». Зокрема в поданих матеріалах обов'язково мають бути:

характеристика навколишнього природного середовища в районі можливого розміщення установи;

звіт з оцінки впливу на довкілля запланованих робіт із будівництва ядерної установки, експлуатації та її зняття з експлуатації;

передбачені проектом заходи щодо запобігання негативному впливу на навколишнє природне середовище та зменшення цього впливу.

Рішення про розміщення, проектування, будівництво АЕС приймаються Верховною Радою України шляхом ухвалення відповідного закону. Верховна Рада України ухвалює рішення тільки в разі погодження місцевими органами виконавчої влади й органами місцевого самоврядування розміщення ядерної установки на своїй території. Проект закону до Верховної Ради України подає Кабінет Міністрів України.

У 2012 р. в Україні було розроблено та нині актуалізується «Кадастр майданчиків під будівництво енергоблоків нових АЕС», у якому обґрунтовано вибір семи районів для розміщення нових енергоблоків. Відповідно до законодавства України необхідно запропонувати на розгляд до Кабінету Міністрів України не менше трьох можливих варіантів розміщення

для початку робіт з обґрунтування вибору майданчика для будівництва нової АЕС. Процес його вибору включає в себе тривалу роботу зі схвалення територіальними громадами можливості подальших заходів із розгляду можливого місця розміщення нової АЕС. Під час розгляду майданчиків для розміщення нових енергоблоків на території діючих АЕС таке схвалення може пройти швидше, що значно прискорить процес його вибору.

У 2008 р. Державною інспекцією ядерного регулювання затверджено нормативний документ «Вимоги з безпеки до вибору майданчика для розміщення атомної станції» НП 306.2.144-2008 [1], який встановлює вимоги з безпеки під час вибору майданчика для розміщення АЕС та враховує рекомендації Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ). У цьому нормативі та публікації МАГАТЕ «Фундаментальні принципи безпеки» [2] йдеться про те, що «фундаментальна мета безпеки полягає в захисті людей і навколишнього середовища від шкідливого впливу іонізуючого випромінювання». Принцип 8 SF-1 [2] щодо запобігання аваріям говорить, що «Всі практичні зусилля повинні бути спрямовані на мінімізацію наслідків ядерних або радіаційних аварій». У SF-1 [2] йдеться про те, що «Основним засобом запобігання та пом'якшення наслідків аварій є “глибокоєшелонований захист”» (п. 3.31). Глибокоєшелонований захист забезпечується відповідною комбінацією визначених систем і заходів, одним з яких є «адекватний вибір майданчика і включення належних проектних та інженерних рішень, що забезпечують запас міцності, різноманітність та резервування» (SF-1, п. 3.32). Для застосування цього принципу необхідно (НС-Р-3 [3] п. 2.1), щоб придатність майданчика для ядерної установки оцінювалася з урахуванням таких факторів:

вплив зовнішніх подій, що відбуваються в регіоні конкретного об'єкта (ці події можуть мати природне походження або бути зумовлені людиною);

характеристики майданчика та його оточення, які можуть впливати на розповсюдження радіоактивних речовин у навколишньому середовищі;

щільність і розподіл населення та інші характеристики зовнішньої зони в тій мірі, в якій вони можуть вплинути на можливість здійснення аварійних заходів та необхідність оцінки ризиків для окремих осіб і населення.

Вибір і оцінка майданчика, придатного для розміщення АЕС, можуть суттєво вплинути на вартість проекту, громадське сприйняття і безпеку АЕС про-

тягом усього терміну її експлуатації. Погане планування і виконання робіт з оцінки майданчика, брак інформації і незнання міжнародних та національних стандартів безпеки і визнаних передових практик можуть призвести до того, що невдало вибраний проєкт атомної електростанції може призвести до ухвалення помилкових рішень, які можуть спричинити серйозні затримки як на етапі будівництва, так і на етапі експлуатації АЕС.

У [4] процес вибору придатного майданчика для розміщення АЕС є багатогранним і включає оцінку організаційних та технічних рішень забезпечення безпеки. Цей вибір також передбачає відсіювання майданчиків, для яких додаткові заходи безпеки в проєкті, що були б необхідні для усунення таких небезпек, були б надмірно складними, або тих, де недостатньо знань для визначення цих заходів із достатнім ступенем впевненості.

Що стосується мінімізації наслідків аварій, то вибір майданчика має на меті зменшити можливий вплив аварії на людей і навколишнє середовище. Це передбачає вибір майданчика з такими характеристиками розповсюдження радіонуклідів у повітрі, поверхневих і підземних водах, а також із рельєфом місцевості, розподілом населення та інфраструкту-

рою, які б сприяли реалізації мінімального їхнього впливу в разі можливих потенційних аварій.

Процес вибору майданчика із самого початку повинен керуватися чітко встановленим набором критеріїв, узгоджених із відповідними регуляторними вимогами. Такі критерії мають особливе значення для тих факторів, за якими можливі майданчики можуть бути виключені з подальшого розгляду. Необхідно встановити баланс між характеристиками об'єкта та специфічними особливостями проєктування, заходами захисту об'єкта та адміністративними процедурами.

Існує два процеси, пов'язані із забезпеченням безпеки майданчика для розміщення АЕС, — вибір майданчика і його оцінювання. Ці два процеси далі поділяються на п'ять етапів:

- аналіз місць;
- вибір майданчика;
- визначення характеристик майданчика (перевірка та підтвердження його характеристик);
- передексплуатаційний етап;
- експлуатація.

Структура етапів обстеження ділянки та її оцінки розроблена у схематичному зображенні та наведена на рис. 1.

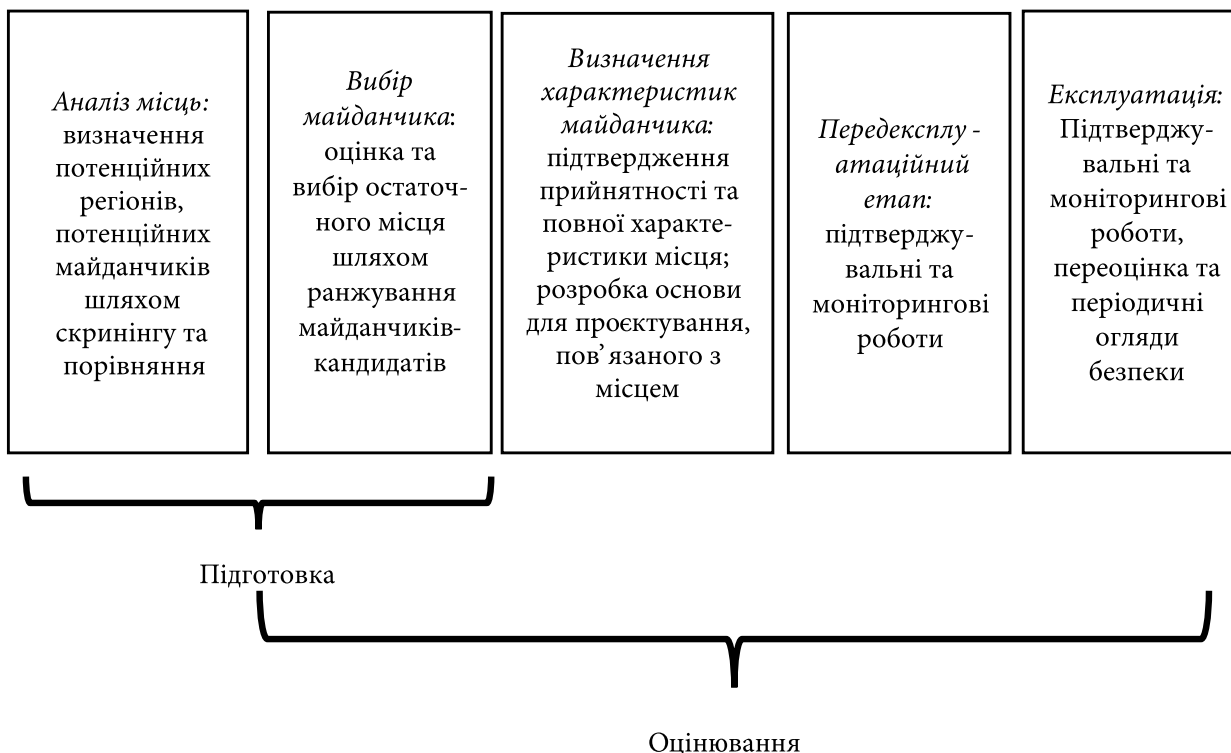


Рис. 1. Етапи процесів вибору та оцінки майданчика розміщення протягом терміну експлуатації АЕС [4]

На етапі аналізу місць досліджуються великі регіони з метою пошуку потенційних майданчиків і визначення однієї або декількох ділянок-кандидатів. Другим етапом процесу вибору майданчика є його відбір, на якому непридатні ділянки відкидають, а решту ділянок-кандидатів оцінюють шляхом перевірки та порівняння їх на основі організаційних і технічних рішень забезпечення безпеки та інших міркувань для вибору найкращих ділянок-кандидатів.

Згідно з [5] оцінка майданчика визначається як аналіз факторів, які можуть вплинути на безпеку установки або діяльності таким чином, що це може призвести до викиду радіоактивних речовин і/або вплинути на розповсюдження їх у навколишньому середовищі, а також питань, пов'язаних із безпекою та її впливом на населення (наприклад, можливість евакуації, розміщення людей і ресурсів).

Етап вибору майданчика включає в себе частину процесу його оцінювання і знаходиться на перетині між етапами вибору майданчика і оцінювання ділян-

ки (див. рис. 1 і 2). Після цього етапу підтверджується придатність ділянки і проводиться повна перевірка її характеристик разом із завершенням розробки основи для проектування у зв'язку з зовнішніми подіями, що відбулися під час етапу визначення характеристик майданчика. Цей процес у підсумку приводить до підготовки звіту з оцінювання безпеки майданчика як основи для розділу попереднього звіту з аналізу безпеки АЕС. Уся діяльність, пов'язана з майданчиком, включаючи підтверджувальні та моніторингові роботи, виконується на передексплуатаційному етапі.

Після затвердження остаточного звіту з аналізу безпеки АЕС починається оцінка майданчика на етапі експлуатації. Вона включає в себе всі підтверджувальні, моніторингові та переоцінювальні роботи, що проводяться протягом усього етапу експлуатації, і особливо під час періодичної переоцінки безпеки АЕС. Ця робота, як правило, відображається у звітах із періодичної переоцінки безпеки. Процес вибору майданчика та процес оцінки майданчика показані на рис. 2.

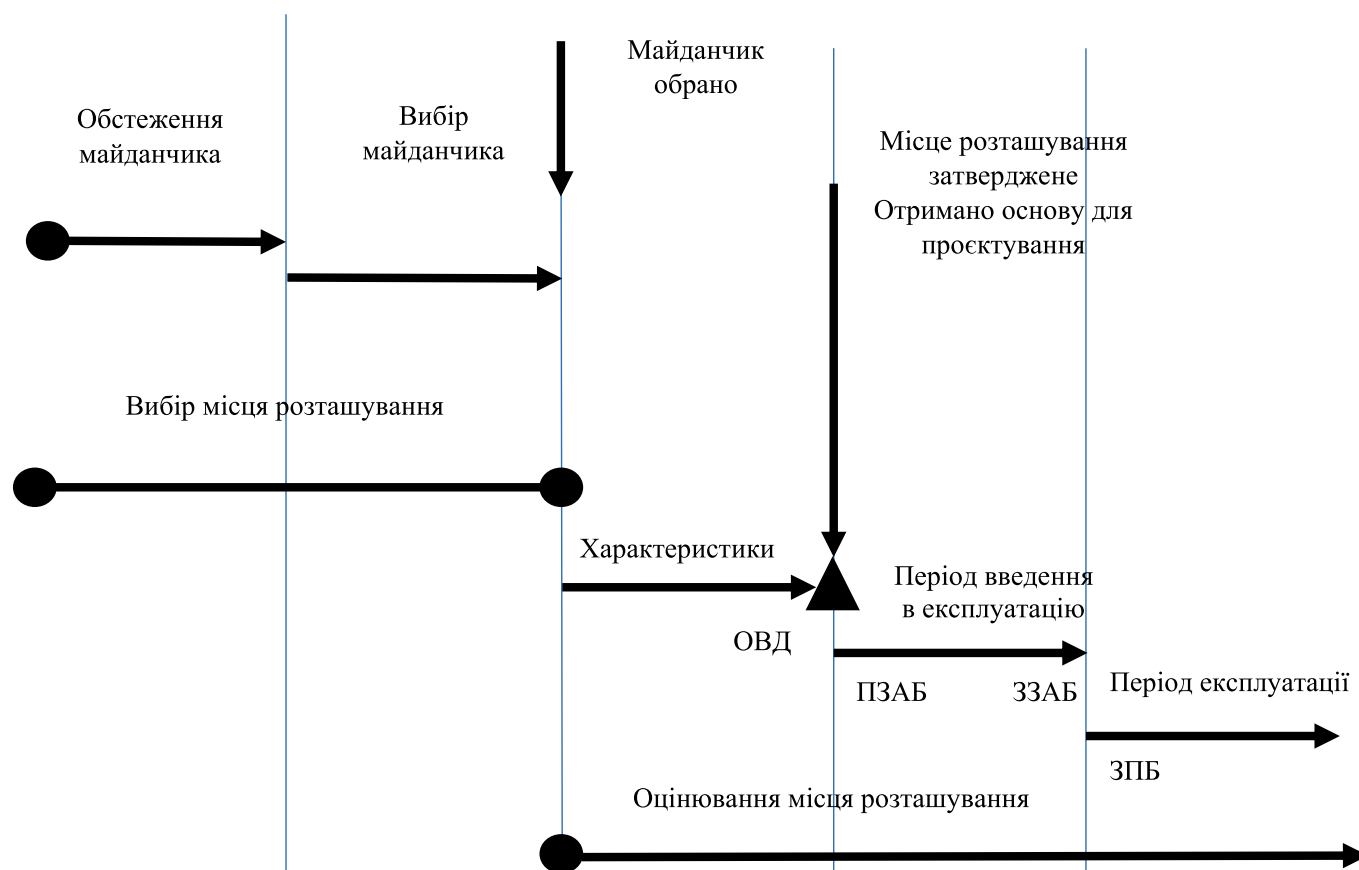


Рис. 2. Процес вибору оцінювання майданчика розміщення АЕС: ОВД — оцінка впливу на довкілля майданчика; ПЗАБ — попередній звіт з аналізу безпеки; ЗЗАБ — заключний звіт з аналізу безпеки; ЗПБ — звіт із переоцінки безпеки [4]

Формалізація методики експертного оцінювання майданчиків

Методика оцінювання альтернативних майданчиків (альтернатив) базується на таких твердженнях (умовах) [6]:

1. Група з m експертів проводить комплексне оцінювання p альтернатив на основі їхньої внутрішньої структури — загального аналізу критеріїв.

2. Результатом оцінювання є встановлення параметрів переваги альтернатив під час порівняння кожної їхньої пари.

3. Оцінка попарного порівняння проводиться на основі встановлення причини, яка, на думку експерта, більше впливає на результат — визначення мотивованого вибору майданчика на основі законів, норм і вимог з безпеки до вибору майданчика для розміщення АЕС в Україні.

На основі результатів попарних порівнянь альтернатив групою експертів розраховуються комплексні оцінки для всієї сукупності альтернатив.

Число експертів у групі можна визначити на основі теорії вибіркового спостереження [7]

$$m = \frac{UW(1-UW)}{\Delta_p^2} t^2, \quad (1)$$

де m — необхідна кількість членів групи експертів; UW — питома вага експертів, які мають певні ознаки, що встановлені організаторами експертизи (на-

приклад, стаж роботи в цій сфері не менше 10 років тощо); t — критерій Стюдента при заданому рівні ймовірності; Δ_p^2 — середня гранична помилка.

Процес експертного попарного порівняння альтернатив проводиться поетапно і представлений на рис. 3.

Етап 1. Оцінка впливу на процес порівняння всіх пар альтернатив

Кожен із m експертів робить оцінку впливу на результат усіх пар альтернатив, встановлюючи числову оцінку:

$$a_{ij}^e = \begin{cases} 1, & \text{якщо альтернатива } A_i \text{ більш значуща, ніж } A_j \\ 0,5, & \text{якщо альтернативи } A_i \text{ та } A_j \text{ рівнозначні } A_j, \\ 0, & \text{якщо альтернатива } A_i \text{ менш значуща, ніж } A_j \end{cases} \quad (2)$$

де $e = 1, 2, \dots, m$ — номер експерта; $i, j = 1, 2, \dots, p$ — номери альтернатив, для яких проводиться експертне попарне порівняння (оцінювання).

За результатами експертного попарного оцінювання альтернатив отримуємо m матриць:

Експерт m

	A_1	...	A_i	...	A_p
A_1	0,5	...	a_{1i}	...	a_{1p}
...	...	0,5	...	...	...
A_i	a_{i1}	...	0,5	...	a_{ip}
...	...	...	...	0,5	...
A_p	a_{p1}	...	a_{pi}	...	0,5

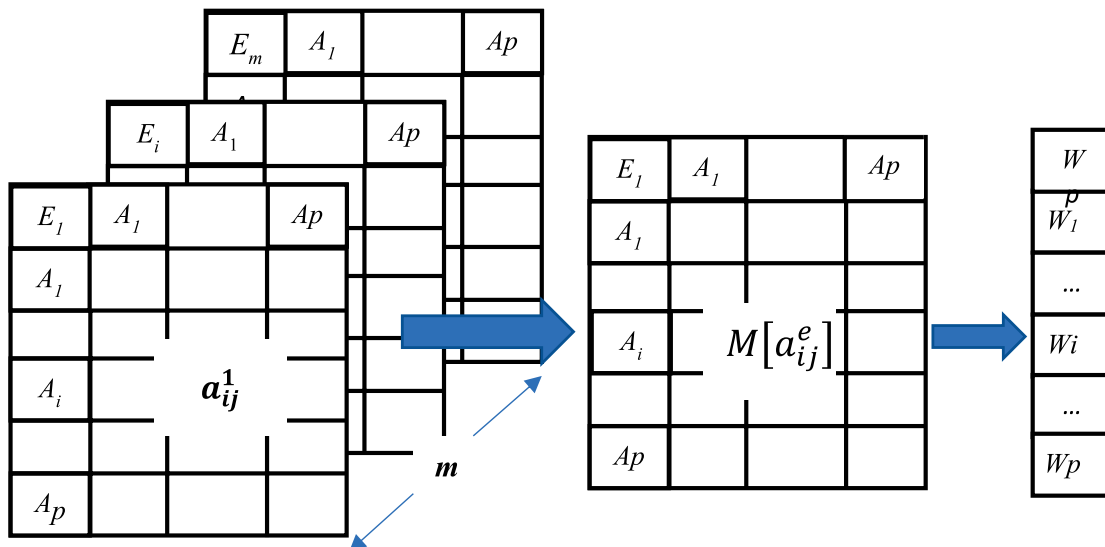


Рис. 3. Послідовність обробки результатів попарного експертного оцінювання альтернатив при порівнянні майданчиків розміщення АЕС

Етап 2. Побудова матриці математичних очікувань оцінок усіх пар альтернатив

Якщо під час оцінки пари альтернатив A_i та A_j на всій множині $i, j = 1, p$ із загальної кількості експертів m за перевагу альтернативи A_i висловилося m_i експертів, за перевагу альтернативи A_j висловилося m_j експертів, а m_k вважає, що альтернативи A_i та A_j рівнозначні, то оцінка математичного очікування дискретної випадкової величини $M[a_{ij}^e]$ визначається як

$$M[a_{ij}^e] = \bar{x}_{ij} = 1 \cdot \frac{m_i}{m} + 0,5 \cdot \frac{m_k}{m} + 0 \cdot \frac{m_j}{m}, \quad e = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Оскільки загальна кількість експертів $m = m_i + m_k + m_j$, то $m_k = m - m_i - m_j$. Підставляючи значення m_k у формулу (3), отримаємо

$$\bar{x}_{ij} = 1 \cdot \frac{m_i}{m} + 0,5 \cdot \left(\frac{m - m_i - m_j}{m} \right) = \frac{1}{2} + \frac{m_i - m_j}{2m}. \quad (4)$$

У результаті отримуємо сукупність величин $\bar{x}_{ij}$, яка утворює узагальнену матрицю математичних очікувань $\bar{X} = (\bar{x}_{ij})$ розмірності $p \times p$ величини a_{ij} :

	A_1	...	A_i	...	A_p
A_1	0,5	...	$\bar{x}_{1i}$	...	$\bar{x}_{1p}$
...	...	0,5	...	...	...
A_i	$\bar{x}_{i1}$	...	0,5	...	$\bar{x}_{ip}$
...	...	...	...	0,5	...
A_p	$\bar{x}_{p1}$	...	$\bar{x}_{pi}$	...	0,5

Етап 3. Визначення відносних цінностей альтернатив

На основі матриці математичних очікувань $\bar{X} = (\bar{x}_{ij})$ за допомогою ітераційного алгоритму визначається вектор відносних цінностей альтернатив

$$W = (W_1, \dots, W_i, \dots, W_p)^{(s)},$$

де $S = (s_i)$, $i = \overline{1, p}$ — крок ітерації.

Ітераційний алгоритм виконується за наведених нижче умов.

1. Початкова умова $s = 0$:

$$W^{(0)} = (1 \ 1 \ 1 \dots 1).$$

2. Рекурентні співвідношення

$$W^{(s)} = \frac{1}{\lambda^{(s)}} \cdot \bar{X} \cdot W^{(s-1)}, \quad (5)$$

$$\lambda^{(s)} = (1 \ 1 \ 1 \dots 1) \cdot \bar{X} \cdot W^{(s-1)}, \quad (6)$$

де $\lambda^{(s)}$, $s = (\overline{1, p})$ — нормувальний коефіцієнт; $\bar{X}$ — матриця математичних очікувань оцінок пар альтернатив; $W^{(s)}$, $W^{(s-1)}$ — вектори відносних цінностей альтернатив s -го та $(s-1)$ -го порядків відповідно.

3. Умова нормування

$$\sum_{i=1}^p W_i^{(s)} = 1. \quad (7)$$

4. Ознака закінчення алгоритму

$$\max \left(\text{abs} \left(W^{(s)} - W^{(s-1)} \right) \right) < \alpha, \quad (8)$$

де α — заданий рівень значущості (точності).

У результаті отримуємо визначення на певному рівні ітерації s вектор відносних цінностей альтернатив із заданим рівнем значущості.

$$W^{(s)} = (W_1^{(s)} \dots W_i^{(s)} \dots W_p^{(s)}).$$

Етап 4. Ранжування альтернатив за величиною їх відносної цінності

Ранжування альтернатив проводиться за величиною їхньої відносної цінності: $W^* > \dots > W^0$, де $W_i^* = \text{argmax}(W_i)$, $W_i^0 = \text{argmin}(W_i)$.

Результати ранжування передаються особі, яка ухвалює рішення.

Реалізація методу порівняння майданчиків розміщення АЕС

Розглянемо процес експертного оцінювання та порівняння майданчиків розміщення нових ядерних установок, масив яких представлений набором трьох альтернатив — майданчиків діючих АЕС відповідно до [1]:

Хмельницька АЕС — A_1 ;

Рівненська АЕС — A_2 ;

Південноукраїнська АЕС — A_3 .

Слід зазначити, що на первинному етапі аналізу експертні методи застосовуються для узагальненого аналізу альтернатив, без детального розгляду та порівняння всіх критеріїв за відповідними групами факторів — технічними, технологічними, соціально-економічними тощо. При цьому експерт-

Таблиця 1. Результати попарного експертного оцінювання

Експерт 1				Експерт 2				Експерт 3				Експерт 4			
	A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3
A_1	0,5	1	1	A_1	0,5	0,5	0,5	A_1	0,5	1	0,5	A_1	0,5	0,5	1
A_2	0	0,5	0	A_2	0,5	0,5	0,5	A_2	0	0,5	0	A_2	0,5	0,5	1
A_3	0	1	0,5	A_3	0,5	0,5	0,5	A_3	0,5	1	0,5	A_3	0	0	0,5
Експерт 5				Експерт 6				Експерт 7				Експерт 8			
	A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3
A_1	0,5	0	0	A_1	0,5	1	0	A_1	0,5	0	1	A_1	0,5	0	0
A_2	1	0,5	1	A_2	0	0,5	0,5	A_2	1	0,5	0	A_2	1	0,5	0
A_3	1	0	0,5	A_3	1	0,5	0,5	A_3	0	1	0,5	A_3	1	1	0,5
Експерт 9				Експерт 10				Експерт 11				Експерт 12			
	A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3		A_1	A_2	A_3
A_1	0,5	1	0,5	A_1	0,5	0,5	0	A_1	0,5	0,5	1	A_1	0,5	1	1
A_2	0	0,5	1	A_2	0,5	0,5	0,5	A_2	0,5	0,5	0	A_2	0	0,5	1
A_3	0,5	0	0,5	A_3	1	0,5	0,5	A_3	0	1	0,5	A_3	0	0	0,5

не оцінювання проводиться кожним експертом методом попарного порівняння (у балах порівняння згідно з формулою (1)), критерії альтернатив розглядаються експертами комплексно і враховуються під час попарного порівняння. Враховуючи вимоги [1] для узагальненого оцінювання майданчиків, запропоновано такі фактори з відповідними критеріями [7]:

1) *економічний фактор*: критерії — «Мережі передачі енергії», «Експлуатаційні витрати», «Впливи на економіку»;

2) *соціальний фактор*: критерії — «Транспортна мережа», «Юридичні аспекти», «Вплив туризму», «Права власності на землю», «Історичні місця», «Громадське визнання»;

3) *фактор безпеки*: критерії — «Геологія та сейсмологія», «Густота населення», «Впливи на територію розміщення», «Вода для охолодження», «Метеорологія», «Гідрологія», «Топографія», «Землекористування», «Близькість до заболочених місць», «Шляхи евакуації», «Близькість до небезпечних об'єктів».

У загальному списку експертів Інституту проблем безпеки АЕС НАН України, складеному з 30 спеціалістів, 28 мають стаж роботи в галузі ядер-

ної, радіаційної безпеки та екології понад 15 років. З огляду на задану межу стажу роботи, середньої граничної помилки $\Delta_p = 0,15$, значення показника $t = 2$ для ймовірності $p = 0,9545$ — питома вага експертів становить

$$UW = \frac{28}{30} = 0,93.$$

Тоді необхідна кількість експертів становить

$$m = \frac{0,93(1-0,93)}{0,15^2} 2^2 = 11,06 = 12.$$

Результати експертних попарних порівнянь альтернатив (*етап 1*) представлені в табл. 1.

Етап 2. Побудова матриці математичних очікувань оцінок усіх пар альтернатив

Результати попарних порівнянь згідно з позначеннями у формулі (4):

для пари альтернатив A_1 та A_2 — $m_i = 5$, $m_j = 3$;

для пари альтернатив A_1 та A_3 — $m_i = 5$, $m_j = 4$;

для пари альтернатив A_2 та A_3 — $m_i = 4$, $m_j = 5$.

Розрахунок значень елементів матриці математичних очікувань за формулою (4):

$$x_{11} = \frac{1}{2} + \frac{0-0}{2 \times 12} = 0,5; \quad x_{12} = \frac{1}{2} + \frac{5-3}{2 \times 12} = 0,58; \quad x_{13} = \frac{1}{2} + \frac{5-4}{2 \times 12} = 0,54;$$

$$x_{21} = 1 - x_{12} = 0,42; \quad x_{22} = 0,5; \quad x_{23} = \frac{1}{2} + \frac{4-5}{2 \times 12} = 0,46;$$

$$x_{31} = 1 - x_{13} = 0,46; \quad x_{32} = 1 - x_{23} = 0,54; \quad x_{33} = 0,5.$$

Матриця математичних очікувань:

	A_1	A_2	A_3
A_1	0,50	0,58	0,54
A_2	0,42	0,50	0,46
A_3	0,46	0,54	0,50

Етап 3. Визначення відносних цінностей альтернатив (із заданою точністю $\alpha = 0,05$, чи ймовірністю $p = 0,95$)

Крок ітерації 0:

$$W^{(0)} = (1 \ 1 \ 1)^{s=0}.$$

Крок ітерації 1:

$$S^{(1)} = X \times W^{(0)} = \begin{pmatrix} 0,50 & 0,58 & 0,54 \\ 0,42 & 0,50 & 0,46 \\ 0,46 & 0,54 & 0,50 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,625 \\ 1,375 \\ 1,500 \end{pmatrix},$$

$$\lambda^{(1)} = (1 \ 1 \ 1) \times S^{(1)} = (1 \ 1 \ 1) \times \begin{pmatrix} 1,625 \\ 1,375 \\ 1,500 \end{pmatrix} = 4,5,$$

$$W^{(1)} = \frac{1}{\lambda^{(1)}} \times S^{(1)} = \frac{1}{4,5} \times \begin{pmatrix} 1,625 \\ 1,375 \\ 1,500 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,36111111 \\ 0,30555556 \\ 0,33333333 \end{pmatrix}.$$

Крок ітерації 2:

$$S^{(2)} = X \times W^{(1)} = \begin{pmatrix} 0,50 & 0,58 & 0,54 \\ 0,42 & 0,50 & 0,46 \\ 0,46 & 0,54 & 0,50 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,361 \\ 0,306 \\ 0,333 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,539 \\ 0,456 \\ 0,498 \end{pmatrix},$$

$$\lambda^{(2)} = (1 \ 1 \ 1) \times S^{(2)} = (1 \ 1 \ 1) \times \begin{pmatrix} 0,539 \\ 0,456 \\ 0,498 \end{pmatrix} = 1,493,$$

$$W^{(2)} = \frac{1}{\lambda^{(2)}} \times S^{(2)} = \frac{1}{1,493} \times \begin{pmatrix} 0,539 \\ 0,456 \\ 0,498 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,36124031 \\ 0,30542636 \\ 0,33333333 \end{pmatrix}.$$

Оцінка точності визначення відносних цінностей альтернатив:

$$\max(|0,36124031 - 0,36111111|, |0,30542636 - 0,30555556|, |0,33333333 - 0,33333333|) = 0,000129199 < 0,05 \text{ — умова (7) ви-}$$

конана — кінець роботи алгоритму.

Вектор відносних цінностей альтернатив:

$$W = (W_1 = 0,3612 \quad W_2 = 0,3054 \quad W_3 = 0,3333).$$

Ранжування альтернатив проводиться за величиною їхньої відносної цінності:

$$Ranking W = (W_1 = 0,3612 > W_3 = 0,3333 > W_2 = 0,3054).$$

Найкраща за цінністю альтернатива:

$$W_i^* = \operatorname{argmax}(W_i) = W_1 - A_1 \text{ «Хмельницька АЕС»}.$$

Найгірша за цінністю альтернатива:

$$W_i^0 = \operatorname{argmin}(W_i) = W_2 - A_2 \text{ «Рівненська АЕС»}.$$

Висновки

У роботі представлено підхід до порівняння майданчиків розміщення АЕС за допомогою методів експертного оцінювання параметричних критеріїв. На первинному етапі порівняння запропонований метод використовується для узагальненого аналізу альтернатив, без детального розгляду та порівняння всіх критеріїв за відповідними групами факторів — технічними, технологічними, соціально-економічними тощо. При цьому експертне оцінювання проводиться кожним експертом методом попарного порівняння альтернатив, критерії альтернатив розглядаються експертами комплексно і враховуються під час попарного порівняння. Цей спосіб дозволяє в короткі терміни без значних фінансових витрат провести попередній узагальнений порівняльний експертний аналіз та сформулювати рекомендації для оцінювання майданчиків розміщення нових реакторів, який ґрунтується на числових характеристиках. На прикладі проекту будівництва нових реакторів AP1000 показано процес порівняння на основі числових оцінок майданчиків із трьох запропонованих. У результаті виконаного аналізу оптимальною є альтернатива A1 — майданчик Хмельницької АЕС.

Список використаної літератури

1. НП 306.2.144-2008. Вимоги з безпеки до вибору майданчика для розміщення атомної станції. Затверджено наказом Держатомрегулювання України № 68 від 07.04.2008 р., зареєстровано в М-ві юстиції України 28.05.2008 р. за № 467/15158.
2. Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1 / European Atomic Energy Community, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, International Maritime Organization, et al. — Vienna: IAEA, 2006. — 37 p.
3. Site evaluation for nuclear installations, IAEA Safety Standards Series No. NS-R-3 / International Atomic Energy Agency. — Vienna: IAEA, 2003. — 49 p.
4. Site survey and site selection for nuclear installations. IAEA Safety Standards Series No. SSG-35. — Vienna: IAEA, 2015. — 84 p.
5. IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2007 Edition / International Atomic Energy Agency. — Vienna: IAEA, 2007. — 238 p.
6. Деренговський В. В. Трирівнева модель оцінки потенційних сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему на основі глобального факторально-індикаторного критерію / В. В. Деренговський, І. С. Скітер // Ядерна енергетика та довкілля. — 2022. — № 1 (23). — С. 45–55. — doi.org/10.31717/2311-8253.22.1.5.
7. Грабовецький Б. Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрями використання / Б. Є. Грабовецький. — Вінниця: ВНТУ. — 2010. — 171 с.

of tourism”, “Land ownership rights”, “Historical sites”, “Public recognition”: safety factor: criteria — “Geology and seismology”, “Population density”, “Impacts on the location area”, “Cooling water”, “Meteorology”, “Hydrology”, “Topography”, “Land use”, “Proximity to wetlands”, “Evacuation routes”, “Proximity to hazardous facilities”. In this case, the expert assessment is carried out by each expert using the method of pairwise comparison of preferences, the criteria of alternatives are considered by experts comprehensively and taken into account in the pairwise comparison. This method allows for the assessment and comparison of new nuclear objects siting sites in a short time without significant financial costs. The example of the AP1000 new reactor construction project shows the process of comparing sites out of three proposed ones. The article presents an approach to comparing NPP siting sites using methods of expert evaluation of parametric criteria. At the initial stage of comparison, the proposed method is used for a generalised analysis of alternatives, without a detailed consideration and comparison of all criteria by relevant groups of factors — technical, technological, socio-economic, etc. At the same time, each expert makes an expert assessment by the method of pairwise comparison of preferences, the criteria of alternatives are considered by experts comprehensively and taken into account in the pairwise comparison. This method allows conducting a preliminary generalised comparative expert analysis and formulating recommendations for the assessment of new reactor siting sites in a short time without significant financial costs, based on numerical characteristics. Using the example of the AP1000 new reactor construction project, the paper demonstrates the comparison process based on numerical assessments of three proposed sites. The analysis shows that alternative A1, the Khmelnytskyi NPP site, is the best option.

I. S. Skiter, V. V. Derenhovskyi, V. M. Rudko

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine*

Comparison of NPP Siting Sites by Expert Evaluation of Parametric Criteria

The article presents a method for comparing NPP siting sites using methods of expert evaluation of parametric criteria. For a generalised assessment of sites, the following factors with corresponding criteria are proposed: economic factor: criteria — “Energy transmission networks”, “Operating costs”, “Impacts on the economy»; social factor: criteria — “Transport network”, “Legal aspects”, “Impact

Keywords: siting site, nuclear power plant, expert assessment, relative value of an alternative, safety analysis, impact assessment, environment.

References

1. NP 306.2.144-2008. *Safety Requirements for the Selection of a Nuclear Power Plant Site*. Approved by SNRIU Order no. 68, dated 07.04.2008. Kyiv: SNRIU, 2008. (in Ukr.)
2. Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1. Vienna: IAEA, 37 p.
3. *Site evaluation for nuclear installations*. IAEA Safety Standards Series No. NS-R-3. Vienna: IAEA, 2003, 49 p.
4. *Site survey and site selection for nuclear installations*. IAEA Safety Standards Series No. SSG-35. Vienna: IAEA, 2015, 84 p.

5. IAEA Safety Glossary, Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2007 Edition. Vienna: IAEA, 2007, 238 p.
6. Derenhovskiy V. V., Skiter I. S. (2022). [Three-level model assessment of potential scenarios of the Shelter object transformation into an ecologically safe system based on global factor]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 23, no. 1, pp. 45–55. doi.org/10.31717/2311–8253.22.1.5. (in Ukr.)
7. Hrabovetskyi B. E. (2010). [Methods of expert assessments: theory, methodology, directions of use]. Vinnytsia: VNTU, 171 p. (in Ukr.)

Надійшла 17.06.2024

Received 17.06.2024

Д. І. Хвалін

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

Актуальність і технічні можливості відмови від водневого охолодження турбогенераторів атомних електростанцій

Ключові слова:

потужний турбогенератор,
система охолодження,
атомна електростанція,
безпека,
надійність,
ефективність

За допомогою аналізу впливу типу охолодження на вірогідність безвідмовної роботи турбогенераторів різної потужності показано, що ускладнення конструкції та введення нових допоміжних систем для інтенсифікації охолодження зі зростанням одиничної потужності призводять до зниження їхньої надійності. Розглянуті основні шляхи забезпечення надійності генераторів: впровадження систем і засобів контролю та діагностики основних вузлів, резервування важливих систем обладнання, а також спрощення конструкції генераторів з одночасною відмовою від низки допоміжних систем. Висвітлено переваги застосування повного повітряного охолодження порівняно з водневим і воднево-водяним, а також науково обґрунтовано необхідність відмови від використання водневого охолодження для потужних турбогенераторів енергоблоків атомних електростанцій. На основі аналізу вітчизняного та світового досвіду розроблення й експлуатації потужних електричних машин з повним повітряним охолодженням показано, що сучасний рівень техніки і технологій дозволяє розробити надпотужні турбогенератори з повним повітряним охолодженням для забезпечення пожежо- та вибухобезпеки теплових і атомних електростанцій.

Створення надійних турбогенераторів (ТГ) є однією з умов щодо забезпечення безпеки й ефективності експлуатації атомних електростанцій (АЕС) у цілому. Значення цієї проблеми суттєво підвищилося після аварій на АЕС «Три Майл Айленд» (березень 1979 р., США), Чорнобильській (квітень 1986 р., Україна) та «Фукусіма-Даїчі» (березень 2011 р., Японія). Під час цих аварій відбулося плавлення ядерного палива в тепловидільній збірці, як результат були зруйновані перші два бар'єри безпеки. За умов значного підвищення температури відбулася пароконієва реакція — окислення цирконію з одночасним виділенням вільного водню, накопичення якого призвело у двох випадках до вибуху (Чорнобильська АЕС та «Фукусіма-Даїчі»). Необхідно зазначити, що під час усіх найважчих аварій на теплових і атомних

станціях водень був якщо не причиною самої аварії, то багатократно підсилюючим її наслідки фактором, тому аналіз усіх пов'язаних із ризиком генерації водню питань є важливим кроком для будь-якого заходу, спрямованого на запобігання або пом'якшення вибуху водню в реакторі [1].

Це дозволяє констатувати, що пожежо- та вибухобезпека є невід'ємною складовою надійності як безпосередньо ТГ енергоблоків АЕС, так і самої станції в цілому.

Водночас основна тенденція розвитку енергетики та турбогенераторобудування завжди полягала в постійному підвищенні одиничної потужності ТГ електростанцій, оскільки за таких умов зменшувалася питома вартість як їхнього виготовлення, так і будівельно-монтажних робіт, зменшувалися кіль-

кість експлуатаційного персоналу та витрата матеріалів на одиницю встановленої потужності, а також підвищувався коефіцієнт корисної дії [2].

Якщо виразити повну потужність ТГ відомою формулою (у кіловольт-амперах) [3]

$$P = 1,11 \cdot D_1^2 \cdot l_1 \cdot n \cdot AS_1 \cdot B_\delta \cdot k_{y1} \cdot 10^{-2}, \quad (1)$$

де D_1 — діаметр розточки статора, м; l_1 — активна довжина статора, м; n — номінальна частота обертання, об./хв; AS_1 — лінійне навантаження статора, А/см; B_δ — індукція магнітного поля (першої гармонічної) у повітряному проміжку, Тл; k_{y1} — коефіцієнт вкорочення кроку статорної обмотки, то можна показати, що за однакової частоти обертання n і майже незмінної (залежної від властивостей електротехнічної сталі) індукції магнітного поля B_δ підвищення потужності ТГ може відбуватися за рахунок збільшення лінійного навантаження AS_1 та розмірів статора (D_1 , l_1). Збільшення розмірів D_1 і l_1 обмежується діаметром ротора D_2 згідно з вимогами сучасної металургії ($D_2 = 1,2 \dots 1,3$ м), що обмежує, відповідно, і довжину ротора L_2 , яка за умов вібростійкості має бути в межах $L_2 = (3 \dots 6,5) D_2$, а також визначається залізничними габаритами (умовами транспортування). Таким чином, підвищення потужності досягається, як правило, за рахунок збільшення лінійного навантаження AS_1 , тобто у випадку обмеження габаритів статора — завдяки збільшенню густини струму, яке можливе лише з одночасною інтенсифікацією охолодження.

Так, перехід від використання повітря до використання водню під час проектування ТГ потужністю вище 25...50 МВт почався у світі наприкінці 1940-х років, що дозволило зменшити габарити машин цієї потужності, а також підвищити одиничну потужність і коефіцієнт корисної дії. Але якщо перехід на водневе охолодження дав можливість довести потужність до 150...200 МВт, то якісно новий спосіб охолодження — безпосереднє охолодження обмоток — разом із підвищенням тиску водню до 5 кГс/см² створив умови для реалізації генератора потужністю 1000...1200 МВт з безпосереднім водневим охолодженням ротора. Розрахунки показали можливість застосування безпосереднього водневого охолодження ротора для ТГ потужністю 1600 МВт [4].

Отже, технічний прогрес розвитку систем охолодження генераторів та інтенсифікація охолодження їхніх активних частин зумовили значне зростання коефіцієнта використання матеріалів, тобто підвищення економічності виготовлення, попри ускладнення конструкції з причини необхідності допоміж-

них систем, які забезпечують охолодження: газової, маслопостачання ущільнення вала, а також водяного охолодження обмоток.

Водночас основними показниками надійності ТГ є напрацювання на відмову та коефіцієнт готовності.

Середнє напрацювання на відмову визначається як відношення сумарного напрацювання об'єкта, працездатність якого може бути відновлена, до математичного очікування кількості його відмов упродовж цього напрацювання. Статистичну оцінку середнього напрацювання на відмову для кожного ТГ можна отримати як відношення сумарного напрацювання протягом заданого періоду до кількості відмов за цей період

$$T = t_\Sigma / r, \quad (2)$$

де r — кількість відмов за час сумарного напрацювання t_Σ .

Коефіцієнт готовності характеризує придатність об'єкта до використання за призначенням у будь-який час без урахування запланованих періодів, коли його використання не передбачене. У загальному випадку він визначається як відношення напрацювання протягом певного періоду до суми напрацювання та часу відновлення після відмов за цей же період

$$K_T = t_\Sigma / (t_\Sigma + t_{B\Sigma}), \quad (3)$$

де $t_{B\Sigma}$ — час, витрачений на відновлення після відмов за заданий період.

Показники надійності та довговічності ТГ мають бути не нижчими від наведених у таблиці.

Коефіцієнт вимушеного простою визначається як

$$q = 1 - K_T. \quad (4)$$

За допомогою основних показників надійності можна знайти вірогідність безвідмовної роботи об'єкта протягом заданого періоду роботи t

$$P_o = K_T \exp(-t/T). \quad (5)$$

Оскільки вірогідність безвідмовної роботи генератора P_{ot} визначається як добуток вірогідності безвідмовної роботи його складових частин, вузлів і допоміжних систем P_{oi}

$$P_{ot} = \prod_{i=1}^n P_{oi}, \quad (6)$$

то зрозуміло, що введення кожної нової системи буде супроводжуватися зниженням вірогідності безвідмовної роботи ТГ в цілому, якщо одночасно не будуть відповідно підвищуватися вірогідності безвідмовної

Показники надійності генераторів згідно з вимогами ГОСТ 533-2000

Показник	Середнє значення показника для генератора потужністю, МВт	
	до 350	понад 350
Коефіцієнт готовності, %	99,6	99,5
Напрацювання на відмову, год	22 000	18 000
Ресурс між капітальними ремонтами, роки	8	5
Повний призначений строк експлуатації, роки	40	40

роботи всіх або певної кількості його складових частин і допоміжних систем [5]. Але якщо P_{oi} близькі до одиниці та відповідають границі технологічних можливостей, тобто на певному етапі підвищення P_{oi} шляхом удосконалення конструкції та технології виготовлення або зумовлює суттєве зростання вартості виробництва, або неможливе взагалі, то ускладнення ТГ, обумовлене зростанням одиничної потужності та підвищенням ступеня використання, неминуче призводить до зниження надійності експлуатації й зростання збитків від позапланових ремонтів.

Статистика надійності генераторів залежно від потужності та системи охолодження [4–6] (рис. 1) ілюструє вищенаведене.

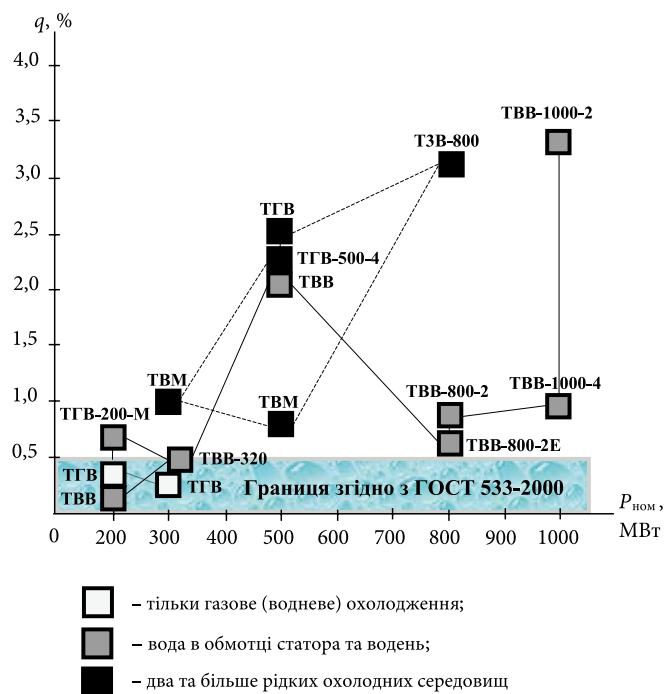


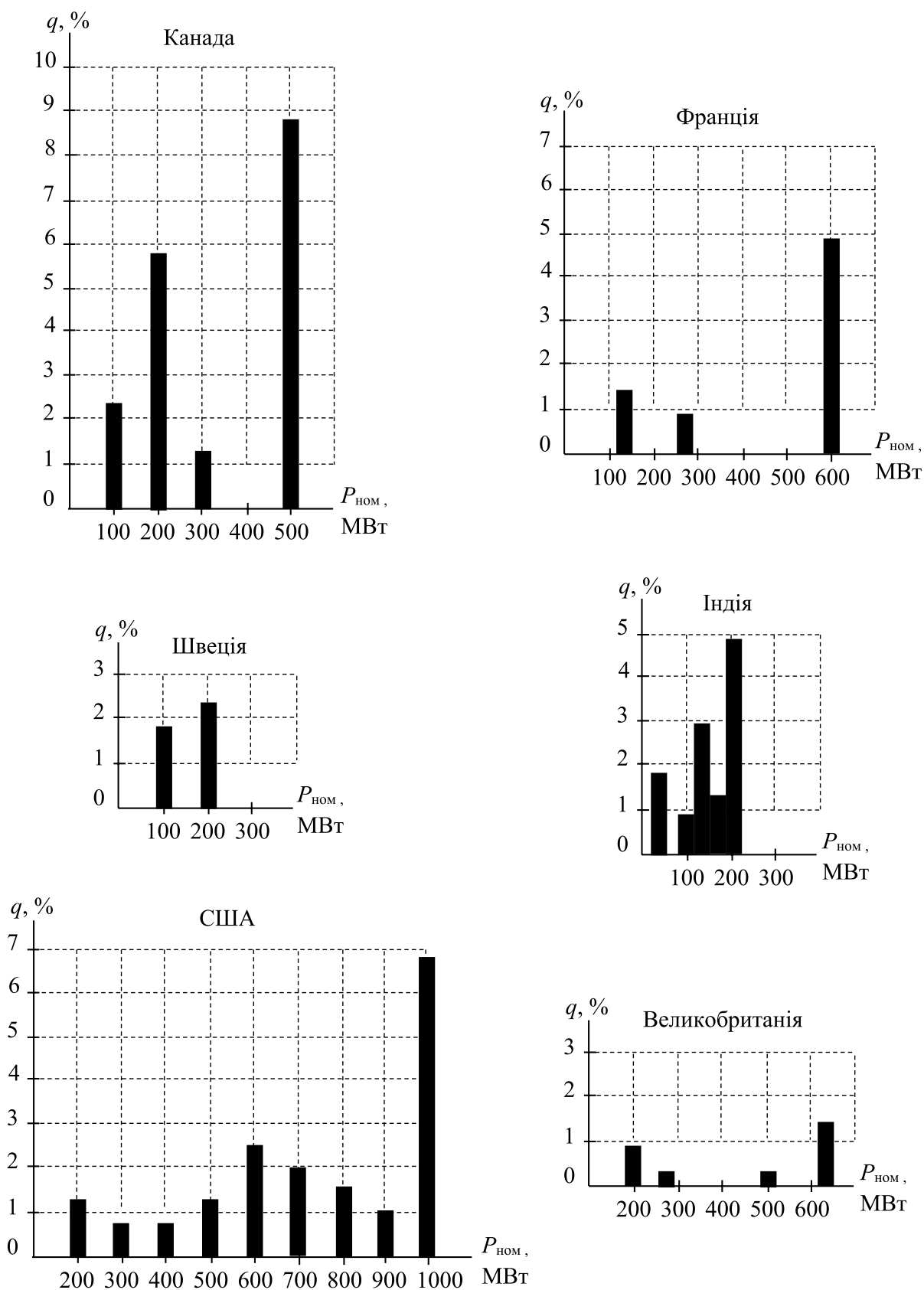
Рис. 1. Коефіцієнт вимушеного простою q для генераторів залежно від потужності та системи охолодження згідно з усередненими даними за 1993–2022 рр.

Найменший коефіцієнт вимушеного простою з груп систем охолодження мають тільки «водневі» машини потужністю 200 і 300 МВт: 0,2...0,3 % за граничного нормативного значення 0,5 %. Далі знаходиться група машин із воднево-водяним охолодженням, у якій з восьми типів машин тільки два типи відповідають нормам надійності. У групі машин із водяним охолодженням обох обмоток і повністю водяним охолодженням жоден ТГ не задовольняє вимоги з надійності.

Таким чином, ускладнення конструкції генератора та введення нових допоміжних систем для інтенсифікації охолодження зі зростанням одиничної потужності призводять до зниження його надійності. Статистика надійності генераторів інших типів залежно від потужності надає якісно подібну закономірність [5, 6] (рис. 2).

З урахуванням викладених вище об'єктивних причин можна зробити такий висновок: задля досягнення найвищої можливої надійності для будь-якого ступеня одиничної потужності генератора необхідно максимально обмежити застосування води та інших рідких агентів як охолодного середовища, а для досягнення достатньої пожежо- та вибухобезпеки не застосовувати водень взагалі.

Водневе охолодження активних частин ТГ вимагає не тільки наявності газової системи зі спеціальним обладнанням, яке дозволяє здійснювати безпечно заповнення його корпусу воднем і витиснення останнього інертним газом, а потім повітрям, але й системи маслостачання з насосами, фільтрами, теплообмінниками для функціонування ущільнення вала. Якщо у маслосистемах підшипників пожежобезпека на сьогодні може забезпечуватися використанням негорючого змащувального масла, то для маслосистем ущільнення цей шлях неприйнятний унаслідок неминучості попадання масла з ущільнення в корпус ТГ й агресивності негорючого масла до високовольтної

Рис. 2. Коефіцієнт вимушеного простою q для генераторів залежно від потужності

ізоляції та лакових захисних покриттів. Тому відмова від водневого охолодження та відсутність масляного ущільнення вала дозволяє повністю вилучити горючі матеріали із зони, де ці матеріали можуть samozапалитися.

Приблизно 15...20 % відмов ТГ із водневим охолодженням відбуваються внаслідок ушкодження елементів газової системи та масляного ущільнення з системою маслозабезпечення, зокрема порушення газощільності. Водночас більша частина випадків порушення газощільності не супроводжується спалахуванням водню.

Вірогідність виникнення загоряння в газомасляних системах оцінюється величиною 0,5...1 % на період експлуатації генератора за календарний рік. Типові причини загоряння — займання водню під час витікання крізь нещільності чи тріщини прокладок у фланцях, крізь клапани гідрозатворів на зливі масла з ущільнення за наявності дефектів клапанів або регуляторів рівня, крізь нещільності в роз'єднати зовнішніх щитів, корпусів ущільнення, крізь ущільнення вала за умов різних дефектів самих ущільнень, у випадку неправильної роботи регуляторів перепаду тисків «масло — водень» і системи резервування тощо.

Можуть спостерігатися також загоряння масла під час витікання останнього крізь нещільності чи тріщини прокладок у фланцях або арматурі.

У разі різкого збільшення вібрації валопроводу, що супроводжується ушкодженням вала та підшипників, відбуваються також ушкодження водневих ущільнень, зовнішніх щитів і, як наслідок, катастрофічні порушення ущільнень системи водневого охолодження ТГ з наступним займанням маслководневої суміші та пожежею в машинному залі, що призводить до ушкодження чи обрушення конструкції покрівлі. Такі тяжкі аварії відбуваються рідко (приблизно 0,1...0,3 % на період експлуатації генератора за рік), але вони ведуть до значних економічних втрат. За таких обставин існує висока ймовірність загибелі людей. Ці події, як правило, спостерігаються в результаті руйнування ТГ з причин, не пов'язаних із самим генератором (наприклад, відрив лопаток турбін, моторний режим, поломка вала). Тому запобігання катастрофічним пожежам і вибухам або значне зниження втрат у таких випадках можливі лише шляхом впровадження складних систем вібродіагностики, які забезпечують у разі зростання віброшвидкості понад 45 мм/с негайний зупин машини й автоматично прискорене видалення водню.

Удосконалення газомасляної системи ТГ із водневим охолодженням дозволяють запобігти більшій

частині відомих причин загоряння, але неможливо запобігти всім загорянням, якщо враховувати, що все більше порушень у роботі газомасляної системи та ущільнень вала пов'язані з недостатньою кваліфікацією експлуатаційного та ремонтного персоналу.

Для компенсації цього зниження надійності ТГ отримав розвиток один із основних шляхів забезпечення надійності — впровадження систем і засобів контролю та діагностики основних вузлів генераторів (СКДГ). Призначення СКДГ — раннє виявлення прогресуючих відхилень у роботі вузлів і допоміжних систем, які можуть призвести до вимушених відключень від мережі та великих збитків, а також своєчасне усунення цих відхилень, наприклад, під час планово-запобіжних ремонтів. Ефективне функціонування СКДГ підвищує надійність експлуатації складових частин і допоміжних систем генераторів (P_{oi}) і тому є економічно доцільним попри необхідність витрат на їхнє створення та обслуговування, за умов високої надійності самих СКДГ і малої вірогідності хибних діагнозів [5].

Інший шлях забезпечення надійності в разі ускладнення конструкції ТГ та його допоміжних систем — це резервування. Так, обов'язково резервуються системи збудження, надійність яких є невисокою з причини низької якості складових і великої кількості елементів цих систем.

Нарешті, третій шлях забезпечення надійності — це шлях, який безпосередньо впливає з наведеного вище аналізу, — спрощення конструкції основних вузлів і відмова від низки допоміжних систем за рахунок повернення до менш ефективних схем охолодження, якщо вони з урахуванням сучасних технічних рішень забезпечують задану одиничну потужність. За таких умов неминучий перегляд підходів і критеріїв, раніше прийнятих з позицій економічності (наприклад, зниження питомих витрат на 1 кВт встановленої потужності), у бік підвищення надійності та зменшення вартості обслуговування, навіть зі зменшенням ступеня використання матеріалів і певним зниженням коефіцієнта корисної дії.

Усе викладене вище дозволяє стверджувати, що доцільно розглянути можливості відмови від застосування водневого охолодження для ТГ електростанцій, особливо АЕС, з урахуванням їхнього високого рівня одиничної потужності. Відтак, набуває актуальності відмова від водневого охолодження. За таких обставин, зрозуміло, головну увагу необхідно зосередити на ТГ із повітряним охолодженням, перевагою яких є простота та надійність в експлуатації.

На сьогодні у світі вже накопичений деякий досвід розроблення генераторів із безпосереднім повітряним охолодженням потужністю до 500 МВт. Фірмою Toshiba створено унікальний ТГ із повітряним охолодженням потужністю 520 МВт. Підвищення одиничної потужності машин із повітряним охолодженням надалі обмежується нагрівом обмоток.

На колишньому державному підприємстві «Завод «Електроважмаш»» (м. Харків) була розроблена серія ТГ із повітряним охолодженням одиничною потужністю від 120 до 320 МВт. Так, на початку 2010-х років були закінчені випробування та відправлений замовнику головний зразок нової уніфікованої серії ТА з повним повітряним охолодженням для парових та газових турбін — ТГ типу ТА-120 потужністю 120 МВт (рис. 3).

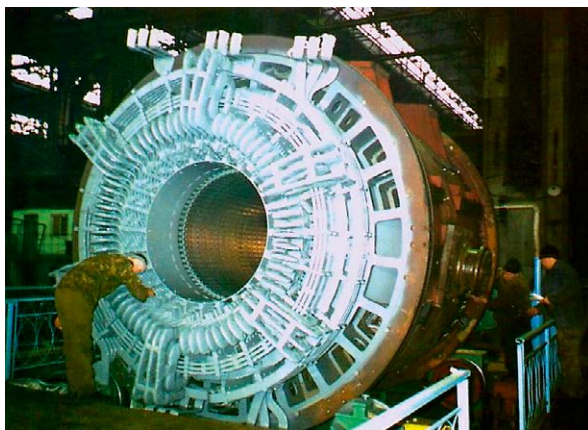


Рис. 3. Головний зразок генератора типу ТА-120

Генератори серії ТА мають низку переваг порівняно з ТГ, що мають водневе та воднево-водяне охолодження. Ці переваги визначають технічну й економічну доцільність використання в енергоустановках з підвищеними вимогами щодо надійності та екологічної сумісності, розширення діапазону припустимого навантаження, зниження експлуатаційних витрат тощо. Головними з них є:

- підвищений коефіцієнт готовності 0,997...0,998 порівняно з 0,95...0,995 для машин із безпосереднім рідинним і водневим охолодженням;

- спрощені умови експлуатації та ремонту, що скорочують терміни проведення і знижують вартість ремонтних робіт;

- підвищена пожежо- та вибухобезпечність;

- простота конструкції, що є передумовою скорочення періоду розроблення та початку виготовлення головних зразків;

- полегшення процедури автоматизації та діагностування;

- підвищена маневреність;

- можливість створення менш газошільного корпусу, а також відсутність масляних ущільнень вала та системи їхнього маслозабезпечення;

- відсутність інших систем охолодження (воднево-го та водяного);

- відсутність необхідності використання дефіцитних матеріалів під час виготовлення, наприклад, гумових ущільнень, фторопластових шлангів, порожнистих мідних провідників тощо.

Крім цього, з економічної точки зору необхідно враховувати оцінку запобіжних втрат від можливої пожежі та зниження витрат на захист від неї.

Використання повного повітряного охолодження стало можливим завдяки застосуванню нових конструкторських і технологічних рішень. Для ротора застосовано безпосереднє охолодження обмотки з розподіленням газу із пазового каналу в радіальні щілиноподібні отвори у провідниках обмотки та викиданням газу в повітряний проміжок між статором і ротором. Осердя та обмотка статора охолоджуються завдяки проходженню газу в системі радіальних й аксіальних каналів без надходження газу, який охолоджує статор, до повітряного проміжку, що значно знижує механічні втрати та підігрів охолоджувального газу. Використання непрямого охолодження для обмотки статора стало можливим як завдяки застосуванню нової, більш тонкої ізоляції класу F, електротехнічної сталі товщиною 0,35 мм зі зменшеними питомими втратами, так і зниженню густини струму шляхом впровадження несиметричної багатопаралельної обмотки з кількістю паралельних гілок, яка перевищує кількість полюсів, разом із з'єднанням фаз за схемою «трикутника» (для деяких виконань).

Усе це дало можливість створити уніфіковану серію з однаковою поперечною геометрією та майже незмінним електромагнітним навантаженням, що зі свого боку дозволяє уніфікувати устаткування й інструмент, зменшити таким чином витрати на підготовку виробництва усієї серії та, як результат, прискорити одночасне виготовлення ТГ різної потужності.

Для підвищення маневреності застосована спеціальна пружна система з'єднання вузлів осердя статора. З метою забезпечення режимів споживання реактивної потужності використана конструкція кінцевої зони осердя із застосуванням мідних екра-

нів під натискними фланцями, східчастості кінцевих пакетів, зменшення їхньої товщини та склеювання [7]. Водночас на головному зразку ТГ досліджено різноманітну конструкцію кінцевої зони осердя статора для виявлення за результатами випробувань оптимального варіанта.

Нова серія ТГ із повним повітряним охолодженням спроектована з урахуванням можливості їхнього встановлення на фундаменти машин аналогічної потужності з водневим та воднево-водяним охолодженням, що відпрацювали свій проектний ресурс. Насамперед вони можуть бути встановлені замість генераторів потужністю 100, 150 і 200 МВт. Водночас розглядається можливість заміни ТГ типу ТВВ потужністю 220 МВт (Рівненська АЕС, Україна).

Згодом колишньому державному підприємстві «Завод “Електроважмаш”» була розроблена серія машин із повітряним охолодженням потужністю до 320 МВт, зокрема асинхронізованих, а також переведено на безводневу (азот) схему охолодження чотириполюсні ТГ типу ТГВ-500 (Нововоронезька АЕС, Росія).

Висновки

Ускладнення конструкції генератора та введення нових допоміжних систем для інтенсифікації охолодження зі зростанням одиничної потужності призводять до зниження його надійності. Для компенсації цього зниження надійності необхідно впроваджувати системи й засоби контролю та діагностики основних вузлів генераторів, резервувати важливі системи забезпечення, а також спрощувати конструкцію основних вузлів шляхом відмови від низки допоміжних систем за рахунок повернення до менш ефективних схем охолодження, якщо вони завдяки сучасним технічним рішенням забезпечують задану одиничну потужність. Тому доцільно розглянути можливості відмови від застосування водневого охолодження для ТГ електростанцій, особливо АЕС, з урахуванням високого рівня їхньої одиничної потужності. За таких обставин головну увагу необхідно зосередити на генераторах із повним повітряним охолодженням, перевагою яких є простота та надійність в експлуатації.

Список використаної літератури

1. Mitigation of Hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants. IAEA-TECDOC-1661. — Vienna : IAEA, 2011.

2. Хуторецкий Г. М. Проектирование турбогенераторов / Г. М. Хуторецкий, М. И. Токов, Е. В. Толвинская. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1987. — 256 с.
3. Турбогенераторы. Расчет и конструкция / В. В. Титов, Г. М. Хуторецкий, Г. А. Загородная [и др.]. — Ленинград : Энергия, 1967. — 896 с.
4. Khvalin D. I. A brief overview for main stages of technological progress in turbogenerator construction / D. I. Khvalin, S. A. Dovydkov // Colloquium-journal. — 2023. — Vol. 1. — № 3 (162). — P. 33–37.
5. Khvalin D. I. Diagnostic and monitoring of generators power plants / D. I. Khvalin. — Boston, USA : Primedia eLaunch LLC, 2023. — 131 p.
6. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій / Ю. В. Зозулін, О. Є. Антонов, В. М. Бичік [та ін.]. — Харків : ПФ Колегіум, 2011. — 228 с.
7. Постников И. М. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов / И. М. Постников, Л. Я. Станиславский, Г. Г. Счастливый. — Киев : Наукова думка, 1971. — 360 с.

D. I. Khvalin

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysohirska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

Actuality and Technical Possibility of Refusal of Turbogenerators Hydrogen Cooling of Nuclear Power Plants

With the help of analysis of cooling type influence on the probability of turbogenerators unfailing operation for different power shown that a design complication and the use of new auxiliary systems for the cooling intensification with increasing power unit leads to the decrease in generators reliability. The main ways to ensure generators reliability are considered: implementation of systems and methods of control and diagnostics of main component parts, the reserve of important machinery systems as well as the simplification of generators design with simultaneous non-use a number of auxiliary systems. The advantages for application of full air cooling in comparison with hydrogen and hydrogen-water cooling are shown and also the need of refusal to use hydrogen cooling for powerful turbogenerators of nuclear power plants units is scientifically substantiated. On the base of analysis for domestic and world experience of design and operation of

a power electrical machines with full air cooling shown that modern level of engineering and technologies allows building high-power turbogenerators with full air cooling for ensuring a fire and explosion safety of thermoelectric and nuclear power plants. In this case, it is necessary to reconsider the economic efficiency criterions towards the increase in reliability and the decrease in maintenance price.

Keywords: powerful turbogenerator, cooling system, nuclear power plants, safety, reliability, efficiency.

References

1. *Mitigation of Hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants*. IAEA-TECDOC-1661. Vienna: IAEA, 2011.
2. Khutoretskiy G. M., Tokov M. I., Tolvinskaya Ye. V. (1987). *Proektirovaniye turbogeneratorov* [Turbogenerators' design]. Leningrad: Energoatomizdat, 256 p. (in Rus.)
3. Titov V. V., Khutoretskiy G. M., Zagorodnaya G. A., et al. (1967). *Turbogeneratoriy. Raschet i konstruktsiya* [Turbogenerators. Calculation and Construction]. Leningrad: Energiya, 896 p. (in Rus.)
4. Khvalin D. I., Dovydkov S. A. (2023). A brief overview for main stages of technological progress in turbogenerator construction. *Colloquium-journal*, vol. 1, no. 3 (162), pp. 33–37.
5. Khvalin D. I. (2023). *Diagnostic and monitoring of generators power plants*. Boston, USA: Primedia eLaunch LLC, 131 p.
6. Zozulin Yu. V., Antonov O. Ie., Bychik V. M., et al. (2011). *Stvorennia novykh typiv ta modernizatsiia diiuchykh turbogeneratoriv dlia teplovykh elektrychnykh stantsii* [The creation of new types and modernization of existing turbogenerators for thermoelectric power station]. Kharkiv: PF Kolehium, 2011. 228 p. (in Ukr.)
7. Postnikov I. M., Stanislavskiy L. Ya., Schastlivyi G. G. (1971). *Elektromagnitnyye i teplovyye protsessy v kontsevykh chastyakh moshchnykh turbogeneratorov* [Electromagnetic and thermal processes in the end parts of powerful turbogenerators]. Kyiv: Naukova dumka, 360 p. (in Rus.)

Надійшла 06.12.2023

Received 06.12.2023

І. О. Павленко, О. В. Святун, О. В. Сваричевська, О. В. Гайдар, С. В. Телецька

Інститут ядерних досліджень НАН України, просп. Науки, 47, Київ, 03028, Україна

Аналіз радіаційного забруднення в зоні впливу дослідницького ядерного реактора Інституту ядерних досліджень НАН України та створення комплексної інформаційної системи «Моніторинг та безпека»

Ключові слова:

дослідницький ядерний реактор, радіаційний моніторинг, радіонукліди, санітарно-захисна зона, навколишнє природне середовище, база даних, комплексна інформаційна система

Досліджувалися показники системи радіаційного моніторингу навколишнього природного середовища в санітарно-захисній зоні (СЗЗ) дослідницького ядерного реактора Інституту ядерних досліджень (ІЯД) НАН України, а саме вперше рівні бета-активності за 2014–2023 рр. Для якісного проведення аналізу даних регулярного багаторічного моніторингу радіаційного стану у СЗЗ та зоні спостереження дослідницького ядерного реактора ВВР-М ІЯД НАН України в Центрі екологічних проблем атомної енергетики ІЯД НАН України була розроблена комплексна інформаційна система «Моніторинг та безпека», у структурі якої враховувалась вимога легкого її переносу на різні платформи реляційних баз.

Вступ

Дослідницький ядерний реактор (ДЯР) ВВР-М Інституту ядерних досліджень (ІЯД) НАН України протягом усіх років експлуатації був експериментальною базою для фундаментальних і прикладних досліджень у галузях ядерної та нейтронної фізики, радіаційної фізики, радіаційного та реакторного матеріалознавства, фізики та техніки реакторів, радіобіології та медицини.

Починаючи з пуску реактора 12 лютого 1960 р. і до сьогодні, проводиться регламентний радіаційний моніторинг на території санітарно-захисної зони (СЗЗ) і зони спостереження (ЗС).

Основними завданнями комплексного моніторингу є отримання даних щодо вмісту техногенних радіонуклідів реакторного походження в об'єктах довкілля в СЗЗ і ЗС; прогноз впливу на довкілля робіт зі зняття з експлуатації дослідницького реактора ВВР-М.

У цій роботі авторами досліджувалися показники системи радіаційного моніторингу навколишнього природного середовища в СЗЗ ДЯР ІЯД НАН України, а саме рівні сумарної бета-активності за 2014–2023 рр., які не були детально проаналізовані в попередніх статтях.

Радіаційний моніторинг впливу експлуатації ДЯР ВВР-М здійснювали відповідно до вимог чинного законодавства та «Положення ЦЭПАЭ ИЯИ НАН Украины по радиационному контролю объектов внешней среды», узгодженого головним санітарним лікарем Києва 05.06.1995 р. У зв'язку з тим, що ДЯР ВВР-М експлуатується в межах багатомільйонного Києва, такі дослідження є особливо актуальними для радіаційної безпеки населення і довкілля.

Матеріали і методи

Метою роботи є аналіз даних радіаційного моніторингу в СЗЗ ДЯР ВВР-М за 2014–2023 рр. Об'єктами

© І. О. Павленко, О. В. Святун, О. В. Сваричевська, О. В. Гайдар, С. В. Телецька, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

дослідження були питома бета-активність у приземному шарі атмосфери, пилу, що осідає, та атмосферних опадах, а також концентрація бета-активних аерозолів у повітрі.

Визначення рівнів радіоактивного забруднення повітря проводилося седиментаційним та аспіраційним методами [1]. Дослідження радіоактивного забруднення повітря виконували седиментаційним методом у 6 стаціонарних точках СЗЗ (рис. 1). Щільності випадань бета-активних радіонуклідів з осідаючим пилом та атмосферними опадами визначали в цих точках щомісячно. Об'ємна активність бета-аерозолів у повітрі визначалась за допомогою аспіраційного методу двічі на тиждень прокачуванням атмосферного повітря в контрольній точці.

Підготовку зразків і радіометричне та спектрометричне вимірювання вмісту в них радіонуклідів проводили в лабораторії Центру екологічних проблем атомної енергетики (ЦЕПАЕ) на підставі Положення з радіаційного контролю навколишнього природного середовища в СЗЗ та ЗС ДЯР ВВР-М ІЯД, узгодженого відповідно до п. 5.2 ДСП 6.177-2005-09-02 «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України» Головного управління Держпродспожислужби в Києві 31.01.2022 р. Вимірювання загальної бета-активності здійснювали на установці УМФ-1500.

Апаратура, що використовується для вимірювання, атестована та проходить регулярні планові перевірки. Під час виконання досліджень в основному застосовуються загальноприйняті методики. Похибка вимірювань не перевищує 20–35%.

Чотири зі стаціонарних точок — південь-1 (Пд-1), захід-1 (З-1), північний-захід-1 (ПнЗ-1) та північ-1 (Пн-1) — знаходяться на відстані не менше трьох висот вентиляційної труби реактора (~200 м), а дві — схід-1 (С-1) та південний-схід-1 (ПдС-1) — на відстані 100 і 120 м відповідно.

Основні результати досліджень

Радіоактивне навантаження в приземному шарі атмосфери формується за рахунок радіонуклідів як природного, так і штучного походження. На сьогодні природна складова сумарної бета-активності визначається ізотопами урану, торію, продуктами їхнього поділу та дочірними продуктами їхнього розпаду, а також іншими радіоізотопами природного утворення [2, 3].

Середньорічні значення щільності випадань бета-активних радіонуклідів з осідаючим пилом та

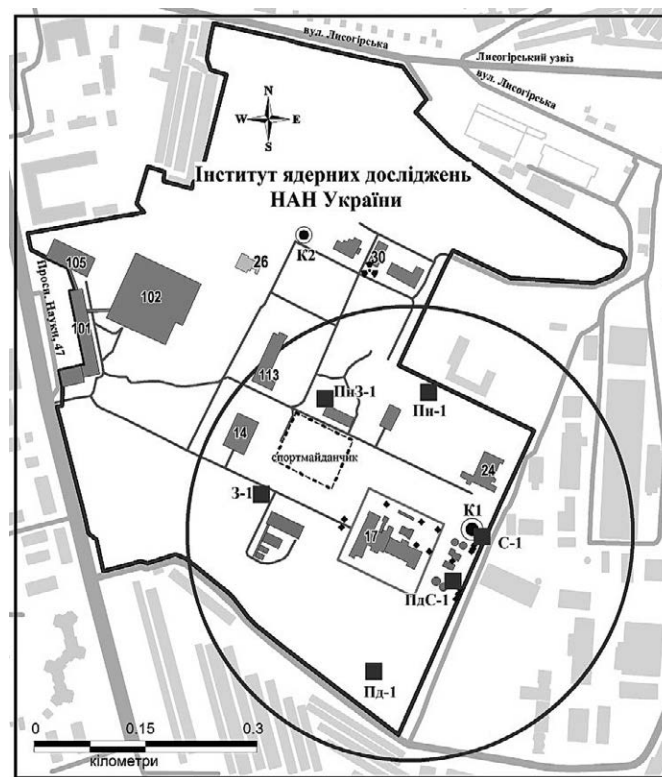


Рис. 1. Схема розміщення стаціонарних точок радіаційного контролю в СЗЗ

опадами в контрольних точках у СЗЗ у вказаний період коливалися від 5,7 до 14,8 Бк/м². Максимальні значення параметра спостерігалися у 2014–2015 рр. Аналіз показників поверхневої щільності випадань бета-активних радіонуклідів з осідаючим пилом та атмосферними опадами в СЗЗ ДЯР ВВР-М виявили особливості динаміки показників, а саме в ці роки спостерігали суттєве перевищення показників щільності випадань у стаціонарних точках у різні місяці (рис. 2). Враховуючи, що в 2014–2015 рр. ДЯР ВВР-М не працював, підвищення значень досліджуваного показника в ці періоди не пов'язане з впливом експлуатації реактора на приповерхневий шар атмосфери. Це може бути наслідком пожеж у Чорнобильській зоні. У 2015 р. була зафіксована наймасштабніша пожежа. Короткочасне підвищення величини досліджуваного показника може бути зумовлене продуктами горіння. З 2016 до 2023 р. суттєвих коливань цього параметра не спостерігали — 6,6–9,7 Бк/м² відповідає похибці вимірювань.

Показники концентрації бета-активних аерозолів у повітрі протягом останніх 10 років не демонстрували суттєвих коливань і варіювали від $2,40 \cdot 10^{-2}$ до $3,60 \cdot 10^{-2}$ Бк/м³, що вкладається в допустиму похибку і свідчить про те, що за весь період спосте-

режень не виявлено збільшення вмісту радіоактивних речовин у контрольних об'єктах навколишнього природного середовища (рис. 3). Однак під час аналізу динаміки концентрації бета-аерозолів у повітрі суттєвого зростання їхньої кількості у 2014–2015 рр. не спостерігалось. Це може бути пов'язано з відмінностями при відборі досліджуваного матеріалу в першому і другому випадках: за аспіраційного методу відбір матеріалу відбувається протягом двох годин раз на три дні; для аналізу щільності випадань бета-активних радіонуклідів накопичення матеріалу здійснюється протягом місяця. Отже, під час прокачування повітря в першому випадку міг бути відсутній вплив напрямку вітру на концентрацію бета-аерозолів у повітрі, а в разі накопичення матеріалу протягом місяця існувала набагато більша ймовірність надходження бета-активних радіонуклідів в осідаючий пил та опади.

Для якісного проведення аналізу даних регулярного багаторічного моніторингу радіаційного стану у СЗЗ та ЗС ДЯР ВВР-М ІЯД НАН України [4–6], а також для розробки науково обґрунтованих підходів до оптимізації розташування стаціонарних точок контролю з урахуванням зміни етапів циклу функціонування ядерної установки і природних умов було необхідно створити комплексну базу даних (інформаційну систему). Для цього в ЦЕПАЕ ІЯД НАН України була розроблена комплексна інформаційна система «Моніторинг та безпека», у структурі якої враховувалась вимога легкого її переносу на різні платформи реляційних баз [7]. Ця структура включає два основних блоки:

а) блок таблиць даних регулярного моніторингу за стаціонарною мережею точок контролю. Таблиці мають структуру, що максимально відповідає встановленій формі подання даних експериментальних

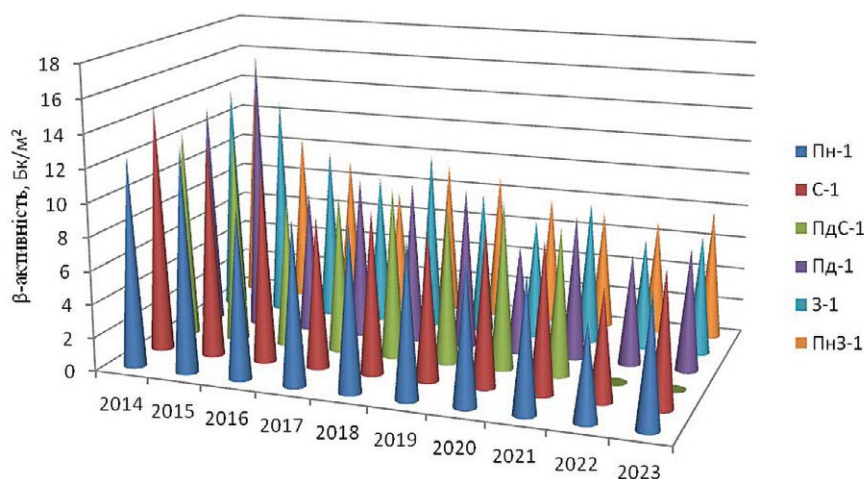


Рис. 2. Сумарна питома бета-активність осідаючого пилу та атмосферних випадань

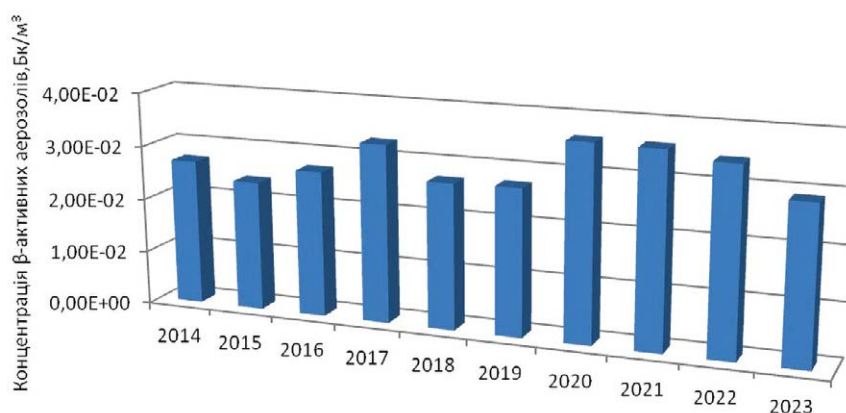


Рис. 3. Середньорічна концентрація бета-активних аерозолів у повітрі

визначень за окремими контрольованими показниками, що спрощує введення даних та їхній попередній аналіз;

б) блок таблиць даних комплексної інформаційної системи, яка, базуючись на уніфікованому підході з використанням спрощеної структури таблиць, давала можливість користувачеві розширювати перелік об'єктів та їхніх атрибутивних ознак. При цьому важливого значення набуває проблема включення даних з різною повнотою та детальністю опису, використання різних систем одиниць фізичних величин.

Блок таблиць даних регулярного моніторингу за стаціонарною мережею точок контролю в СЗЗ та ЗС ВВР-М ІЯД НАН України включає 8 спеціалізованих таблиць, структура яких відповідає структурі даних параметрів контрольованих об'єктів навколишнього середовища, а саме:

таблиця даних визначень бета-активності опадів та випадань;

таблиця даних визначень вмісту ^{137}Cs та ^{90}Sr у зразках верхнього шару ґрунту;

таблиця даних визначень вмісту ^{137}Cs та ^{90}Sr у зразках рослинності;

таблиця даних визначень вмісту ^3H у зразках стічних вод, талої води та березового соку;

таблиця даних визначень вмісту ^{137}Cs та ^{90}Sr у зразках, відібраних зі спостережуваних свердловин;

таблиця даних визначення загальної питомої бета-активності у скидних водах ІЯД НАН України;

таблиця даних визначення об'ємної активності у пробах приземного шару повітря;

таблиця даних визначення потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання в контрольних точках.

Під час розробки структури комплексної інформаційної системи «Моніторинг та безпека» враховувалась вимога легкого її переносу на різні платформи реляційних баз. На початковому етапі використано MS ACCESS [8]. Основу комплексної інформаційної системи складають 5 основних таблиць: таблиця об'єктів та чотири таблиці з їхніми атрибутивними даними (рис. 4).

Для аналізу просторово розподіленої інформації використовується сучасне програмне забезпечення MapInfo [9].

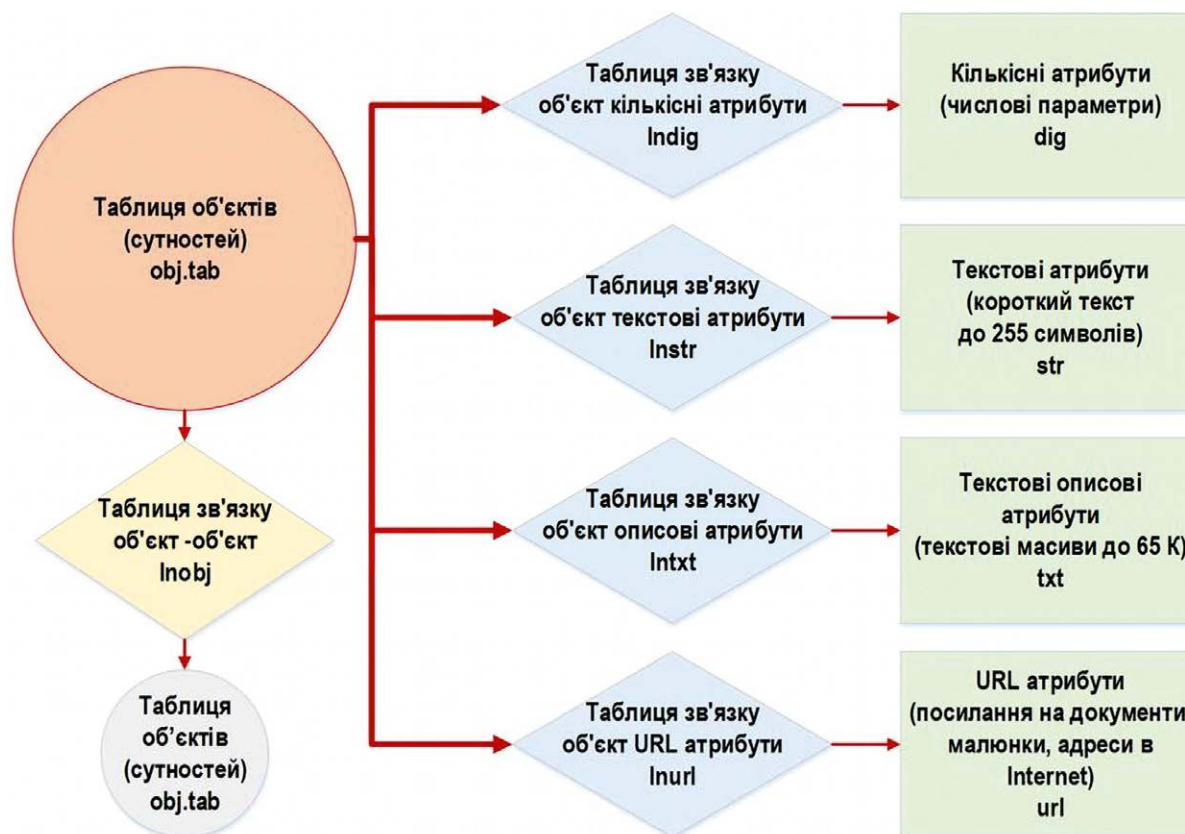


Рис. 4. Схема взаємозв'язків між основними таблицями комплексної інформаційної системи «Моніторинг та безпека»

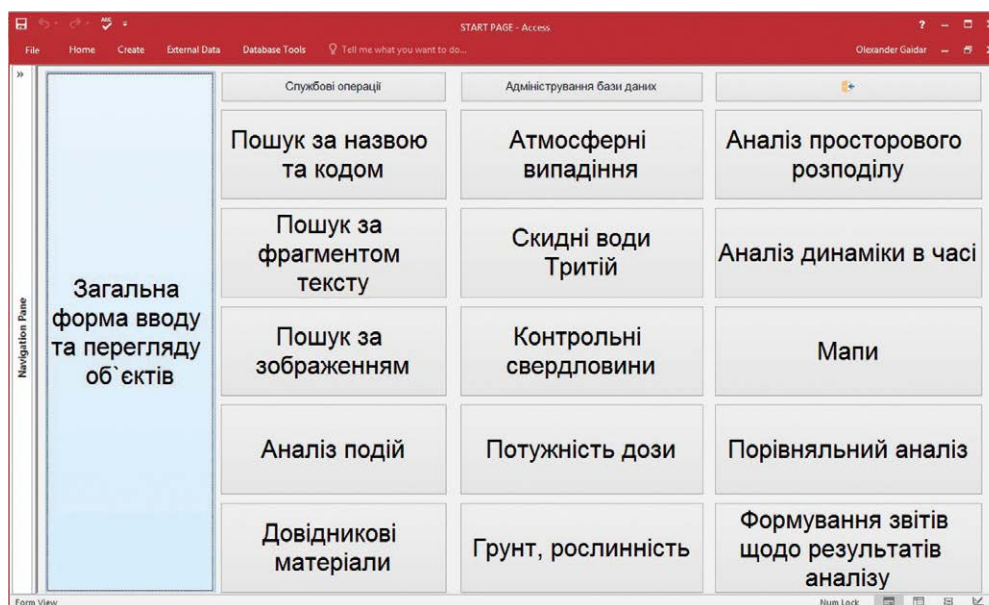


Рис. 5. Основна екранна форма інтерфейсу користувача

Також обране програмне забезпечення дає змогу здійснювати:

прямий доступ до файлів із даними у форматі таблиць Microsoft Excel, Microsoft Access;

імпорт даних та графічних файлів різних форматів;

перегляд даних одночасно у графічній і табличній формах. Технологія синхронного представлення даних дає змогу відкривати одночасно кілька вікон, що містять ті самі дані, причому зміна даних в одному з вікон супроводжується автоматичною зміною представлення цих даних у всіх інших вікнах.

Для окремих груп чи класів об'єктів розроблені спеціалізовані форми представлення інформації з урахуванням її характеру (рис. 5).

Висновки

Результати радіаційного моніторингу приземного шару атмосферного повітря на території СЗЗ ДЯР ВВР-М свідчать, що за період 2014–2023 рр. не виявлено достовірного зростання вмісту радіоактивних речовин у контрольованих об'єктах навколишнього природного середовища.

Розроблена в ЦЕПАЕ ІЯД НАН України комплексна інформаційна система «Моніторинг та безпека» дає змогу систематизувати отримані дані моніторингу, постійно поповнювати їхню базу та представляти результати в зручному і сучасному вигляді.

Список використаної літератури

1. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / под ред. Л. Н. Марья, А. С. Зыковой. — Москва, 1980. — 356 с.
2. Гірій В. А. Динаміка радіоактивного забруднення приземного шару атмосфери у постчорнобильський період / В. А. Гірій, О. О. Косовець, Ж. В. Лук'янова // Праці Центральної геофізичної обсерваторії. — 2009. — Вип. 5 (19). — С. 21–31.
3. Звіт Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського. Розділ 3. Радіоактивне забруднення атмосферного повітря. — Київ: ЦГО, 2023. — С. 22–29.
4. Радіаційний моніторинг об'єктів навколишнього природного середовища в зоні впливу дослідницького ядерного реактора ВВР-М ІЯД НАН України / В. В. Тришин, О. В. Сваричевська, І. О. Павленко [та ін.] // Ядерна фізика та енергетика. — 2010. — Т. 11. — С. 165–168.
5. Аналіз динаміки показників сумарної питомої β -активності осідаючого пилу та атмосферних випадін у санітарно-захисній зоні реактора ВВР-М ІЯД НАН України за 2014–2018 рр. / І. О. Павленко, О. В. Сваричевська, А. Д. Саженьюк [та ін.] // Ядерна фізика та енергетика. — 2020. — Т. 21. — С. 58–63.
6. Аналіз результатів радіаційного стану в санітарно-захисній зоні та зоні спостереження дослідницького ядерного реактора ВВР-М Інституту ядерних досліджень НАН України в 2021 році / О. В. Гайдар,

- В. В. Тришин, О. В. Сваричевська [та ін.] // Ядерна фізика та енергетика. — 2023. — Т. 24. — С. 131–13.
7. Звіт про науково-дослідну роботу «Дослідження процесів формування техногенного забруднення в межах великого агломераційного комплексу за рахунок надходження важких металів та радіонуклідів у навколишнє середовище». — Київ : НАН України, Ін-т ядерних досліджень, 2020. — 227 с.
 8. Microsoft Access. — Режим доступу: <https://www.microsoft.com/uk-ua/microsoft-365/access>.
 9. MapInfo Professional. — Режим доступу: <https://www.geoguide.com.ua/software/software.php?part=pitney&art=mapinfo>.

**I. O. Pavlenko, O. V. Sviatun, O. V. Svarychevska,
O. V. Gaidar, S. V. Teletska**

*Institute for Nuclear Research, NAS of Ukraine,
47, Nauky ave, Kyiv, 03028, Ukraine*

Analysis of Radiation Pollution in the Zone of Influence of the Research Nuclear Reactor of the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine and the Creation of an Integrated Information System “Monitoring and Safety”

WWR-M nuclear research reactor (NRR) of the Institute for Nuclear Research (INR) of the National Academy of Sciences of Ukraine was an experimental base for scientific research. During the entire period of operation of the reactor the regular radiation monitoring is carried out on the territory of the sanitary protection zone (SPZ) and the observation zone.

In this article, the authors studied several indicators of the radiation monitoring system of the natural environment in the SPZ of NRR namely the level of beta-activity for 2014–2023. It was established that the indicators of the concentration of beta-active aerosols in the air during the last ten years did not show significant fluctuations, which indicates that during the entire period of observation, no increase in the content of radioactive substances was detected in the control objects of the natural environment. But during the study of the average annual values of the density of beta-active radionuclides with settling dust and precipitation at control points in the SPZ in the specified period, the maximum values of this parameter were observed in 2014–2015, which may be a consequence of the fires in the Chornobyl zone.

A comprehensive database has been created to develop science-based approaches to optimize the location of stationary control points taking into account changes in the stages of the nuclear installation operation cycle and natural conditions, and to systematize radiation monitoring data.

Keywords: nuclear research reactor, radiation monitoring, radionuclides, sanitary protection zone, natural environment, database, integrated information system.

References

1. Marey A. I., Zyкова A. S. (eds) (1980). *Metodicheskie rekomendatsyi po sanitarnomu kontroliu za sodержaniyem radioaktivnykh veshchestv v objektakh vneshnei sredy*. [Guidelines for sanitary control of the content of radioactive substances in the environment]. Moscow. 356 p. (in Rus.)
2. Hirii V. A., Kosovets O. O., Lukianova Zh. V. (2009). [Dynamika radioaktyvnoho zabrudnennia pryzemnoho sharu atmosfery u postchornobylskiy period.] *Pratsi Tsentralnoi heofizychnoi observatorii* [Proceedings of the Central Geophysical Observatory], vol. 19, no. 5, pp. 21–31. (in Ukr.)
3. Boris Sresnevsky Central Geophysical Observatory (2023). *Zvit Tsentralnoii heofizychnoi observatorii imeni Borysa Sreznevskoho. Rozdil 3. Radioaktyvne zabrudnennia atmosfernoho povitria*. [Report of the Borys Sresnevsky Central Geophysical Observatory. Chapter 3. Radioactive pollution of atmospheric air] Kyiv: Boris Sresnevsky Central Geophysical Observatory of the State Emergency Service of Ukraine, pp. 22–29. (in Ukr.)
4. Tryshyn V. V., Svarychevska O. V., Pavlenko I. O., Dziatkivska N. M., Sazheniuk A. D., Kuzmina A. Y. (2010). [Radiation monitoring of environmental objects in the zone of influence of the WWR-M research nuclear reactor of the KINR of National Academy of Sciences of Ukraine]. *Yaderna fizyka ta enerhetyka* [Nuclear Physics and Atomic Energy], vol. 11, no. 4, pp. 165–168. (in Ukr.)
5. Pavlenko I. O., Svarychevska O. V., Sazheniuk A. D., Sviatun O. V., Teletska S. V. (2020). [Analysis of the dynamics of indicators of the total specific β -activity of settling dust and atmospheric precipitation in the sanitary protection zone of the WWR-M reactor of Institute for Nuclear Research of National Academy of Sciences of Ukraine for 2014–2018]. *Yaderna fizyka ta enerhetyka* [Nuclear Physics and Atomic Energy], vol. 21, no. 1, pp. 58–63. (in Ukr.)
6. Gaidar O. V., Tryshyn V. V., Svarychevska O. V., Pavlenko I. O., Sviatun O. V., Maliuk I. A., Teletska S. V. (2023). [Analysis of the results of the radiation status in the sanitary protection zone and the observation zone of the WWR-M

- research nuclear reactor of the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2021]. *Yaderna fizyka ta enerhetyka* [Nuclear Physics and Atomic Energy], vol. 24 (2), pp. 131–137. (in Ukr.)
7. *Doslidzhennia protsesiv formuvannia tekhnohennoho zabrudnennia v mezhakh velykoho ahlomeratsiinoho kompleksu za rakhunok nadkhodzhennia vazhkykh metaliv ta radionuklidiv u navkolyshnie seredovyshche* [Report on the research work “Investigation of the processes of the formation of man-made pollution within the limits of a large agglomeration complex due to the entry of heavy metals and radionuclides into the environment”]. Kyiv: Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2020, 227 p. (in Ukr.)
8. *Microsoft Access*. Available at: <https://www.microsoft.com/uk-ua/microsoft-365/access>.
9. *MapInfo Professional*. Available at: <http://www.geoguide.com.ua/software/software.php?part=pitney&art=mapinfo>.

Надійшла 18.06.2024

Received 18.06.2024

О. В. Балан, Л. І. Павловський, С. С. Підберезний, В. М. Рудько

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

Щодо доступу персоналу в зони розташування нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», що підлягають демонтажу

Ключові слова:

об'єкт «Укриття»,
пусковий комплекс ПК-1 (ПК-2),
маршрути доступу,
зона виконання робіт,
нестабільні конструкції,
захисна кабіна,
відвернута доза

Наведено основні результати дослідження маршрутів доступу персоналу в зоні виконання робіт (ЗВР) з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» та радіаційних умов на ділянках їхнього розташування. Подано можливі індивідуальні дози персоналу на маршрутах доступу до ЗВР і назад. За існуючими даними з радіаційної обстановки та кутового розподілу гамма-випромінювання по маршрутах за допомогою програмного засобу HVRC VRdose Planner Pro v. 2.2.2, розробленого в Інституті енергетичних технологій Норвегії, проведено моделювання параметрів екранування захисної кабіни в районі балки «Восьминіг». На прикладі робіт з демонтажу конструкції з'єднувальної ферми південної частини покрівлі об'єкта «Укриття» проведено розрахунки затрат часу на доступ персоналу до ЗВР і назад своїм ходом та із застосуванням для переміщення персоналу захисної кабіни, яка транспортується краном нового безпечного конфайнмента. Оцінено величину відвернутої дози персоналу за рахунок застосування захисної кабіни.

Вступ

За результатами багаторічних досліджень технічного стану об'єкта «Укриття» встановлено перелік його нестабільних будівельних конструкцій, імовірність обвалення яких неприпустимо велика. У 2004–2008 рр. були реалізовані невідкладні стабілізаційні заходи, що забезпечують прийнятний рівень безпеки об'єкта «Укриття» тільки з огляду на короткостроковий термін експлуатації стабілізованих будівельних конструкцій. Надалі проблема нестабільних конструкцій повинна вирішуватись шляхом їхнього демонтажу всередині нового безпечного конфайнмента (НБК). При цьому з урахуванням технічного стану нестабільних конструкцій їхній демонтаж запропоновано виконати послідовно у два етапи: «ранній» демонтаж та «відкладений» демонтаж [1].

До переліку конструкцій для «раннього» демонтажу включено металоконструкції, що формують зов-

нішню оболонку об'єкта «Укриття» (рис. 1), включно з похилими щитами-нащільниками, що опираються на покриття машинного залу й південні щити-«ключки», а також трубний накат, балку «Восьминіг», балку «Мамонт», опори балки «Мамонт», завали на деаераторний етажерці (ДЕ) та аварійні плити її покриття. Решта нестабільних конструкцій, зокрема балки Б1 і Б2, завали та плити перекриття над приміщенням 805/3, об'ємний блок «Собачий дім» та інші конструкції, віднесена до «відкладеного» демонтажу (рис. 2).

У рамках першого пускового комплексу НБК (ПК-1 НБК) передбачено важливі складові інфраструктури для проведення демонтажу нестабільних конструкцій, а саме система основних кранів (СОК) і майданчик для складування демонтованих конструкцій та подальшого поводження з ними [2].

Діяльність з демонтажу нестабільних конструкцій буде здійснюватися в умовах об'єкта «Укриття» зі складною радіаційною обстановкою та за наявності

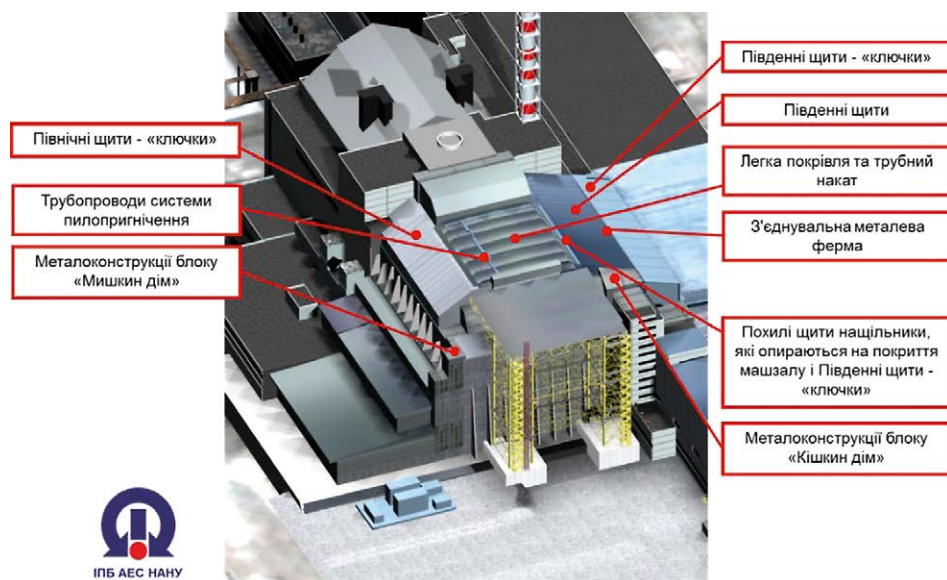


Рис. 1. Нестабільні конструкції для «раннього» демонтажу

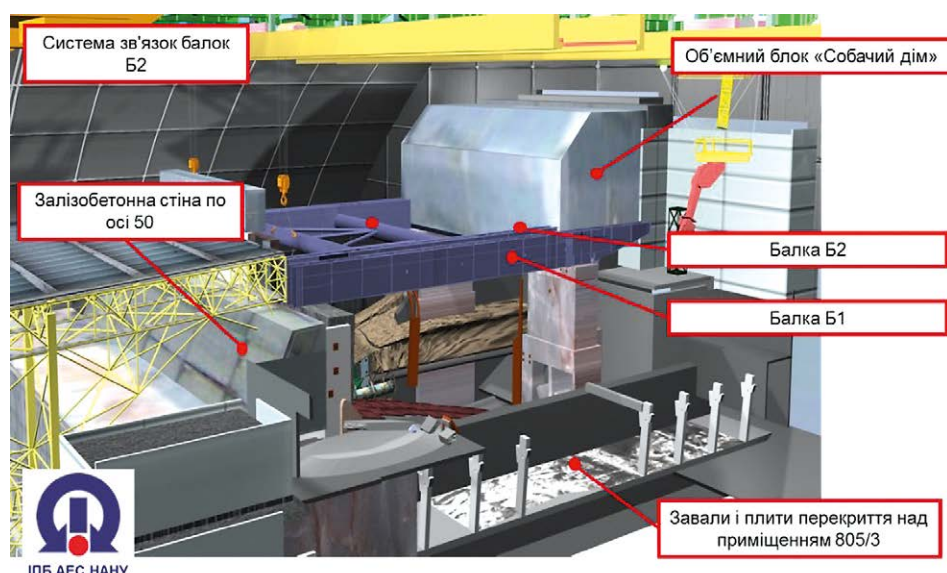


Рис. 2. Нестабільні конструкції для «відкладеного» демонтажу

інших небезпечних факторів (ризик руїнування пошкоджених конструкцій і окремих елементів, перепади висот, наявність отворів тощо). Це потребує впровадження всебічно зважених технологічних рішень з організації безпечного виконання демонтажних робіт, зокрема рішень щодо безпечного доступу персоналу до місць виконання робіт.

Фахівцями ІПБ АЕС НАН України в 2021 р. були проведені комплексні дослідження радіаційних умов як у зонах робіт з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття», так і на шляхах доступу до

них. Отримані результати підтвердили складність здійснення діяльності з демонтажу нестабільних конструкцій, оскільки роботи будуть проводитися в радіаційних умовах, де величини потужності дози (ПД) у багатьох зонах досягають більше 10 мЗв/год [3–5]. Згідно з роботою [5] величини ПД більше 15 мЗв/год зафіксовані в зонах виконання робіт (ЗВР): по балках «Мамонт» і «Восьминіг» (між осями 44–49), по завалях над перекриттям (ДЕ), по легкій покрівлі та накату з труб над центральним залом, а також у ЗВР по східній зоні обпирання блоків балок Б1 і Б2 на венти-

ляційні шахти. Найбільші величини ПД зафіксовані в ЗВР по накату з труб у районі блоку «Собачий дім» (понад 48 мЗв/год) та на завалах над перекриттям ДЕ (понад 35 мЗв/год).

У ЗВР з такими умовами залучення персоналу до фізичних робіт має бути виключене або зведене до мінімуму, тому має бути впроваджена ідея застосування безлюдних технологій із залученням систем НБК, включно з СОК, і дистанційно керованої техніки.

У 2016 р. були розроблені проектні рішення щодо робіт з демонтажу з'єднувальної ферми південної частини покрівлі об'єкта «Укриття» [6]. У цьому проекті була запропонована технологія демонтажу з'єднувальної ферми із застосуванням СОК з мобільною інструментальною платформою і дистанційно керованим механізмом, що комплектувався маніпулятором і змінними навісними інструментами.

Включно з безпосередніми можливостями виконання технологічних операцій з демонтажу конструкцій проектом СОК передбачена функція транспортування персоналу на робочі місця в об'єкті «Укриття» з використанням екранованої захисної kabіни. Для виконання цієї функції був передбачений спеціальний вантажний візок, що забезпечує всі вимоги з безпеки під час транспортування персоналу таким чином. У роботі [6] для безпечного доступу персоналу в ЗВР була обґрунтована ідея застосування екранованої захисної kabіни, що могла б транспортуватися за допомогою одного з кранів НБК. Передбачалось, що персонал міг би періодично здійснювати контроль і за необхідності виконувати незначні допоміжні роботи.

У цій роботі акцентується увага на одному з важливих заходів із підвищення радіаційної безпеки, а саме зниження дозовитрат персоналу на шляхах доступу до робочих місць за рахунок використання захисної kabіни. На прикладі робіт з демонтажу конструкції з'єднувальної ферми оцінено величину відвернутої колективної дози персоналу за рахунок застосування захисної kabіни для транспортування персоналу в ЗВР у порівнянні з дозовитратами без використання захисної kabіни, тобто руху своїм ходом.

Аналіз наявних шляхів доступу

У процесі експлуатації об'єкта «Укриття» за станом конструкцій був організований системний нагляд включно з візуальним. Для здійснення візуального нагляду до всіх щитів і блоків покриття, а також

опорних балок об'єкта «Укриття» були прокладені ходові трапи, містки, переходи і драбини, які забезпечували персоналу безпечний доступ до конструкції, що досліджувалась. Після введення в експлуатацію НБК і до цього часу шляхи доступу до конструкцій, що будуть підлягати демонтажу, залишаються незмінними.

На сьогодні існує дві можливості доступу до нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» — з півдня і заходу. Переміщення персоналу шляхами доступу з південного боку об'єкта «Укриття» (рис. 3 і 4) здійснюється описаним далі чином.

На поверхню конструкцій (маршрут ПД-1) — загальноприйнятий маршрут від адміністративно-



Рис. 3. Загальний вигляд засобів шляхів доступу з південного боку об'єкта «Укриття»

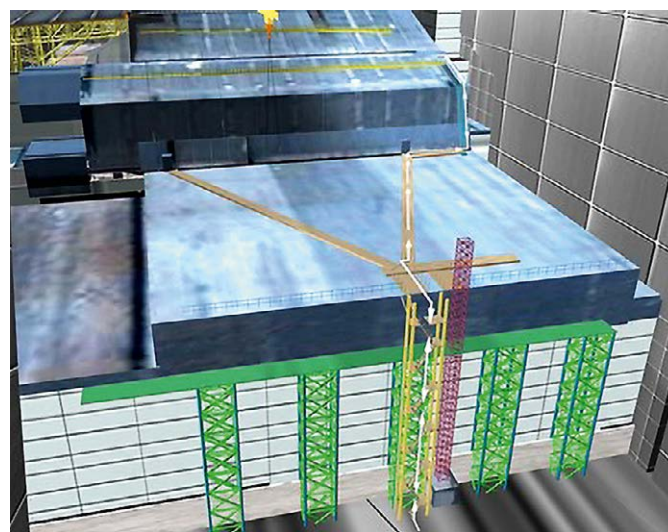


Рис. 4. Комп'ютерна модель засобів шляхів доступу на щити-«ключки» з південного боку об'єкта «Укриття»

побутового комплексу (АПК-1) і обов'язкові процедури з допуску до робіт $\Rightarrow$ прохід по коридору Г262 через вестибюль прибудови (приміщення 101) вихід на територію $\Rightarrow$ рух по дорозі між осями 71–72 $\Rightarrow$ уздовж машинного залу до шлюзу доступу пожежних підрозділів (ШДПП) $\Rightarrow$ прохід через коридор 101 ШДПП до основного об'єму НБК, потім до місця металевих сходів по осі А, 45 $\Rightarrow$ підйом металевими сходами на високу покрівлю позн. 43,150 або підйом у кабіні вантажопасажирського підйомника $\Rightarrow$ рух по високій покрівлі машинного залу від осі А, 45 до осі Б, 41 $\Rightarrow$ підйом по металевій драбині біля осі 41 на поверхню південної частини оболонки об'єкта «Укриття».

Згідно з роботою [3] індивідуальна доза на маршруті ПД-1 становить (мкЗв): до похилих щитів-нащільників — 17, до південних щитів-«ключок» — 51, до південних щитів — 70 і до металоконструкцій «Кішкин дім» — 150.

Під поверхню конструкцій (маршрут ПД-2) — загальноприйнятий маршрут від АПК-1 і обов'язкові процедури з допуску до робіт $\Rightarrow$ прохід по коридору Г262 через вестибюль прибудови (приміщення 101) вихід на територію $\Rightarrow$ рух по дорозі між осями 71–72 $\Rightarrow$ уздовж машинного залу до ШДПП $\Rightarrow$ прохід через коридор 101 ШДПП до основного об'єму НБК, потім до місця металевих сходів по осі А, 45 $\Rightarrow$ підйом металевими сходами на високу покрівлю позн. 43,150 або підйом у кабіні вантажопасажирського підйомника $\Rightarrow$ рух по високій покрівлі машинного залу від осі А, 45 до осі Б, 49–50 (до осі Б, 42–43) до входів у щитах-«ключках» $\Rightarrow$ прохід у підщитовий простір.

Згідно з роботою [3] індивідуальна доза на маршруті ПД-2 становить (мкЗв): до балки «Восьминіг» — 17, до балки «Мамонт» — 20, до західної опори балки «Мамонт» — 25, до східної опори балки «Мамонт» — 18 і до завалів на ДЕ — 17.

Доступ персоналу із західного боку об'єкта «Укриття» (рис. 5) відбувається *на поверхню конструкцій (маршрут ПН-1)* — загальноприйнятий маршрут від АПК-1 та обов'язкові процедури з допуску до робіт $\Rightarrow$ прохід по коридору Г262 через «брудний» вихід на територію НБК у подарковому просторі $\Rightarrow$ рух до майданчика мобільної системи пилопригнічення $\Rightarrow$ рух до підйомника (по осі С, 55) $\Rightarrow$ підйом на підйомнику на позн. 51,440 $\Rightarrow$ підйом металевими сходами (по осі Р, 49–51) до горизонтальної частини північних щитів-«ключок» $\Rightarrow$ рух по горизонтальній частині північних щитів з виходом на поверхню північної частини оболонки об'єкта

«Укриття» (північні щити-«ключки», легка покрівля, накат із труб, блоки балок Б1 і Б2).

Згідно з роботою [3] індивідуальна доза на маршруті ПН-1 становить (мкЗв): до блоку «Мишкин дім» — 16, до північних щитів-«ключок» — 193, до легкої покрівлі — 121, до накату з труб над центральним залом — 209, до зони обпирання блоку балок Б1 і Б2 на стіну по осях Ж і П — 168 і до зони обпирання блоків балок Б1 і Б2 на вентиляційні шахти по осях Ж і П — 209.

Слід зазначити, що шлях із західного боку об'єкта «Укриття» дає змогу здійснити доступ до конструкцій, розташованих як із північного боку об'єкта, так і в центральній його частині.

Указані шляхи доступу наразі дають можливість дістатися до всіх перелічених нестабільних конструкцій, але все зміниться, коли елементи захисної оболонки об'єкта «Укриття» почнуть послідовно демонтуватися. У першу чергу зміни будуть стосуватися шляхів доступу, що прокладені по елементах покрівлі. Оскільки частина шляхів доступу (трапи, переходи, містки) закріплена на щитах покрівлі об'єкта «Укриття», то в процесі, а особливо після їхнього демонтажу, цільні ланцюжки шляхів розірвуться й доступ до певних конструкцій стане неможливий. Елементи шляхів доступу будуть демонтуватися разом із конструкціям покрівлі або перед їхнім демон-



Рис. 5. Загальний вигляд засобів шляхів доступу (сходові клітки і підйомник по осі С, 55) у район північних щитів-«ключок» із західного боку об'єкта «Укриття»

тажем. Наприклад, перед демонтажем з'єднувальної ферми будуть демонтовані перехідні містки, прокладені перпендикулярно її поясам, а до демонтажу південних щитів-«ключок» і південних щитів будуть демонтовані трапи, прокладені вздовж стропувальних гаків цих конструкцій. Крім того, після демонтажу південних щитів-«ключок» буде знята драбина біля осі 41, тобто виходу з покрівлі машинного залу на південні щити не буде. У процесі демонтажу легкої покрівлі над накатом із труб будуть попередньо зняті елементи шляхів доступу до центральної частини об'єкта «Укриття», а після демонтажу північних щитів-«ключок» із ходовими трапами обірветься шлях доступу з північного боку. Як приклад відсутності доступу після демонтажу частини конструкцій можна навести південні щити. Доступ на них був організований з південного боку, через трапи на покрівлі машинного залу по драбині біля осі 41. Як уже зазначалось, у процесі демонтажу південних щитів-«ключок» драбина біля осі 41 буде демонтована, а оскільки блоки легкої покрівлі переривають південні щити, то їх буде демонтовано в першу чергу разом з елементами шляхів доступу, що були прокладені в напрямку з півночі на південь. Отже, на певному етапі робіт доступ персоналу на південні щити навіть для епізодичних робіт буде повністю відсутній (рис. 6).

Слід зазначити, що використання виходу на покрівлю машинного залу з боку осі А, 47 і прокладені там ходові трапи все ж дадуть можливість доступу до балки «Восьминіг», західної і східної опор балки «Мамонт» і до місця робіт по самій балці «Мамонт». Використання сходової клітки, що розташована на металевих конструкціях підсилення, або підйомника по осі С, 55 дає змогу доступу до західних опор блоків балок Б1 і Б2 по осях Ж і П та до блоку «Мишкін дім». Отже, до частини конструкцій об'єкта «Укриття», що будуть підлягати демонтажу, шляхи доступу збережуться.

Ще один важливий момент полягає в тому, що в процесі експлуатації об'єкта «Укриття», особливо в період до насування арки НБК, повсякчасно здійснювалась програма герметизації, тобто робіт для максимального унеможливлення просочування атмосферних осадків усередину об'єкта. Герметизація виконувалась за рахунок закріплення захисних нащільників, що наразі блокують усі суміжні елементи. Наявність блокування за рахунок нащільників добре видно на прикладі південних щитів-«ключок» (рис. 7 і 8).

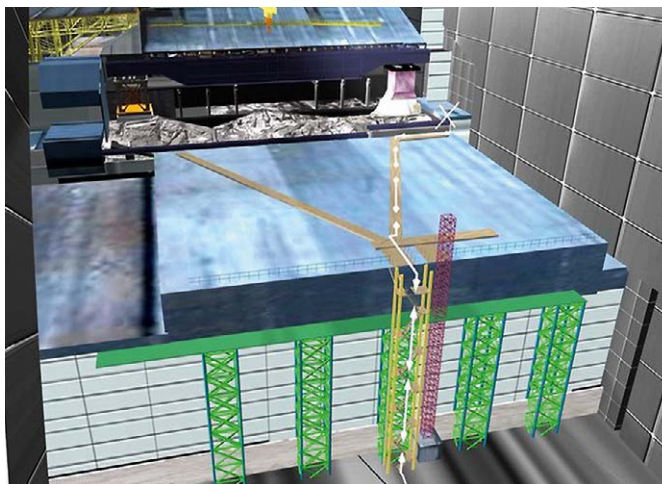


Рис. 6. Загальний вигляд засобів шляхів доступу в ситуації, коли доступ персоналу на південні щити буде повністю відсутній

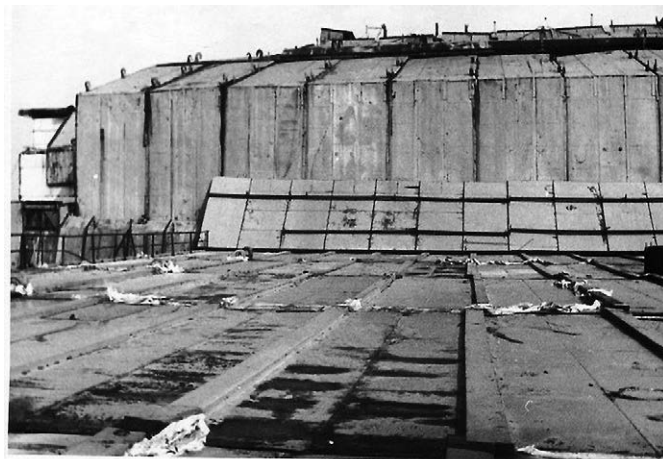


Рис. 7. Стан південних щитів-«ключок» після монтажу у процесі ліквідації аварії



Рис. 8. Стан південних щитів-«ключок» після реалізації програми герметизації

Таким чином, усі елементи оболонки об'єкта «Укриття» з'єднані між собою, тому перед їхнім демонтажем мають бути виконані технологічні операції, пов'язані з розрізанням нащільників, та від'єднання кожного з блоків від інших, що є суміжними з усіх чотирьох боків. Роботи з розблокування мають виконуватись за допомогою дистанційно керованої техніки і СОК, але необхідність застосування персоналу, як мінімум для контролю розблокування, повністю не відкидається. Тому в разі необхідності виконання будь-яких технологічних операцій персоналом до місця проведення робіт має бути організовано надійний і безпечний шлях доступу.

Слід взяти до уваги, що після демонтажу окремих конструкцій утворюються значні перепади по висоті (від поверхні щитів покрівлі до існуючих завалів), що можуть сягати від 4 до 12 і більше метрів

і становити значну небезпеку навіть для персоналу, який працює епізодично.

Та головне те, що під час демонтажу кожної конструкції покрівлі об'єкта «Укриття» все більше будуть відкриватися завали зруйнованого 4-го енергоблоку разом із джерелами іонізуючого випромінювання, що містяться там. Демонтаж конструкцій покрівлі, тобто розбирання захисного бар'єра, яким є оболонка об'єкта «Укриття», призведе, як мінімум, до погіршення радіаційних умов на шляхах доступу персоналу.

Таким чином, підхід до створення нових і використання існуючих шляхів доступу в зони проведення робіт, пов'язаних із демонтажем конструкцій об'єкта «Укриття», має бути оптимізований і доопрацьований. Ситуацію із шляхами доступу у процесі здійснення діяльності з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» зведено в таблицю.

Наявність шляхів доступу до нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» у процесі їхнього демонтажу

Зона розташування конструкції	Конструкції, що підлягають демонтажу	Наявний шлях доступу	Шлях доступу на час демонтажу
Південна частина	З'єднувальна ферма	ПД-1	ПД-1
	Похилі блоки-нащільники	ПД-1	ПД-1
	Південні щити-«ключки»	ПД-1	ПД-1
Центральна частина	Легка покрівля	ПН-1	ПН-1
Південна частина	Південні щити	ПД-1	відсутній
	Блок «Кішкин дім»	ПД-1	відсутній
	Балка «Мамонт»	ПД-2	ПД-2
	Тимчасова опора балки «Мамонт»	ПД-2	ПД-2
	Балка «Восьминіг»	ПД-2	ПД-2
	Західна опора балки «Мамонт»	ПД-2	ПД-2
	Східна опора балки «Мамонт»	ПД-2	ПД-2
	Завали над ДЕ	ПД-2	ПД-2
	Плити перекриття ДЕ	ПД-2	ПД-2
Північна частина	Північні щити-«ключки»	ПН-1	ПН-1
	Блок «Мишкин дім»	ПН-1	ПН-1
Центральна частина	Накат із труб	ПН-1	відсутній
	Просторовий блок «Літак»	відсутній	відсутній
	Блок балок Б1 і Б2 по осі Ж	ПН-1	відсутній
	Блок балок Б1 і Б2 по осі П	ПН-1	відсутній
	Блок «Собачий дім»	ПН-1	відсутній
	Інші опорні балки об'єкта «Укриття»	відсутній	відсутній

Технічні пропозиції щодо використання захисної кабіни

Як уже зазначалось, нестабільні конструкції об'єкта «Укриття» розташовані з південного, північного боків і в центральній частині об'єкта «Укриття», тому радіаційна обстановка в цих зонах буде відрізнятися. Крім того, показники ПД на робочих місцях будуть мати різні значення практично в кожній зоні розташування конструкції. Оскільки в процесі демонтажу оболонки об'єкта «Укриття» наявні шляхи доступу будуть розірвані, то виникає необхідність використання спеціальних захисних засобів, що дасть змогу, по-перше, здійснювати відносно швидке переміщення персоналу в ЗВР, а по-друге — захистити персонал від радіаційного впливу на відповідному шляху доступу. Крім того, у ЗВР має бути передбачений додатковий екранований захист для короткострокового перебування персоналу під час вимушених перерв у роботі. Оскільки в роботі [6] для безпечного доступу персоналу в ЗВР було обґрунтовано застосування екранованої захисної кабіни, що могла б транспортуватися за допомогою одного з кранів НБК, то виникла ідея впровадження такої кабіни й для всіх інших робіт, пов'язаних із демонтажем нестабільних конструкцій огорожувального контура в обсягах ПК-2 НБК.

Така захисна кабіна має бути універсальною і дозволяти її застосування для будь-якої зони об'єкта «Укриття» за рахунок можливості регулювання орієнтації кабіни відносно до наявних джерел випромінювання. Крім цього, повинна існувати можливість регулювання товщини екрануючого шару кабіни з усіх шести сторін.

Під час проектування кабіни для доступу персоналу в ЗВР необхідно враховувати:

- значення ПД на шляхах доступу персоналу в ЗВР;
- можливості утримання заданої величини ПД гамма-випромінювання в кабіні залежно від радіаційних умов на шляху доступу;

- можливості переміщення екранованої кабіни з персоналом за допомогою спеціального безпечного вантажного візка крана НБК;

- можливості вирішення інших проблем, пов'язаних із забезпеченням радіаційної безпеки персоналу (наприклад, захист під час вимушених перерв).

Кабіна має призначатись для переміщення, як мінімум, трьох осіб: дві особи — будівельно-монтажний персонал, який буде виконувати допоміжні технологічні операції, і одна особа — дозиметрист. Постійна

необхідність дозиметричного контролю обумовлена наявністю в зонах демонтажних робіт високих значень ПД гамма-випромінювання (понад 10 мЗв/год).

Екранована кабіна повинна бути прямокутна в плані. Каркас кабіни необхідно запроектувати з прокатних профілів. З'єднання елементів між собою має бути жорстке, виконане на зварюванні. Обшивка кабіни буде з листової сталі, яка має кріпитися до несучих елементів каркаса на зварюванні. Підлогу всередині кабіни необхідно виконати з матеріалу, що не спричиняє ковзання (наприклад, рифлена сталь).

Як матеріал для захисту персоналу від іонізуючого випромінювання під час перебування в кабіні необхідно застосувати щити зі свинцевих листів, що будуть зніматися або навішуватися на зовнішні сторони кабіни, а також підлогу і покрівлю. Для навішування захисних щитів у конструкції кабіни необхідно передбачити болти, що жорстко приварюються до каркаса. Залежно від місця розташування ЗВР в об'єкті «Укриття», а також потужності гамма-випромінювання з різних напрямків розраховується загальна товщина захисного шару, що може складатися з одного або декількох свинцевих щитів.

Для стропування кабіни на гак вантажного візка крана на даху кабіни повинні бути передбачені монтажні петлі.

Підключення електроінструментів і світильників внутрішнього і зовнішнього освітлення екранованої кабіни має здійснюватися через розподільчий щит, який підключається до силової установки вантажного візка крана.

Доступ на дах кабіни для стропування й підключення електропостачання передбачається за рахунок вертикальної драбини, що закріплюється до каркаса зварюванням.

За різних обставин прийнято, що екранована кабіна не буде встановлюватись на будь-яку поверхню в ЗВР. Вона має утримуватися краном у підвішеному стані якнайближче до місця проведення робіт. Для забезпечення виходу персоналу на поверхню робочої зони, за підвішеного стану кабіни, повинна передбачатися відкидна драбина на чотири сходинки.

Важливо зазначити, що вихід із кабіни в робочу зону повинен бути передбачений без дверей, оскільки з урахуванням захисного шару зі свинцю вони будуть надто важкі і громіздкі. Кабіна має облаштовуватися (і це головне) екранованим тамбуром, тому вихід буде організований за принципом лабіринту, а замість дверей буде лише легка хвіртка у вигляді решітки з фіксуючим засувом (рис. 9 і 10). Усередині

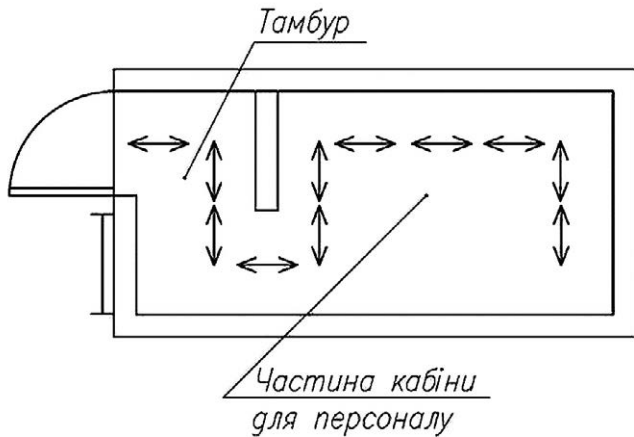


Рис. 9. Схема компоновки захисної кабіни. План

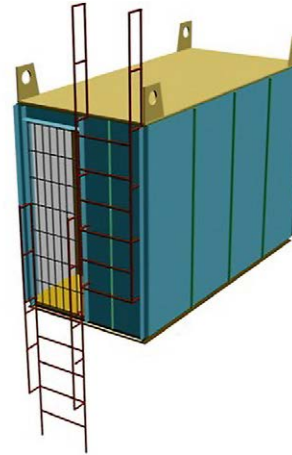


Рис. 10. Комп'ютерна модель захисної кабіни

кабіни мають бути передбачені сидіння для декількох осіб та засоби утримування руками для них.

Система енергопостачання СОК НБК досить надійна, що закладено конструктивно. Навіть у разі аварійного нештатного відключення стаціонарного енергопостачання НБК мають бути задіяні наявні дизель-генераторні енергетичні установки. У разі нештатної ситуації (відмова СОК) у комплектацію обладнання захисної кабіни має входити мотузьяна драбина разом із системою карабінів на ній і підлозі кабіни, у районі вихідної хвіртки. Евакуація персоналу з кабіни має відбуватися через вихідну хвіртку по закріпленій мотузьяній драбині.

Транспортування захисної кабіни в ЗВР має відбуватися по маршрутах, які виключають її переміщення над центральним залом об'єкта «Укриття» і над ділянками, де щити вже демонтовано і явно видно зруйновані конструкції. Таке обмеження на-

кладене з метою виключення нештатної евакуації персоналу з кабіни на завали об'єкта «Укриття» (за допомогою мотузьяної драбини) у разі відмови механізмів крана НБК та мінімізації радіаційних ризиків під час евакуації.

Пропонується місце посадки/висадки персоналу в кабіну розмістити в районі осей Г-Д, 63 на майданчику тимчасового складування НБК. Транспортування екранованої кабіни має здійснюватися тільки за допомогою західного моста крана НБК. Така умова повинна виконуватись з тих міркувань, що технологічні операції з демонтажу будуть виконуватись саме східним краном НБК, а західний кран (з міркувань безпеки) зможе курсувати із захисною кабіною між ЗВР і місцем посадки/висадки персоналу без будь-яких перешкод.

Шлях доступу до місця розташування з'єднувальної ферми (рис. 11) із застосуванням захисної кабіни буде виглядати таким чином:

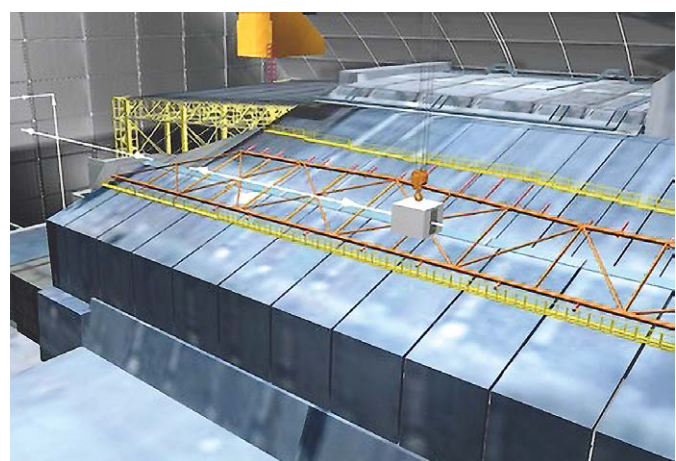
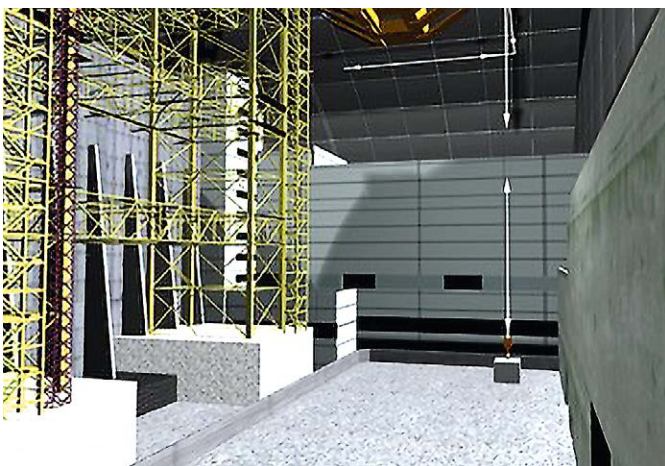


Рис. 11. Схема руху екранованої кабіни в район ЗВР із демонтажу ферми за допомогою крана НБК

посадка персоналу в кабину в районі осей Д-Г, 63;
підйом захисної kabini краном НБК вище найближчих перешкод, зміщення її в бік осі Б та підйом на позначку вище покрівлі машинного залу;

переміщення kabini в східному напрямку паралельно осі Б до осі 40;

зупинка та зависання над ходовими трапами вздовж південного поясу ферми;

вихід персоналу на ходові трапи для здійснення технологічних операцій.

Доведено, що складова радіаційного опромінення персоналу є важливим показником, який напряду залежить від часу, затраченого на подолання шляху від вихідної точки до ЗВР і назад. Важливо зазначити, що пройти весь шлях від нижніх позначок (рівень підлоги) НБК до місця розташування кожної з конструкцій, що підлягає демонтажу, навіть по облад-

наному, прокладеному шляху доступу, є завданням досить складним з точки зору втомлюваності робітників. Отже, є сенс використовувати захисну кабину для транспортування персоналу в ЗВР, навіть якщо є можливість добратися туди по ділянках прокладених шляхів доступу, що залишилися після часткового демонтажу конструкцій. Такий спосіб потрапляння персоналу в ЗВР буде і швидшим, і безпечнішим (рис. 12 і 13). У такому випадку шляхи доступу, що будуть залишатися незважаючи на проведений демонтаж конструкцій, будуть аварійними і слугуватимуть для евакуації в разі нештатних ситуацій.

Як уже зазначалось, захисна kabina має бути універсальною, щоб дозволяти її застосування для будь-якої зони об'єкта «Укриття» за рахунок можливості регулювання товщини екрануючого шару всіх восьми сторін. У такому випадку для проведення розрахун-

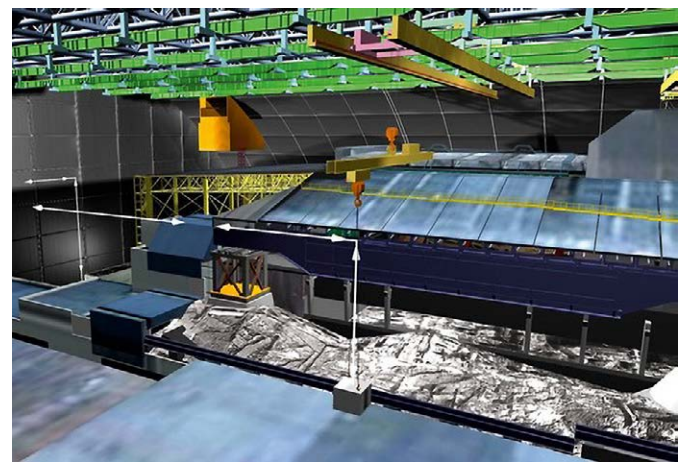
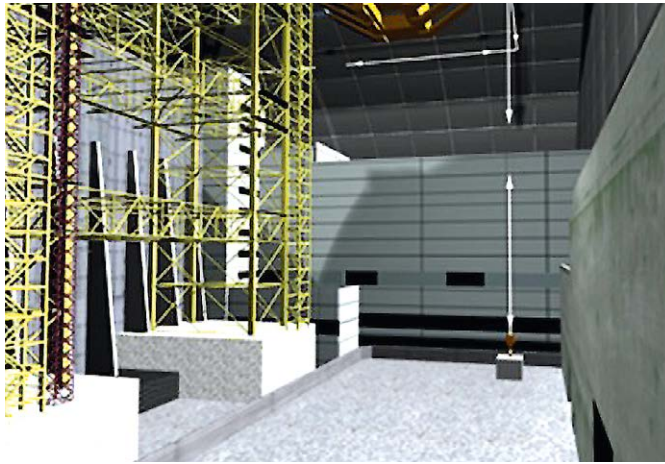


Рис. 12. Застосування захисної kabini для переміщення персоналу в район ЗВР по балці «Восьминіг», а також західній і східній опорах балки «Мамонт», по самій балці «Мамонт» і завалах на ДЕ

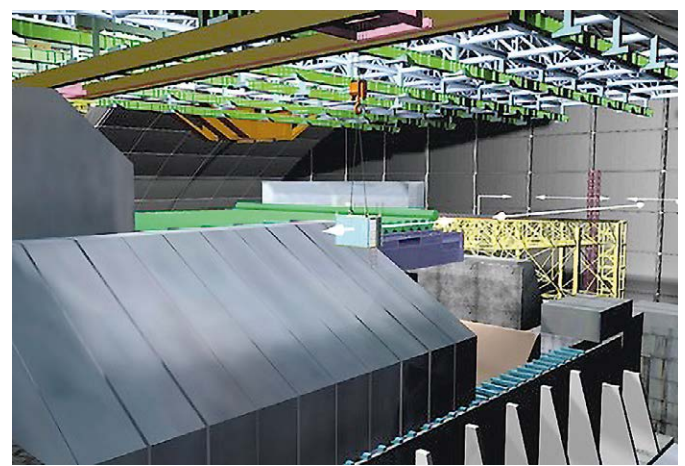
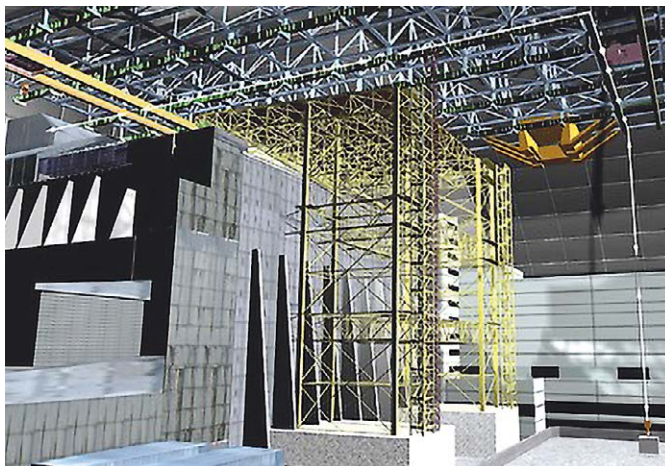


Рис. 13. Застосування захисної kabini для переміщення персоналу в район ЗВР по блоках легкої покрівлі, північних щитах-«ключках», блоку «Мишкін дім», накату з труб і блоків балок Б1 і Б2 по осях Ж і П

ків товщини екрануючого шару необхідна відповідна база даних щодо характеристик матеріалів, а також показники величин ПД гамма-випромінювання практично в місці розташування кожного щита або об'ємного блоку, по всій поверхні покриття об'єкта «Укриття», а також у місцях розташування конструкцій під покриттям. Таку роботу може значно спростити застосування програмного засобу HVRC VRdose Planner Pro v. 2.2.2, розробленого в Інституті енергетичних технологій Норвегії. При введенні параметрів щодо радіаційної обстановки та кутового розподілу гамма-випромінювання на базових відтинках шляхів доступу за допомогою програмного засобу HVRC VRdose Planner Pro v. 2.2.2 може бути проведено візуальне відображення радіаційного поля під час руху персоналу. Таким самим методом програма може перерахувати показники радіаційного поля під час переміщення персоналу в захисній кабіні, а також надати необхідні характеристики екранування з усіх її сторін. Приклад моделювання товщини екрануючого шару захисної kabini в зоні розташування балки «Восьминіг» за допомогою засобів програми наведено на рис. 14.

Оцінка відвернутої дози

Ефективність застосування заходів з радіаційної безпеки характеризується величиною відвернутої

дозы, тобто величиною, на яку зменшуються дозовитрати персоналу за рахунок застосування конкретного протирадіаційного заходу.

Для оцінки відвернутої дози під час застосування захисної kabini для транспортування персоналу в ЗВР необхідні такі вихідні дані:

кількість людино-виходів безпосередньо в ЗВР (у нашому випадку місце розташування з'єднувальної ферми);

індивідуальна доза робітника, який прямує в ЗВР по наявному маршруту доступу;

індивідуальна доза робітника, який переміщується в ЗВР за допомогою захисної kabini.

Для проведення оціночних розрахунків використано проектні рішення [6] з демонтажу з'єднувальної ферми. Згідно з роботою [6] кількість людино-виходів в ЗВР з демонтажу ферми становить 204 людино-вихід.

Доступ робітника в ЗВР згідно з роботою [7] здійснюється за такою схемою: прохід через коридор 101 ШДПП до основного об'єму НБК, потім до місця металевих сходів по осі А, 45 ⇒ підйом у кабіні вантажопасажирського підйомника ⇒ рух по високій покрівлі машинного залу від осі А, 45 до осі Б, 41 ⇒ підйом по металевій драбині біля осі 41 на південні щити-«ключки», позн. 57,565 ⇒ перехід через трапи з нижнього поясу ферми на верхню частину поясу ферми вздовж осі 42.

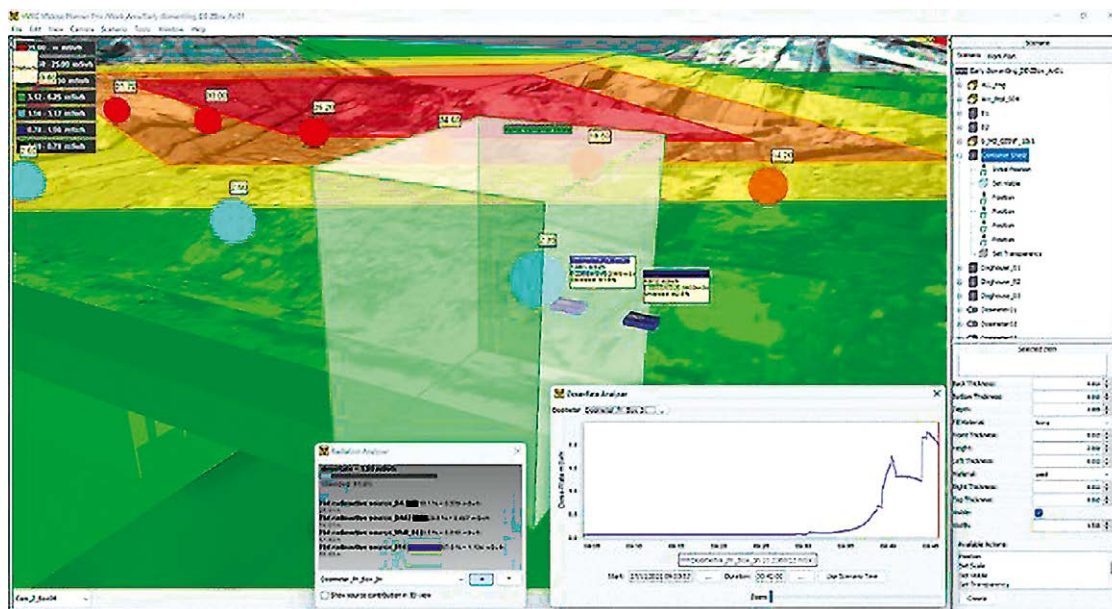


Рис. 14. Комп'ютерне моделювання параметрів екранування стінок захисної kabini в районі балки «Восьминіг». Товщина стінок 10 мм, матеріал свинець. ПД всередині kabini 1,991, зовні 4,012 мЗв/год, ПД на маршруті всередині kabini 0,2368, зовні 0,5603 мЗв

Згідно з роботою [7] індивідуальна доза опромінення робітника, який прямує по маршруту до ЗВР «Південні щити», становить $E_0 = 0,07$ мЗв. З урахуванням зворотного маршруту ця величина дорівнює 0,14 мЗв.

Для розрахунку індивідуальної дози під час транспортування персоналу захисною кабіною в ЗВР по з'єднувальній фермі прийняті вихідні дані:

проектні рішення [6] з демонтажу конструкції з'єднувальної ферми;

захисні характеристики екранованої кабіни;

«місце стоянки» захисної кабіни — ось Е, 62, позн. 7,500;

«місце доставки» захисної кабіни — ось В, 44, позн. 58,000;

шлях транспортування захисної кабіни залежно від величини ПД умовно розділено на п'ять ділянок, а саме: «місце стоянки» — ось Е, 62, позн. 7,500 → позн. 24,000 → позн. 58,000 → ось В, 62, позн. 58,000 → ось В, 48, позн. 58,000 → ось В, 44, позн. 58,000 — «місце доставки».

Згідно з роботою [6] величина ПД всередині захисної кабіни в наявних радіаційних умовах буде знаходитися в діапазоні від 10 до 25 мкЗв/год. Враховуючи дані радіаційних умов та довжину окремих ділянок маршруту, середня величина ПД становитиме близько 18 мкЗв/год.

Швидкість підйому вантажу вантажним візком — 10 м/хв [8], або 600 м/год.

Швидкість руху мостового крана — 15 м/хв [8], або 900 м/год.

За цих умов індивідуальна доза на маршруті ($E_{зк}$) буде розраховуватися як

$$E_{зк} = T_{зк} \cdot P_{зк} \text{ (мкЗв)},$$

де $T_{зк}$ — час руху захисної кабіни до місця призначення: $T_{зк} = [(S_{в1} + S_{в2})/V_{в} + (S_{мк}/V_{мк})]$, де $S_{в1}$ і $S_{в2}$ — відстань переміщення вантажного візка з позн. 7,500 до позн. 58,000 та з осі Е до осі В (18 м), $S_{мк}$ — відстань переміщення мостового крана з осі В, 62 до осі В, 44 (108 м), $V_{в}$ і $V_{мк}$ — швидкість переміщення вантажного візка та мостового крана; $P_{зк}$ — середня величина ПД всередині захисної кабіни під час руху по маршруту.

$$E_{зк} = [(50,5 + 18)/600 + (108/900)] \cdot 18 = 4,12 \text{ мкЗв, або } 0,0041 \text{ мЗв.}$$

З урахуванням зворотного маршруту величина $E_{зк}$ дорівнює 0,0082 мЗв.

Порівняння індивідуальної дози на маршруті своїм ходом ($E_0 - 0,14$ мЗв) з величиною індивідуальної

дозы в захисній кабіні ($E_{зк}$) дає співвідношення приблизно 16,5. Тобто індивідуальна доза на маршруті доступу в ЗВР у захисній кабіні у 16,5 раза менша від індивідуальної дози на маршруті своїм ходом.

Відвернута колективна доза буде розраховуватися як

$$S_{відвер} = (N_{заг} \cdot E_0) - (N_{заг} \cdot E_{зк}) = (204 \cdot 0,14) - (204 \cdot 0,0082) = 26,9 \text{ мЗв.}$$

Отже, за рахунок застосування властивостей захисної кабіни під час транспортування персоналу в ЗВР з демонтажу з'єднувальної ферми відвернута колективна доза приблизно 27 мЗв.

Очевидно, що застосування екранованої кабіни для доступу персоналу в ЗВР з демонтажу дозволить суттєво зменшити колективну дозу на маршруті. У результаті сумарна відвернута колективна доза буде значно більша з огляду на велику трудомісткість демонтажу інших нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» (наприклад, видалення завалів на перекритті ДЕ). Ця величина може бути більше 1 Зв.

Таким чином, доведено доцільність застосування екранованої захисної кабіни для транспортування персоналу на робочі місця під час здійснення діяльності з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття».

Висновки

Існуючі шляхи доступу дають змогу дістатися до всіх нестабільних конструкцій, але після послідовного демонтажу елементів захисної оболонки об'єкта «Укриття» ситуація з доступом зміниться.

Оскільки частина елементів шляхів доступу (трапи, переходи, містки) закріплена на щитах покрівлі об'єкта «Укриття», то в процесі їхнього демонтажу доступ до деяких конструкцій стане неможливий. Частково доступ збережеться тільки до конструкцій, що не належать до покрівлі об'єкта «Укриття».

Після демонтажу щитів і блоків покрівлі об'єкта «Укриття» утворюються значні перепади по висоті (від поверхні щитів (блоків) покрівлі до існуючих завалів), що можуть бути значною небезпекою для персоналу.

Демонтаж конструкцій покрівлі, тобто розбирання захисного бар'єра об'єкта «Укриття», призведе до перерозподілу напрямків впливу джерел іонізуючого випромінювання, що знаходяться в завалах об'єкта «Укриття», а отже радіаційна складова для персоналу, який буде використовувати наявні шляхи доступу, погіршиться.

Питання захисту персоналу від впливу радіаційного випромінювання на шляхах доступу може бути вирішено за рахунок застосування екранованої захисної kabіни, що буде транспортуватися одним із кранів НБК від місця стоянки на майданчику тимчасового складування до ЗВР з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття».

Захисна kabіна має бути універсальною, що дозволить її застосування для будь-якої зони об'єкта «Укриття» за рахунок можливості регулювання орієнтації kabіни відносно до наявних джерел випромінювання, а також можливості регулювання товщини екрануючого шару з усіх шести сторін. Можливості для транспортування kabіни краном НБК, зміни орієнтування за рахунок механізму розвороту та регулювання товщини екрануючого шару мають бути закладені в конструкції захисної kabіни.

Мінімізація величини індивідуальної дози на маршрутах доступу до робочого місця і назад є дієвим заходом протирадіаційного захисту. Розрахунок показав, що під час застосування захисної kabіни для транспортування персоналу в ЗВР з демонтажу з'єднувальної ферми величина відвернутої дози становить близько 27 мЗв. Виходячи з того, що обсяг робіт з демонтажу ферми в частині трудовитрат є суттєво меншим порівняно з іншими роботами з демонтажу нестабільних конструкцій (наприклад, видалення завалів над ДЕ), то можна прогнозувати, що загальна відвернута колективна доза під час реалізації діяльності з демонтажу всіх нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» за рахунок застосування захисної kabіни буде становити значну величину.

У разі здійснення проектування демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» в обсягах ПК-2 НБК рекомендується використати напрацьовані рішення по захисній kabіні, а також врахувати запропоновані технічні рішення щодо екранованої kabіни, наведені в даній роботі.

Список використаної літератури

1. Об'єкт «Укриття» в умовах нового безпечного конфайнмента / В. О. Краснов, А. В. Носовський, С. А. Паскевич, В. М. Рудько; за заг. ред. А. В. Носовського. — Чорнобиль : ІПБ АЕС НАН України, 2021. — 344 с.
2. Peculiarities of the Shelter object individual unstable structures dismantling / O. V. Balan, S. H. Brylka, S. S. Pidbereznyi, V. M. Rudko // Nuclear Power and Environment. — 2023. — № 2 (27). — P. 56–66.

3. Новий безпечний конфайнмент (НБК). Пусковий комплекс 2 (ПК-2). Демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» ДСП ЧАЕС в частині «раннього» демонтажу. Етап 2. Радіаційне обстеження на шляхах доступу та у зонах виконання робіт.
4. Пусковий комплекс 2 (ПК-2). Демонтаж нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» ДСП «ЧАЕС» в частині «раннього» демонтажу. Етап 3. Обстеження майданчиків тимчасового зберігання демонтованих конструкцій і маршрутів їх транспортування з зон виконання робіт.
5. Павловський Л. І. Визначення радіаційних умов у зонах робіт з демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» / Л. І. Павловський, Д. О. Хоменко, В. В. Єгоров // Ядерна енергетика та довкілля. — 2022. — № 3 (25). — С. 16–23.
6. Проектування, виготовлення, будівництво і введення у експлуатацію НБК до другого пускового комплексу НБК (ПК-2). Інфраструктура для виконання демонтажу нестабільних конструкцій ОУ. Робочий проект «Реконструкція об'єкта «Укриття» ДСП ЧАЕС в частині демонтажу металеві ферми підсилення південної покрівлі».
7. Акт РО-ШД-03 від 21.10.2021 року про виконання передпроектних радіаційних досліджень на маршруті доступу до конструкцій НБК-ОУ, що підлягають «ранньому» демонтажу у ЗВР з південної сторони ОУ.
8. Технологические решения. Система внутреннего транспорта. SIP-N-KP-22-E06__TEN-061-01/99-925.100.011.OT06.01.

**O. V. Balan, L. I. Pavlovsky, S. S. Pidbereznyi,
V. M. Rudko**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, Kirova st., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine*

Regarding Personnel Access to the Location Area of the Shelter Object Unstable Structures to be Dismantled

The need to dismantle the unstable structures of the Shelter object is due to several reasons, including the rather high probability of the collapse of these structures even in the conditions of operation inside the New Safe Confinement (NSC). Thus, all metal structures, which, respectively, make up the Shelter object, will be subject to dismantling.

It is claimed that the activity of dismantling the unstable structures of the Shelter object is rather difficult engineering task. First of all, this circumstance is caused by the need to perform work in very difficult radiation conditions, where the values of the dose rate (DR) in many zones reach more than 10 mSv/h. The highest values of DR were recorded in the work area zone (WAZ) on the run-up from the pipes, in the area of the “Dog’s House” block (over 48 mSv/h) and on the rubble above the deaerator stack (DS) overlap (over 35 mSv/h). It is emphasized that the involvement of personnel in physical work in such conditions should be excluded or minimized.

The paper presents the main results of the study of personnel access routes to the work area (WA) for the dismantling of unstable structures of the Shelter object and radiation conditions in the areas where they are located. Possible individual doses of personnel on the access routes to the WAZ and back are given.

With the help of existing data on the radiation situation and the angular distribution of gamma radiation along the routes, by means of the program ChNPP VR-dose Planner Pro v. 2.2.2 modeling of the shielding parameters of the protective cabin in the area of the “Octopus” beam was carried out.

On the example of dismantling works of the connecting truss structure of the southern part of the Shelter object roof, the calculations of the time spent on the access of personnel to the emergency room and back by their own pace and with the use of a protective cabin for personnel movement, which in turn is transported by a crane of the NSC, were made. The amount of averted dose to personnel due to the use of a protective cabin was estimated.

The work emphasizes that the protection of personnel from the effects of radiation on the access routes can be solved by using a shielded protective cabin, which will be transported by one of the NSC cranes from the parking place at the temporary storage site to the WAZ for dismantling the unstable structures of the Shelter object.

The protective cabin should be universal and allow its use for any Shelter object zone due to the ability to adjust the orientation of the cabin in relation to the existing radiation sources, as well as the ability to adjust the thickness of the shielding layer on all six sides. Possibilities for transporting the cabin by the NSC crane, changing the orientation due to the turning mechanism and adjust-

ing the thickness of the shielding layer should be included in the design of the protective cabin.

Keywords: Shelter object, LC-1 (LC-2) launch complex, access routes, work area, unstable structures, protective cabin, deflected dose.

References

1. Krasnov V. O., Nosovskyi A. V., Paskevych S. A., Rudko V. M.; A. V. Nosovskyi (ed.) (2021). *Obiekt “Ukryttia” v umovakh novoho bezpechnoho konfainmenta* [The Shelter Object in Conditions of the New Safe Confinement]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 344 p. (in Ukr.)
2. Balan O. V., Brylka S. H., Pidberezniy S. S., Rudko V. M. (2023). Peculiarities of the Shelter object individual unstable structures dismantling. *Nuclear Power and Environment*, vol. 27, no. 2, pp. 56–66.
3. New Safe Confinement (NSC). Launch complex 2 (LC-2). Dismantling of unstable structures of the Shelter object of the ChNPP as part of the “early” dismantling. Stage 2. Radiation survey on the access roads and in the work areas. (in Ukr.)
4. Launch complex 2 (LC-2). Dismantling of unstable structures of the Shelter object of the ChNPP as part of the “early” dismantling. Stage 3. Inspection of sites for temporary storage of dismantled structures and routes of their transportation from work areas. (in Ukr.)
5. Pavlovskyi L. I., Khomenko D. O., Yehorov V. V. [Determination of the radiation situation in the areas of unstable structures dismantling of the Shelter object]. *Nuclear Power and Environment*, vol. 25, no. 3, pp. 16–23. (in Ukr.)
6. Design, manufacture, construction and commissioning of the NSC to the second launch complex of the NSC (LC-2). Infrastructure for performing dismantling of unstable structures of the Shelter object. Working project “Reconstruction of the Shelter object of the ChNPP chip-board in part of dismantling the metal truss of the southern roof reinforcement”. (in Ukr.)
7. ПО-IIIД-03. Act on the performance of pre-project radiation studies on the access route to the NSC-SO structures, which are subject to “early” dismantling in the WAZ from the south side of the Shelter object, dated 21.10.2021. (in Ukr.)
8. Technological solutions. Internal transport system. SIP-N-KP-22-E06__TEN-061-01/99-925.100.011.OT06.01. (in Rus.)

Надійшла 22.03.2024

Received 22.03.2024

О. В. Михайлов¹, М. В. Савельєв^{1,2}, М. А. Пантін²

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

² Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, просп. Академіка Глушкова, 42, Київ, 03680, Україна

Результати контролю потужності еквівалентної дози γ-випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» ЧАЕС

Ключові слова:

Чорнобильська АЕС,
новий безпечний конфайнмент,
об'єкт «Укриття»,
стаціонарна система
радіаційного контролю,
потужність еквівалентної дози
γ-випромінювання,
динаміка

Проведено аналіз даних щодо потужності еквівалентної дози (ПЕД) γ-випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття», отриманих упродовж 2018–2023 рр. за допомогою стаціонарної системи радіаційного контролю (ССРК) інтегрованої автоматизованої системи контролю (ІАСК). Зроблено висновки щодо загальної тенденції в динаміці ПЕД γ-випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» після введення в експлуатацію комплексу нового безпечного конфайнмента та об'єкта «Укриття» (комплекс НБК-ОУ). Проведено аналіз відповідності підконтрольних ССРК приміщень об'єкта «Укриття» експлуатаційним межах (ЕМ) безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ за значенням ПЕД. Відповідно до регламентованих значень ЕМ для ПЕД γ-випромінювання підконтрольні приміщення було розподілено на чотири групи. Для кожної групи приміщень об'єкта «Укриття» проведено порівняння середньорічної швидкості зменшення ПЕД γ-випромінювання зі швидкістю розпаду радіонукліда ¹³⁷Cs.

Вступ

У рамках здійснення Плану заходів на об'єкті «Укриття» і побудови комплексу «Новий безпечний конфайнмент — об'єкт «Укриття»» (комплекс НБК-ОУ) була створена стаціонарна система радіаційного контролю (ССРК), що є частиною інтегрованої автоматизованої системи контролю (ІАСК) [1]. Основне призначення ССРК — безперервний автоматизований контроль радіаційного стану в приміщеннях об'єкта «Укриття» та на території проммайданчика комплексу НБК-ОУ [1, 2]. ССРК забезпечує контроль таких параметрів радіаційного стану: ПЕД γ-випромінювання, об'ємна активність (ОА) α-, β-аерозолів у повітрі приміщень об'єкта «Укриття»; ПЕД γ-випромінювання, ОА α-, β-аерозолів у повітрі на території проммайданчика комплексу НБК-ОУ. Система містить такі датчики контролю: 39 датчиків вимірю-

вання ПЕД γ-випромінювання (35 — у приміщеннях об'єкта «Укриття», 4 — на проммайданчику комплексу НБК-ОУ); 14 датчиків вимірювання ОА α-, β-аерозолів (10 — у приміщеннях об'єкта «Укриття», 4 — на проммайданчику комплексу НБК-ОУ); 2 датчики вимірювання ОА α-, β-аерозолів у повітрі на лінії «байпаса» системи витяжної вентиляції та газоочищення об'єкта «Укриття»; 2 датчики контролю витрати повітря через «байпас» системи витяжної вентиляції та газоочищення об'єкта «Укриття» в новій вентиляційній трубі з датчиком контролю температури й вологості. Детальний опис складу ССРК, схеми побудови її архітектури та характеристики задіяного вимірювального обладнання можна знайти в [3, 4].

Основними завданнями ССРК є: контроль радіаційної ситуації під час експлуатації об'єкта «Укриття»; зниження ризику переопромінення персоналу; підвищення аварійної готовності. Для виконання цих

© О. В. Михайлов, М. В. Савельєв, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

завдань ССРК має такі основні функції: контроль викиду радіоактивності за межі об'єкта «Укриття»; контроль радіаційних параметрів у приміщеннях об'єкта «Укриття» та навколишньої території, де ведуться роботи й відбувається пересування персоналу; контроль радіаційних параметрів у межах зон радіаційного контролю (санітарні шлюзи, пропускники, бар'єри тощо); виявлення перевищення контрольних та допустимих рівнів параметрів, що характеризують радіаційний стан; видача аварійних сигналів.

ССРК належить до систем, важливих для безпеки об'єкта «Укриття», і спроектована з метою виконання функції радіаційного захисту персоналу та населення, контролю виходу радіоактивних речовин та іонізуючого випромінювання за встановлені межі. З метою неперевищення допустимих рівнів ПЕД γ -випромінювання та ОА α -, β -аерозолів у повітрі встановлено експлуатаційні межі (ЕМ) та межі безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ, що визначають граничні значення параметрів контролю для трьох груп приміщень: постійного перебування персоналу; періодичного перебування персоналу (напівобслуговані); обмеженого перебування персоналу [2].

Упродовж останніх років було опубліковано декілька робіт, присвячених дослідженню особливостей багаторічної динаміки потужності експозиційної дози γ -випромінювання та щільності потоку нейтронів у бетоні навколо зони локалізації ядерно-небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів (ЯНС ПВМ) у підреакторному приміщенні 305/2 після введення комплексу НБК-ОУ в експлуатацію, наприклад у роботах [5–7]. Регресійний аналіз даних, отриманих системою контролю ядерної безпеки (СКЯБ) ІАСК, дозволив кількісно описати наявні тренди середньодобових значень параметрів контролю на різному віддаленні від границь ЯНС ПВМ. Щодо результатів вимірювань потужності еквівалентної дози (ПЕД) γ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття», що знаходяться в зонах виконання робіт або на шляху переміщень персоналу державного спеціалізованого підприємства «Чорнобильська АЕС» (ДСП «ЧАЕС») та інших установ, детальний аналіз накопиченого багаторічного масиву даних ССРК досі не виконувався. Тому проведення аналізу накопиченої інформації щодо рівнів ПЕД γ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» є актуальним завданням не тільки з наукової точки зору, але й у площині підготовки необхідних даних для планування робіт та оцінки часу, коли в умовах високих дозових навантажень такі ро-

боти можуть бути виконані персоналом у місцях їхнього проведення.

Метою роботи є узагальнення даних, отриманих за допомогою ССРК ІАСК щодо визначення ПЕД γ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» після введення НБК в експлуатацію.

Загальна характеристика обладнання ССРК для вимірювання ПЕД γ -випромінювання та застосованих додаткових програмних засобів обробки даних вимірювань

Для визначення рівнів ПЕД γ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» у складі ССРК передбачено блоки детектування (БД) типу БДБГ-09 (рис. 1), призначені для реєстрації енергій γ -квантів від 0,05 до 3 MeV і ПЕД (потужності амбієнтного еквівалента дози) γ -випромінювання в діапазоні вимірювання від 0,04 до 10^7 мкЗв $\cdot$ год⁻¹ [4]. До складу БД входять мікроконтролер, високочутливий детектор, низькочутливий детектор, формувач напруг живлення і вузол інтерфейсу RS-485. Робота БД ґрунтується на принципі перетворення γ -випромінювання в послідовність імпульсів напруги на виході детекторів. Як детектори в БД застосовані високочутливий і низькочутливий лічильники Гейгера — Мюллера.

Станом на 2023 р. ССРК в автоматичному режимі отримує дані щодо ПЕД γ -випромінювання у приміщеннях за допомогою 34 вимірювальних каналів (ВК), побудованих на використанні БД БДБГ-09 (табл. 1).

Для проведення регресійного аналізу масивів даних ССРК було залучено прикладне програмне забезпечення, розроблене та апробоване на даних СКЯБ ІАСК [6]. Оцінку ступеня відповідності використаної

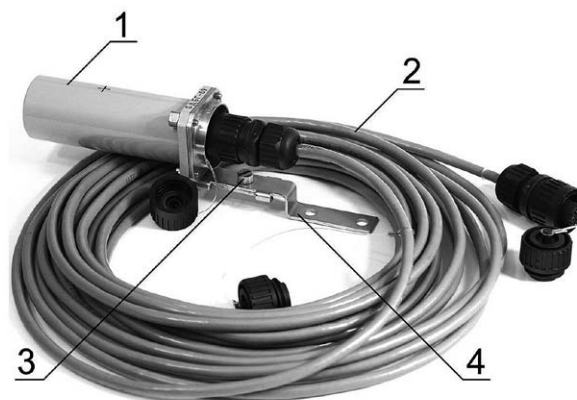


Рис. 1. Зовнішній вигляд БД БДБГ-09 (1) зі з'єднувальним кабелем (2), фіксатором (3) і кронштейном кріплення до стіни (4)

Таблиця 1. Розташування точок контролю ПЕД γ -випромінювання засобами ССРК у підконтрольних приміщеннях об'єкта «Укриття»

Позначення БК		Приміщення, назва блоку, висотна позначка, м	Координата розташування БД		
Повне	Скорочене		Вісь	Ряд	Висота над підлогою, м
SRMS-DAU-GDR002-GDR001	GDR 1	006/2, Б, 0,00	50	Е	1,8
SRMS-DAU-GDR001-GDR002	GDR 2	009/4, Б, 0,00	50	Ж	1,7
SRMS-DAU-GDR001-GDR003	GDR 3	01/3, Б, +1,25	49	Т	2,0
SRMS-DAU-GDR001-GDR004	GDR 4	01/3, Б, +1,25	50 ₊₂₀₀₀	Т	3,0
SRMS-DAU-GDR001-GDR005	GDR 5	101/2, Б, +3,00	50 ₊₃₀₀₀	Е ₊₁₀₀₀	1,8
SRMS-DAU-GDR004-GDR006	GDR 6	Г-109/3, Г, +1,00	55 ₊₁₀₀₀	В ₋₄₀₀₀	2,0
SRMS-DAU-GDR004-GDR007	GDR 7	Г-111/2, Г, +1,00	57 ₊₂₀₀₀	В ₋₄₀₀₀	2,4
SRMS-DAU-GDR006-GDR009	GDR 9	Г-107, Г, +1,00	45 ₊₁₀₀₀	В ₋₄₀₀₀	2,0
SRMS-DAU-GDR001-GDR010	GDR 10	207/5, Б, +8,00	50	К	3,0
SRMS-DAU-GDR001-GDR011	GDR 11	207/4, Б, +6,00	50	Ж	1,8
SRMS-DAU-GDR002-GDR012	GDR 12	208/10, Б, +9,00	47	Д ₋₃₀₀₀	1,5
SRMS-DAU-GDR004-GDR013	GDR 13	Г-262, Г, +5,80	54 ₊₅₀₀	В'	1,5
SRMS-DAU-GDR004-GDR015	GDR 15	Г-268, Г, +5,80	56 ₊₂₀₀₀	В ₋₁₀₀₀	1,5
SRMS-DAU-GDR004-GDR016	GDR 16	Г-284/4, Г, +5,80	52	В	1,8
SRMS-DAU-GDR002-GDR017	GDR 17	318/2, Б, +9,00	44	Ж	2,0
SRMS-DAU-GDR005-GDR018	GDR 18	Г-347, Г, +10,00	55 ₊₃₀₀₀	В'	2,0
SRMS-DAU-GDR005-GDR019	GDR 19	Г-350, Г, +10,00	66	Б	2,0
SRMS-DAU-GDR005-GDR020	GDR 20	3.8, Г, +10,00	61 ₊₂₀₀₀	В	1,8
SRMS-DAU-GDR006-GDR021	GDR 21	3.24, Г, +10,00	44	Б ₊₃₀₀₀	1,5
SRMS-DAU-GDR006-GDR022	GDR 22	3.30, Г, +10,00	40 ₊₃₀₀₀	В ₋₅₀₀₀	2,0
SRMS-DAU-GDR003-GDR023	GDR 23	427/2, Б, +12,50	50 ₊₄₀₀₀	Л	1,7
SRMS-DAU-GDR003-GDR024	GDR 24	401/2, Б, +12,50	50 ₊₃₀₀₀	И ₋₃₀₀₀	1,9
SRMS-DAU-GDR002-GDR025	GDR 25	406/2, Б, +12,50	44 ₋₃₀₀₀	К ₊₃₀₀₀	1,8
SRMS-DAU-GDR005-GDR026	GDR 26	Г-557, Г, +16,40	54	В ₊₂₀₀₀	2,0
SRMS-DAU-GDR005-GDR027	GDR 27	Г-557, Г, +16,40	66	В	2,0
SRMS-DAU-GDR003-GDR028	GDR 28	502/8, Б, +19,50	51 ₊₂₀₀₀	И	2,0
SRMS-DAU-GDR002-GDR029	GDR 29	515/3, Б, +19,50	43	И ₋₅₀₀	1,5
SRMS-DAU-GDR003-GDR030	GDR 30	605/2, Б, +24,00	50	К ₊₃₀₀₀	1,8
SRMS-DAU-GDR005-GDR031	GDR 31	Г-632, Г, +24,27	63 ₊₂₀₀₀	В ₊₂₀₀₀	2,0
SRMS-DAU-GDR005-GDR032	GDR 32	Г-632, Г, +24,27	54 ₊₂₀₀₀	В ₊₂₀₀₀	2,0
SRMS-DAU-GDR004-GDR033	GDR 33	вхід «брудний», Г, +5,80	59 ₊₂₀₀₀	В' ₊₃₀₀₀	1,8
SRMS-DAU-GDR001-GDR039	GDR 39	206/2, Б, +6,00	50	Л	2,0
SRMS-DAU-GDR001-GDR040	GDR 40	206/2, Б, +6,00	50 ₊₃₀₀₀	Е	1,5
SRMS-DAU-GDR005-GDR041	GDR 41	Г-360, Г, +10,00	58	В	2,0

Таблиця 2. Результати оцінки середнього за рік значення ПЕД γ -випромінювання ($m \pm \text{std}$, мкЗв $\cdot$ год⁻¹) та середньорічної швидкості його зміни в точках контролю ССРК

Скорочена назва ВК	Рік спостережень						$V_g, \%/рік$
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
GDR 1	315,8 $\pm$ 3,0	309,9 $\pm$ 2,3	304,3 $\pm$ 2,9	297,0 $\pm$ 2,2	289,0 $\pm$ 2,8	282,6 $\pm$ 2,2	-2,20
GDR 2	3900 $\pm$ 40	4043 $\pm$ 17	3982 $\pm$ 24	3903 $\pm$ 27	3824 $\pm$ 24	3755 $\pm$ 20	-1,83
GDR 3	69,4 $\pm$ 1,0	72,9 $\pm$ 1,0	72,0 $\pm$ 0,8	70,4 $\pm$ 1,4	68,5 $\pm$ 0,9	66,9 $\pm$ 0,9	-2,12
GDR 4	118,4 $\pm$ 1,2	117,1 $\pm$ 1,3	115,1 $\pm$ 1,2	112,6 $\pm$ 1,3	110,0 $\pm$ 1,3	107,8 $\pm$ 1,1	-1,85
GDR 5	6,9 $\pm$ 0,2	6,8 $\pm$ 0,2	6,7 $\pm$ 0,2	6,6 $\pm$ 0,2	6,5 $\pm$ 0,2	6,4 $\pm$ 0,2	-1,58
GDR 6	1,44 $\pm$ 0,06	1,40 $\pm$ 0,05	1,37 $\pm$ 0,05	1,35 $\pm$ 0,05	1,34 $\pm$ 0,04	1,32 $\pm$ 0,05	-1,98
GDR 7	0,40 $\pm$ 0,02	0,39 $\pm$ 0,02	0,39 $\pm$ 0,02	0,38 $\pm$ 0,02	0,39 $\pm$ 0,02	0,38 $\pm$ 0,02	-0,89
GDR 9	0,41 $\pm$ 0,02	0,41 $\pm$ 0,02	0,40 $\pm$ 0,02	0,40 $\pm$ 0,02	0,39 $\pm$ 0,02	0,39 $\pm$ 0,02	-1,39
GDR 10	1863 $\pm$ 83	1757 $\pm$ 15	1710 $\pm$ 21	1604 $\pm$ 72	1495 $\pm$ 23	1468 $\pm$ 10	-4,63
GDR 11	1295 $\pm$ 10	1248 $\pm$ 26	1202 $\pm$ 9	1174 $\pm$ 10	1146 $\pm$ 7	1125 $\pm$ 8	-2,76
GDR 12	586,0 $\pm$ 7,9	571,1 $\pm$ 7,1	554,8 $\pm$ 5,4	540,2 $\pm$ 5,4	529,5 $\pm$ 3,5	520,1 $\pm$ 4,0	-2,36
GDR 13	9,1 $\pm$ 0,2	8,8 $\pm$ 0,2	8,7 $\pm$ 0,2	8,5 $\pm$ 0,2	8,3 $\pm$ 0,2	8,1 $\pm$ 0,2	-2,14
GDR 15	4,4 $\pm$ 0,2	4,3 $\pm$ 0,2	4,2 $\pm$ 0,2	4,0 $\pm$ 0,2	4,1 $\pm$ 0,1	4,0 $\pm$ 0,1	-1,88
GDR 16	2,0 $\pm$ 0,1	2,1 $\pm$ 0,1	2,1 $\pm$ 0,1	2,0 $\pm$ 0,1	2,0 $\pm$ 0,1	2,0 $\pm$ 0,1	-1,35
GDR 17	146,3 $\pm$ 1,7	143,7 $\pm$ 1,6	140,4 $\pm$ 1,6	137,4 $\pm$ 1,4	134,1 $\pm$ 1,5	131,4 $\pm$ 1,4	-2,12
GDR 18	36,2 $\pm$ 0,5	35,7 $\pm$ 0,6	35,0 $\pm$ 0,6	34,3 $\pm$ 0,5	33,6 $\pm$ 0,5	33,0 $\pm$ 0,5	-1,85
GDR 19	1,95 $\pm$ 0,07	1,90 $\pm$ 0,06	1,86 $\pm$ 0,06	1,82 $\pm$ 0,06	1,92 $\pm$ 0,07	1,89 $\pm$ 0,06	-2,11
GDR 20	1,69 $\pm$ 0,06	1,65 $\pm$ 0,06	1,61 $\pm$ 0,06	1,56 $\pm$ 0,06	1,55 $\pm$ 0,05	1,52 $\pm$ 0,05	-2,07
GDR 21	0,82 $\pm$ 0,03	0,81 $\pm$ 0,03	0,79 $\pm$ 0,03	0,77 $\pm$ 0,03	0,75 $\pm$ 0,03	0,74 $\pm$ 0,03	-1,97
GDR 22	1,64 $\pm$ 0,06	1,60 $\pm$ 0,06	1,57 $\pm$ 0,06	1,53 $\pm$ 0,05	1,50 $\pm$ 0,05	1,47 $\pm$ 0,05	-2,15
GDR 23	89,7 $\pm$ 1,0	87,8 $\pm$ 1,0	85,7 $\pm$ 1,0	83,6 $\pm$ 0,9	82,0 $\pm$ 1,0	80,3 $\pm$ 0,9	-2,20
GDR 24	142,4 $\pm$ 1,3	139,5 $\pm$ 1,4	136,1 $\pm$ 1,4	133,1 $\pm$ 1,3	130,0 $\pm$ 1,3	127,7 $\pm$ 1,2	-2,15
GDR 25	2780 $\pm$ 17	2767 $\pm$ 18	2711 $\pm$ 17	2673 $\pm$ 12	2535 $\pm$ 17	2396 $\pm$ 14	-2,90
GDR 26	310,4 $\pm$ 3,1	304,7 $\pm$ 2,5	298,8 $\pm$ 2,9	290,5 $\pm$ 2,7	282,6 $\pm$ 4,0	275,6 $\pm$ 2,2	-2,35
GDR 27	1,25 $\pm$ 0,05	1,23 $\pm$ 0,05	1,20 $\pm$ 0,04	1,17 $\pm$ 0,04	1,15 $\pm$ 0,04	1,13 $\pm$ 0,04	-2,05
GDR 28	62,4 $\pm$ 0,9	61,1 $\pm$ 0,8	59,8 $\pm$ 0,8	58,7 $\pm$ 0,7	57,3 $\pm$ 0,8	56,3 $\pm$ 0,8	-2,03
GDR 29	143,3 $\pm$ 1,4	142,1 $\pm$ 1,4	139,3 $\pm$ 1,4	136,3 $\pm$ 1,3	133,6 $\pm$ 1,4	130,8 $\pm$ 1,2	-2,05
GDR 30	141,7 $\pm$ 1,4	140,2 $\pm$ 1,3	137,3 $\pm$ 1,3	134,3 $\pm$ 1,3	131,5 $\pm$ 1,4	128,8 $\pm$ 1,3	-2,09
GDR 31	23,4 $\pm$ 0,4	22,8 $\pm$ 0,4	22,3 $\pm$ 0,4	21,8 $\pm$ 0,4	21,2 $\pm$ 0,6	20,2 $\pm$ 0,4	-2,35
GDR 32	5,1 $\pm$ 0,1	5,0 $\pm$ 0,1	4,9 $\pm$ 0,1	4,8 $\pm$ 0,1	4,7 $\pm$ 0,1	4,6 $\pm$ 0,1	-2,15
GDR 33	38,1 $\pm$ 0,7	37,2 $\pm$ 0,5	36,5 $\pm$ 0,6	35,7 $\pm$ 0,5	34,9 $\pm$ 0,5	34,2 $\pm$ 0,5	-2,15
GDR 39	113,4 $\pm$ 1,3	111,6 $\pm$ 1,2	109,4 $\pm$ 1,2	106,4 $\pm$ 1,5	103,2 $\pm$ 1,2	101,2 $\pm$ 1,1	-2,26
GDR 40	72,8 $\pm$ 0,8	71,6 $\pm$ 0,9	70,0 $\pm$ 1,0	73,3 $\pm$ 1,4	72,0 $\pm$ 1,0	70,6 $\pm$ 1,0	-1,91
GDR 41	2,25 $\pm$ 0,11	2,18 $\pm$ 0,08	2,13 $\pm$ 0,07	2,07 $\pm$ 0,08	2,05 $\pm$ 0,07	2,00 $\pm$ 0,07	-2,31

Таблиця 3. Результати регресійного аналізу середньодобових значень ПЕД γ -випромінювання в точках контролю ССРК для двох періодів моніторингу

Скорочена назва ВК	Рівняння регресії $f(x) = A \cdot x + B$ (R^2)	
	2018–2022 рр.	2020–2023 рр.
GDR 1	$-0,018 x + 320$ (0,91)	$-0,02 x + 308$ (0,99)
GDR 2	$-0,07 x + 3998$ (0,10)	$-0,22 x + 4022$ (0,99)
GDR 3	$-0,0012 x + 72$ (0,10)	$-0,005 x + 73$ (0,94)
GDR 4	$-0,006 x + 120$ (0,97)	$-0,007 x + 116$ (0,99)
GDR 5	$-0,0002 x + 7$ (0,70)	$-0,0003 x + 7$ (0,93)
GDR 6	$-0,0001 x + 1,4$ (0,77)	$-0,00005 x + 1,4$ (0,52)
GDR 7	$-0,00001 x + 0,4$ (0,43)	$-0,000012 x + 0,4$ (0,38)
GDR 9	$-0,000015 x + 0,4$ (0,76)	$-0,000016 x + 0,4$ (0,70)
GDR 10	$-0,24 x + 1907$ (0,93)	$-0,25 x + 1744$ (0,89)
GDR 11	$-0,10 x + 1307$ (0,97)	$-0,07 x + 1216$ (0,99)
GDR 12	$-0,04 x + 593$ (0,98)	$-0,03 x + 560$ (0,98)
GDR 13	$-0,0004 x + 9,1$ (0,74)	$-0,0005 x + 8,8$ (0,89)
GDR 15	$-0,0003 x + 4,5$ (0,73)	$-0,0002 x + 4,2$ (0,43)
GDR 16	$-0,00003 x + 2,1$ (0,30)	$-0,00009 x + 2,1$ (0,84)
GDR 17	$-0,009 x + 148$ (0,98)	$-0,009 x + 142$ (0,98)
GDR 18	$-0,002 x + 36,7$ (0,98)	$-0,002 x + 35,3$ (0,96)
GDR 19	$-0,00006 x + 1,9$ (0,33)	$-0,000045 x + 1,8$ (0,17)
GDR 20	$-0,0001 x + 1,7$ (0,95)	$-0,0001 x + 1,6$ (0,71)
GDR 21	$-0,00005 x + 0,8$ (0,9)	$-0,00004 x + 0,8$ (0,80)
GDR 22	$-0,00008 x + 1,7$ (0,85)	$-0,00009 x + 1,6$ (0,85)
GDR 23	$-0,006 x + 91$ (0,99)	$-0,0005 x + 87$ (0,99)
GDR 24	$-0,009 x + 144$ (0,99)	$-0,008 x + 138$ (0,99)
GDR 25	$-0,15 x + 2839$ (0,51)	$-0,31 x + 2800$ (0,81)
GDR 26	$-0,02 x + 315$ (0,99)	$-0,02 x + 303$ (0,99)
GDR 27	$-0,00008 x + 1,3$ (0,93)	$-0,00007 x + 1,2$ (0,76)
GDR 28	$-0,003 x + 63$ (0,97)	$-0,003 x + 61$ (0,97)
GDR 29	$-0,007 x + 145$ (0,97)	$-0,008 x + 141$ (0,99)
GDR 30	$-0,008 x + 144$ (0,96)	$-0,008 x + 139$ (0,98)
GDR 31	$-0,0015 x + 23,6$ (0,95)	$-0,0019 x + 22,8$ (0,88)
GDR 32	$-0,0003 x + 5,1$ (0,96)	$-0,0003 x + 5,0$ (0,90)
GDR 33	$-0,002 x + 38,5$ (0,98)	$-0,002 x + 37$ (0,98)
GDR 39	$-0,007 x + 115$ (0,97)	$-0,008 x + 111$ (0,99)
GDR 40	$-0,0003 x + 72$ (0,01)	$0,0003 x + 71$ (0,004)
GDR 41	$-0,0002 x + 2,9$ (0,78)	$-0,0001 x + 2,1$ (0,65)

моделі машинної апроксимації даних (тренду) вихідним значенням ПЕД проводили за результатами визначення коефіцієнта достовірності апроксимації (R^2). Це дозволяє обґрунтовано зробити висновок щодо прийнятності використання отриманого рівняння регресії для прогнозування рівнів ПЕД у підконтрольному приміщенні впродовж наступних років. Для кожного ВК визначали значення відносної середньорічної швидкості зміни ПЕД γ -випромінювання (V_g) для порівняння зі значенням відносної швидкості розпаду радіонукліда ^{137}Cs ($V_{Cs} = -2,28 \text{ \%}/\text{рік}$, з огляду на величину періоду напіврозпаду 30,1 року). Величину V_g розраховували як

$$V_g = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=2018}^{2023} \left(\frac{N_{i+1} - N_i}{N_i} \right) \cdot 100\%,$$

де N_i і N_{i+1} — середньорічне значення ПЕД у попередньому та наступному роках відповідно.

Регламентом [2] визначені параметри, що характеризують вихід радіоактивних речовин та іонізуючих випромінювань за встановлені межі безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ. Для ПЕД γ -випромінювання на висоті 1 м від підлоги, залежно від призначення того чи іншого приміщення з точки зору режиму перебування персоналу, встановлено такі експлуатаційні межі (ЕМ): для приміщень постійного перебування персоналу — $7,5 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$; для приміщень періодичного перебування — $15 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$; для обмеженого перебування — $500 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$. З точки зору відповідності встановленим межам безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ всі підконтрольні ССРК приміщення розподіляли на групи, ґрунтуючись на результатах порівняння значення середньорічної ПЕД γ -випромінювання у 2023 р. з відповідним значенням ЕМ, наведеним вище.

Результати та обговорення

Відповідно до методології аналізу динаміки параметрів контролю [6], за допомогою прикладного програмного забезпечення була проведена машинна обробка даних ССРК, а саме результатів вимірювань ПЕД γ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття». У табл. 2 представлено результати оцінки середньорічного значення ПЕД γ -випромінювання в місцях розташування БД, а також відповідної величини V_g розрахованої за формулою, наведеною в попередньому розділі. У табл. 3 наведено результати регресійного аналізу даних ССРК для двох

періодів моніторингу, враховуючи наявність аномальних результатів вимірювань упродовж періоду спостережень.

На рис. 2–5 подано вибіркові результати машинної обробки даних ССРК, що ілюструють приклади типової форми динаміки середньодобових значень ПЕД γ -випромінювання для дуже низьких (фонових), середніх і дуже високих рівнів ПЕД γ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття», а також форму динаміки середньодобових значень ПЕД γ -випромінювання з наявністю аномальних результатів вимірювань. Як видно з наведених ілюстрацій, незалежно від рівня ПЕД γ -випромінювання, у підконтрольних приміщеннях об'єкта «Укриття» спостерігається одна загальна тенденція — стає зменшення середньомісячних значень на фоні сезонних коливань. Лише у двох ВК (див. рис. 5) динаміка ПЕД γ -випромінювання за формою дещо відрізняється від інших ВК. Це пов'язано з тим, що за допомогою ССРК на фоні сталого зменшення середньомісячних значень було зареєстровано значний «стрибок» середньодобового значення ПЕД у місцях встановлення GDR 40 (27.01.2021) і GDR 19 (03.01.2022). За розрахунками амплітуда «стрибка» ПЕД становила 12 і 8 % порівняно з попередніми результатами вимірювань. Однак, як показує рис. 5, у наступний період моніторингу динаміка ПЕД γ -випромінювання знову повернулася до загальної тенденції поступового зменшення середньомісячних значень ПЕД у приміщеннях об'єкта «Укриття» на фоні сезонних коливань.

Дані табл. 2 свідчать про те, що рівні ПЕД у підконтрольних ССРК приміщеннях об'єкта «Укриття» суттєво відрізняються. До того ж є приміщення, в яких за показниками двох БД, розташованих у різ-

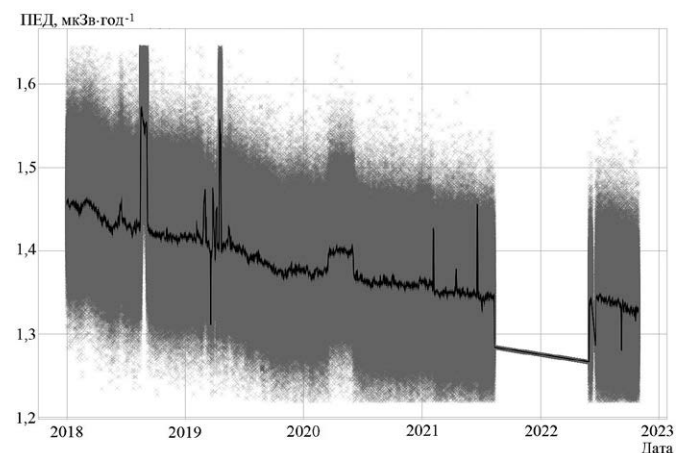


Рис. 2. Приклад динаміки середньодобового значення ПЕД γ -випромінювання. Низький рівень (GDR6)

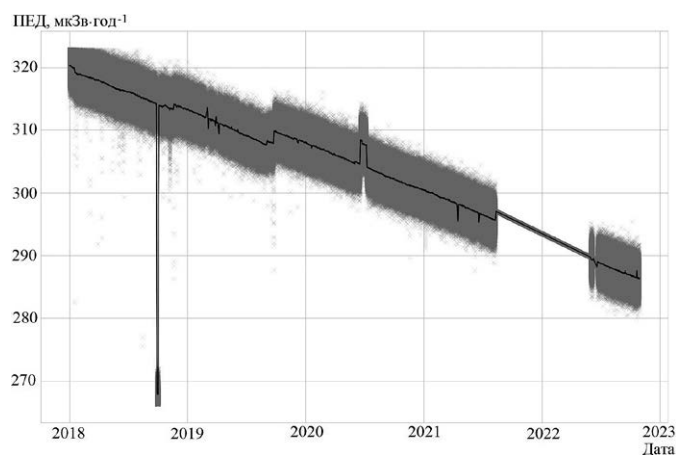


Рис. 3. Приклад динаміки середньодобового значення ПЕД γ -випромінювання. Середній рівень (GDR1)

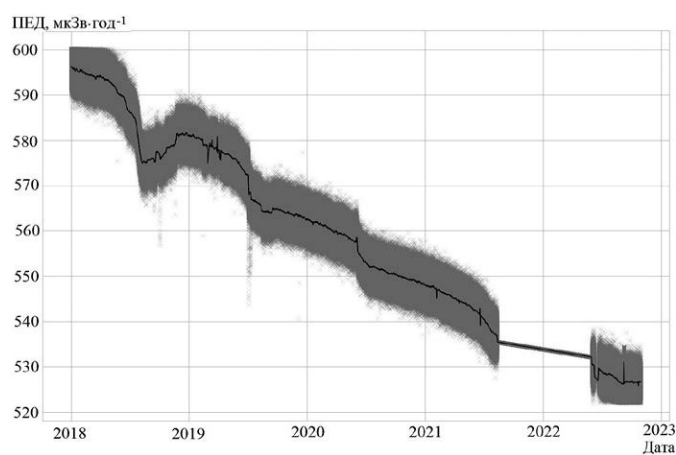
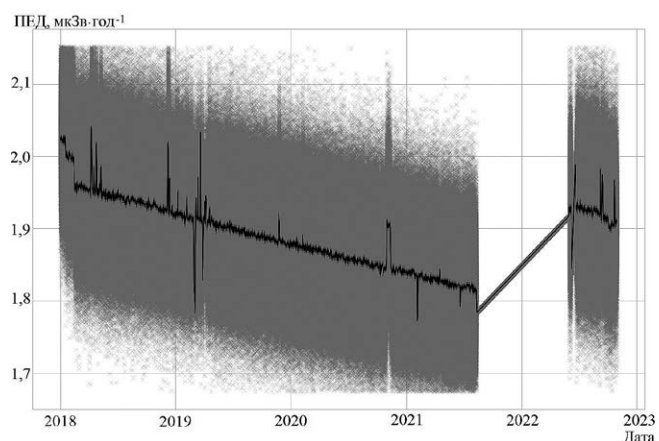
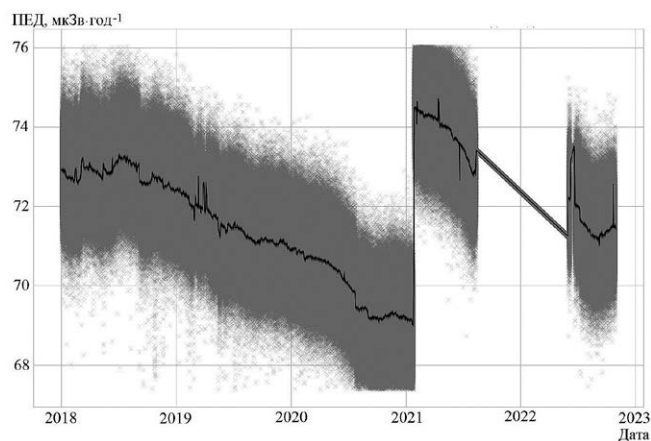


Рис. 4. Приклад динаміки середньодобового значення ПЕД γ -випромінювання. Дуже високий рівень (GDR12)



а



б

Рис. 5. Динаміка середньодобового значення ПЕД γ -випромінювання, зареєстрованих GDR19 (а) і GDR40 (б)

них місцях (див. табл. 1 і 2), ПЕД може відрізнятися від 1,4 до 250 разів. Це приміщення 206/2 у блоці Б (1,4 раза, відстань між БД ~ 25 м); 01/3 у блоці Б (1,6 разів, відстань між БД ~ 60 м); Г-632 у блоці Г (4,3 раза, відстань між БД ~ 55 м) і Г-557 у блоці Г (250 разів, відстань між БД ~ 72 м). Але, як було підкреслено вище, показники ПЕД у всіх ВК, за винятком GDR 19 і GDR 40, за певний період моніторингу підпорядковуються одній загальній тенденції. Крім того, на підставі даних табл. 2 можна зробити висновок, що величина V_g у точках контролю може знаходитися у діапазоні значень від $-0,89$ (GDR 7, фоновий рівень ПЕД) до $-4,63\%$ /рік (GDR 10, дуже високий рівень ПЕД). Середнє значення V_g для всіх точок контролю разом оцінено як $-2,12 \pm 0,57\%$ /рік, що в межах 8% збігається з V_{Cs} .

У роботі [7], за даними СКЯБ ІАСК, було аналогічно оцінено значення V_g для потужності експози-

ційної дози в бетоні підреакторної плити на різному віддаленні від границь ЯНС ПВМ. Виявилось, що для переважної більшості точок контролю в період із 2018 по 2022 рр. значення V_g знаходилося в діапазоні від $-1,6$ до $-2,6\%$ /рік, що за розмахом практично збігається з довірчим інтервалом середнього значення V_g для ПЕД у підконтрольних ССРК приміщеннях об'єкта «Укриття». Визначені відмінності між V_g та V_{Cs} обумовлені тим, що в спектрі радіоактивного забруднення бетону в різних місцях об'єкта «Укриття» крім ^{137}Cs присутні інші γ -випромінюючі радіонукліди, внесок яких у сумарний гамма-фон залежно від періоду їхнього радіоактивного розпаду може призводити чи до збільшення, чи до зменшення значення відносної середньорічної швидкості зміни ПЕД γ -випромінювання (V_g).

У технологічному регламенті експлуатації комплексу НБК-ОУ [2] визначено граничні значення ПЕД

Таблиця 4. Розподіл підконтрольних приміщень об'єкта «Укриття» за групами відповідно до значень ЕМ

Група	ЕМ, мкЗв/год	Приміщення, назва блоку, висотна позначка, м		Середнє значення V_g за групою приміщень, %/рік ($m \pm \text{std}$)
I	7,5	101/2, Б, +3,00 Г-109/3, Г, +1,00 Г-111/2, Г, +1,00 Г-107, Г, +1,00 Г-268, Г, +5,80 Г-284/4, Г, +5,80 Г-350, Г, +10,00	3.8, Г, +10,00 3.24, Г, +10,00 3.30, Г, +10,00 Г-557 Г, +16,40 Г-632, Г, +24,27 Г-360, Г, +10,00	$-1,84 \pm 0,41$
II	15	Г-262, Г, +5,80		$-2,14 \pm 0,23$ (GDR 13)
III	500	006/2, Б, 0,00 01/3, Б, +1,25 318/2, Б, +9,00 Г-347, Г, +10,00 427/2, Б, +12,50 401/2, Б, +12,50 Г-557, Г, +16,40	502/8, Б, +19,50 515/3, Б, +19,50 605/2, Б, +24,00 Г-632, Г, +24,27 «Брудний» вхід, Г, +5,80 206/2, Б, +6,00	$-2,11 \pm 0,16$
IV	–	009/4, Б, 0,00 207/5, Б, +6,00 207/4, Б, +6,00	208/10, Б, +9,00 406/2, Б, +12,50	$-2,90 \pm 1,05$

γ -випромінювання в повітрі для трьох категорій приміщень: постійного перебування персоналу; періодичного перебування персоналу (напівобслуговуванні); обмеженого перебування персоналу. У табл. 4 на підставі даних табл. 2 подано розподіл підконтрольних ССРК приміщень об'єкта «Укриття» за критерієм відповідності середньорічної ПЕД γ -випромінювання (станом на 2023 р.) установленим значенням ЕМ: I група — ПЕД $< 7,5$ мкЗв $\cdot$ год $^{-1}$; II група — $7,5$ мкЗв $\cdot$ год $^{-1}$ $<$ ПЕД < 15 мкЗв $\cdot$ год $^{-1}$; III група — 15 мкЗв $\cdot$ год $^{-1}$ $<$ ПЕД < 500 мкЗв $\cdot$ год $^{-1}$; IV група > 500 мкЗв $\cdot$ год $^{-1}$.

Якщо згрупувати точки контролю за критерієм відповідності ЕМ, як це показано в табл. 4, середнє значення V_g за групою може становити від $-1,84$ до $-2,9$ %/рік. При цьому у приміщеннях, що задовольняють умовам для постійного перебування персоналу (I група), ПЕД за значенням V_g спадає більш повільно, ніж у приміщеннях періодичного та обмеженого перебування (II та III групи). У приміщеннях, що за ЕМ не задовольняють навіть умовам обмеженого перебування персоналу (IV група), рівні ПЕД за значенням V_g спадають більш інтенсивно (на 27 %) порівняно зі швидкістю розпаду ^{137}Cs . Але й варіабельність V_g порівняно з іншими групами приміщень є найвищою (36 %).

Дані, наведені в табл. 3, свідчать про те, що оцінені тренди щодо зменшення ПЕД є достовірними, за винятком ВК GDR 19 і GDR 40 ($R^2 < 0,2$). Наявність «стрибка» в показниках ВК GDR 19 і GDR 40 (див. рис. 5) не дозволила апроксимувати динаміку ПЕД γ -випромінювання лінійною функцією. Для інших ВК отримана апроксимуюча функція має високий ($R^2 > 0,7$) або достатньо високий ($R^2 \geq 0,4$) ступінь достовірності, що дає підстави робити надійний прогноз щодо подальшої зміни середньодобових значень ПЕД γ -випромінювання практично для всіх підконтрольних ССРК приміщень об'єкта «Укриття». Як видно з даних табл. 3, для таких ВК, як GDR 2, 3, 15, 16, 19 і 25, вибір того чи іншого періоду моніторингу для апроксимації даних може суттєво вплинути на ступінь достовірності обраної апроксимуючої функції.

Висновки

Відповідно до визначених у регламенті експлуатації комплексу НБК-ОУ граничних значень ПЕД γ -випромінювання в повітрі (експлуатаційних меж) підконтрольні ССРК приміщення розділені на групи залежно від значення середньорічної ПЕД γ -випромінювання станом на 2023 р.

За даними ССРК ІАСК, у приміщеннях об'єкта «Укриття» спостерігається лише один тип динаміки ПЕД γ -випромінювання — стале зменшення середньомісячного значення на фоні явно виражених сезонних коливань. У середньому зменшення ПЕД γ -випромінювання оцінюється як $-2,12 \pm 0,57$ %/рік, що на 8 % нижче відносної швидкості радіоактивного розпаду ^{137}Cs . Порівняно з відносною швидкістю радіоактивного розпаду ^{137}Cs у приміщеннях, що задовольняють умовам для постійного перебування персоналу, ПЕД γ -випромінювання спадає більш повільно, ніж у приміщеннях, віднесених до категорії періодичного та обмеженого перебування. Визначені відмінності обумовлені тим, що в спектрі радіоактивного забруднення бетону в різних приміщеннях об'єкта «Укриття» крім ^{137}Cs присутні інші γ -випромінюючі радіонукліди, внесок яких у сумарний гамма-фон залежно від періоду їхнього радіоактивного розпаду може призводити чи до збільшення, чи до зменшення відносної середньорічної швидкості зміни ПЕД γ -випромінювання.

Результати, отримані в роботі, дозволяють надійно прогнозувати рівні ПЕД γ -випромінювання у підконтрольних приміщеннях об'єкта «Укриття» і можуть бути використані для планування робіт та оцінки часу перебування персоналу в умовах високих дозових навантажень без додаткового дозиметричного обстеження.

Список використаної літератури

1. Об'єкт «Укриття»: 30 років після аварії / В. О. Краснов, А. В. Носовський, В. М. Рудько, В. М. Щербін. — Чорнобиль : ІПБ АЕС НАН України, 2016. — 512 с.
2. Технологічний регламент експлуатації комплексу «НБК-ОУ». — ДСП «Чорнобильська АЕС», 2021. — 1Е-С-НБК-ОУ. Інв. № 110 від 25.08.2021. — 114 с.
3. Інструкція з експлуатації датчиків стаціонарної системи радіаційного контролю інтегрованої автоматизованої системи контролю об'єкта «Укриття» (ССРК ІАСК). — ДСП «Чорнобильська АЕС», 2023. — 27Е-ЦРБ. Інв. № 80 від 09.05.2023. — 39 с.
4. Блок детектування гамма-випромінювання БДБГ-09. Настанова щодо експлуатування. — ВІСТ.418266.006 НЕ. — 49 с. — Режим доступу: https://ecotest.ua/wp-content/uploads/2014/08/NE_BDBG-09_ua_zm-3_zatu_tirazh__bez-ris-2__F.pdf
5. The nuclear safety monitoring system for fuel-containing materials located in destroyed Unit No. 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization / M. V. Saveliev, R. L. Godun, M. A. Pantin [et al.] // Nuclear Physics and Atomic Energy. — 2022. — Vol. 23. — P. 172–181.
6. Савельєв М. В. Аналіз динаміки потужності експозиційної дози γ -випромінювання та щільності потоку нейтронів в об'єкті «Укриття» Чорнобильської АЕС» / М. В. Савельєв, О. В. Михайлов, Д. О. Сущенко // Ядерна енергетика та довкілля. — 2022. — № 3 (25). — С. 24–32.
7. Features of neutron flux density and gamma-radiation exposure dose rate dynamics in ChNPP Shelter object after the New Safe Confinement commissioning / O. V. Mykhailov, M. V. Saveliev, K. O. Sushchenko, V. V. Dmytryshyn // Nuclear Power and the Environment. — 2023. — Vol. 2 (27). — P. 44–55.

O. V. Mykhailov¹, M. V. Saveliev^{1,2}, M. A. Pantin²

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine

² Institute of Mathematical Machines and Systems Problems NAS of Ukraine, 42, Akademika Glushkova ave, Kyiv, 03680, Ukraine

Results of Monitoring of Equivalent Dose of γ -Radiation in the Shelter Object Rooms

After the construction of the Shelter object (SO), also known as Chornobyl Sarcophagus, several research measurement systems were created to understand and monitor the fuel-containing materials behaviour. Within the framework of the SO, transformation into environmentally safe system by the construction of the New Safe Confinement (NSC), and prior to the protective Arch was set into design position, integrated automated monitoring system (IAMS), was created. One of components of the IAMS is the Stationary Radiation Monitoring System (SRMS), designed for monitoring of such parameters of the radiation situation in the SO rooms and the industrial site as gamma equivalent dose rate (GDR) and volumetric activity of α -, β - aerosols in the air. This work is devoted to the analysis of the SRMS data in terms of the GDR measurements results.

The analysis of the GDR data in the SO rooms for 34 monitoring point, received during the years 2018–2023, was carried out. It was established that only one type of GDR dynamics is observed in the SO rooms — a constant decrease in the average monthly value against the background of pronounced seasonal fluctuations. The average annual decrease of GDR is estimated as -2.12 ± 0.57 %/year,

which is 8% lower than the rate of radioactive decay of ^{137}Cs . Compared to the rate of radioactive decay of ^{137}Cs in rooms that meet the conditions for permanent staff presence, the GDR decrease more slowly than in rooms categorized as periodic and limited stay.

The results of SRMS data approximation obtained in the work make it possible to reliably predict the GDR levels in the controlled SO rooms and can be used to plan works and estimate the time when, under conditions of high GRD levels, such works can be performed by personnel in the places where they are carried out.

Keywords: Chornobyl NPP, New Safe Confinement, Shelter object, Stationary Radiation Monitoring System, gamma equivalent dose rate, dynamic, regression analysis.

References

1. Krasnov V. O., Nosovskyi A. V., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2016). *Obiekt "Ukryttya": 30 rokiv pislia avariyi* [The Shelter object: 30 years after the accident]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 512 p. (in Ukr.)
2. *Technological regulations for the operation of the NSC-SO complex (1E-S-NSC-SO)*. Slavutych: SSE "Chornobyl NPP", 2021, 114 p. (in Ukr.)
3. *Instructions for the use of sensors of the stationary radiation control system of the integrated automated control system of the Shelter object (SRMS IAMS)*. 27E-RSS. Slavutych: SSE "Chornobyl NPP", 2023, 39 p. (Ukr)
4. *BDBG-09 gamma detection block. Operating guidance*. VIST.418266.006 NE. 49 p. Available at: https://ecotest.ua/wp-content/uploads/2014/08/ne_bdbg-09_ua_zm-3_zatu_tirazh__bez-ris-2__f.pdf. (in Ukr.)
5. Saveliev M. V., Godun R. L., Pantin M. A., Skiter I. S., Sushchenko K. O. (2022). The nuclear safety monitoring system for fuel-containing materials located in destroyed Unit No. 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 23, pp. 172–181.
6. Saveliev M. V., Mykhailov O. V., Sushchenko D. O. (2022). [Analysis of exposure dose rate and neutron flux density dynamics in the Shelter object of the Chornobyl NPP]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 25, no. 3, pp. 24–32. (in Ukr.)
7. Mykhailov O. V., Saveliev M. V., Sushchenko K. O., Dmytryshyn V. V. (2023). Features of neutron flux density and gamma-radiation exposure dose rate dynamics in ChNPP Shelter object after the New Safe Confinement commissioning. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 27, no. 2, pp. 44–55.

Надійшла 22.07.2024

Received 22.07.2024

K. V. Simeiko^{1,2}, O. P. Kozhan², M. A. Sydorenko¹, V. S. Ryabchuk², K. V. Lobach³, O. M. Skoblyk¹,
V. S. Havrylenko¹, P. A. Sabienin¹

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine

² Gas Institute of the NAS of Ukraine, 39, Dehtiarivska st., Kyiv, 03113, Ukraine

³ National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”, 1, Akademichna st., Kharkiv, 61108, Ukraine

Thermodynamic Calculations and Hydrodynamic Studies of the Process of High-Temperature Purification of Graphite in an Electrothermal Fluidized Bed

Ключові слова:

nuclear-purity graphite,
electrothermal fluidized bed,
hot filtration,
thermodynamics,
hydrodynamics

The general increase in electricity consumption and the development of nuclear energy, including next generation nuclear reactors where graphite-based materials are used, definitely leads to an increase in the need for its production. Therefore, the development and improvement of technologies for the production of high-purity graphite (including nuclear), namely the understanding of the thermodynamic and hydrodynamic processes of graphite purification, is of great practical importance. Thermodynamic calculations of the main chemical reactions of the high-temperature graphite purification process were carried out in the paper. For conducting thermodynamic calculations, a sample of natural graphite with a purity of up to 94.33% mass was taken. With the following composition of impurities: SiO_2 –3.05% mass; Al_2O_3 –1.05% mass; Fe_2O_3 –1.01% mass; CaO — 0.2% mass; MgO — 0.31% mass; S — 0.048% mass. The thermochemical parameters of the process were determined by the thermodynamic method (“TERRA” program). During the calculation, 0.9433 mol of C, 0.0305 mol of SiO_2 , 0.0105 mol of Al_2O_3 , 0.0101 mol of Fe_2O_3 , 0.0002 mol of CaO , 0.0031 mol of MgO , 0.00048 mol of S , and 1 mol of N_2 were taken, temperature range is 300...3278 K, and pressure is 0.1 MPa. Obtained results show that at a temperature above 1600 K, part of the initial carbon is oxidized to CO, and nitrogen actually does not affect the process. And also taking into account that part of the substances CO; Si; SiC_2 ; SiS; Al; Fe; Mg; Ca; SiO at temperatures of 2800...3200 K are in a gas state and are carried to the purifier, from which we can conclude that the reaction temperature must be higher than 2800 K to carry out this process. The study of the hydrodynamic characteristics of graphite in a fluidized bed was carried out on the designed model installation with a fluidized bed. The working zone of the device is made in the form of a graphite cone with an opening angle of 25°, which provided the creation of a “spouted bed”. Besides, part of the fluidizing agent (nitrogen) was supplied in a pulsating mode. For the research, 6 samples of graphite with different physical properties and chemical composition were chosen, the filling volume was 0.5 l. Based on thermodynamic calculations of the basic thermochemical reactions and cold hydrodynamic tests, a laboratory installation was created to monitor the process of high-temperature purification of graphite.

Introduction

Due to its unique properties, graphite has become an

integral part of items used in nuclear power, power equipment, mechanical engineering, metallurgy and other industries. The field of application of graphite is constantly

© K. V. Simeiko, O. P. Kozhan, M. A. Sydorenko, V. S. Ryabchuk, K. V. Lobach,
O. M. Skoblyk, V. S. Havrylenko, P. A. Sabienin, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

expanding, thereby determining its consumer demand [1–7]. Taking this into account, graphite is already included in the list of strategic raw materials of the EU countries [1].

Other features of graphite as a material for nuclear physics include, first of all, a small effective cross-section σ of photonuclear reactions for carbon in the giant resonance region, associated with disruption of the natural oscillations of protons relative to neutrons (dipole oscillations) by γ -quanta. Nucleons can leave the nucleus not only during dipole oscillations, but also after their decay. A large part of collisions of neutrons with carbon nuclei occurs by the mechanism of elastic scattering, which led to the effective use of graphite as a neutron moderator or absorber [8].

Graphite is a good construction material, due to the very high temperature of sublimation, graphite remains solid (in an oxygen-free atmosphere) up to temperatures of the order of 4273 K. At the same time, at a low density, graphite is a material that is not only solid, but also easily processed mechanically, has a low pressure of saturated vapors in a vacuum even at elevated temperatures. Graphite has high thermal conductivity and heat capacity, at the same time not necessarily having high electrical conductivity. This material in the temperature range of its use increases its strength with increasing temperature, has corrosion and erosion resistance during irradiation [9]. The strength of graphite varies significantly depending on the method of its production, therefore graphites with the identical density, but differing in structure, can have different strengths. The general rule is that a more finely structured graphite composite has greater strength and longer service life, as a rule [10].

Graphite as a structural and functional material was used in high-temperature reactors: AVR (Germany), HTGR-1 (USA), improved reactor with gas cooling AGR (England), and in high power channel-type reactors (HPCR) (USSR, RF, Lithuania) [11]. Currently, graphite is a structural and functional material in nuclear power systems of the IV generation, in particular, in high-temperature gas cooled (HTGR, HTR, HTGR, VHTR) and molten salt reactors (MSR) [12].

With the development of nuclear power systems of the IV generation and the increase in the popularity of electric transport, there is a dynamic increase in the consumption of graphite [13–16], therefore the issue of developing and improving technologies for the production of high-purity graphite (including nuclear) is of great practical importance.

An overview of modern graphite purification technologies is described by the authors in [17].

Thermodynamic calculations of the main chemical reactions of the high-temperature graphite purification process

The research is based on the idea of high-temperature purification of graphite to high degrees of purity in an oxygen-free atmosphere without the use of harmful halogen-containing compounds.

The task of the research as a whole is to determine the fundamental possibility of purifying natural graphite to nuclear purity by means of its high-temperature treatment in an electrothermal fluidized bed (ETFB).

For research, 6 samples of natural graphite were taken, the characteristics of which are presented in Table. 1.

The use of a fluidized bed (FB) should allow heat to be evenly distributed between graphite particles, and the formation of a microdischarge plasma will allow reaching the required temperatures.

Thermodynamic methods (“TERRA” program) were used to determine the thermochemical parameters of the process.

Natural graphite with a purity of up to 94.33 % mass was chosen for the study with the following composition of impurities: SiO_2 — 3.05 % mass; Al_2O_3 — 1.05 % mass; Fe_2O_3 — 1.01 % mass; CaO — 0.2 % mass; MgO — 0.31 % mass; S — 0.048 % mass. During the calculation, 0.9433 mol of C, 0.0305 mol of SiO_2 , 0.0105 mol of Al_2O_3 , 0.0101 mol of Fe_2O_3 , 0.0002 mol of CaO , 0.0031 mol of MgO , 0.0031 mol of MgO , 0.0048 mol of S and 1 mol N_2 were taken, temperature range is 300...3278 K, pressure is 0.1 MPa:

The equilibrium curves of the system are shown in Fig. 1.

For a more convenient perception of impurity concentrations, let's make a graph excluding carbon, nitrogen and CO (Fig. 2).

The equilibrium composition of the system is given in Tables 2–4.

From these calculations, it can be seen that above 1600 K, part of the initial carbon is oxidized to CO. Nitrogen actually does not affect the processes.

The main thermophysical characteristics of this process are given in Table 5, where T is temperature, K, S_{ENTR} is entropy, kJ/kg K, I_{ENTL} is total enthalpy, U_{IE} is total internal energy, kJ/kg, MMg is the molar mass of the gas phase, Cp' is the specific heat capacity, $Cp'g$ is heat capacity of gas phase, kJ/(kg · K).

Considering that part of the CO; Si; SiC_2 ; SiS ; Al; Fe; Mg; Ca; SiO substances at temperatures of 2800...3200 K are in a gaseous state and carried to the purifier, the meth-

Table 1. Characteristics of natural graphite samples

Parameter	Sample					
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
Content of chemical components, % mass:						
Ph	9.2	9.2	8.6	9.4	8.1	9.0
C	91.0	90.4	92.4	92.3	93.1	93.0
Al	8.8	9.4	7.3	7.6	6.8	6.8
W	0.2	0.2	0.5	0.3	0.2	0.17
V	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2
Bulk density, g/l	482	430	553	377	466	651
Tap density, g/l	610	580	710	500	600	570
Granulometric composition, %:						
500 μm	–	–	–	–	–	–
400 μm	–	–	–	–	–	–
315 μm	–	–	0.1	–	–	–
200 μm	0.4	0.1	7.2	0.2	0.3	–
180 μm	1.0	0.6	5.5	0.3	1.0	0.1
160 μm	4.4	1.1	6.5	0.7	3.1	1.1
150 μm	4.8	2.3	5.9	1.1	4.9	2.2
100 μm	36.1	20.6	25.6	10.2	33.3	23.6
71 μm	23.5	23.9	19.3	23.8	25.3	31.5
63 μm	7.9	9.1	10.3	14.8	10.7	12.3
45 μm	9.9	18.3	9.3	19.3	10.7	14.6
–45 μm	12.0	24.0	10.3	29.6	10.7	14.6

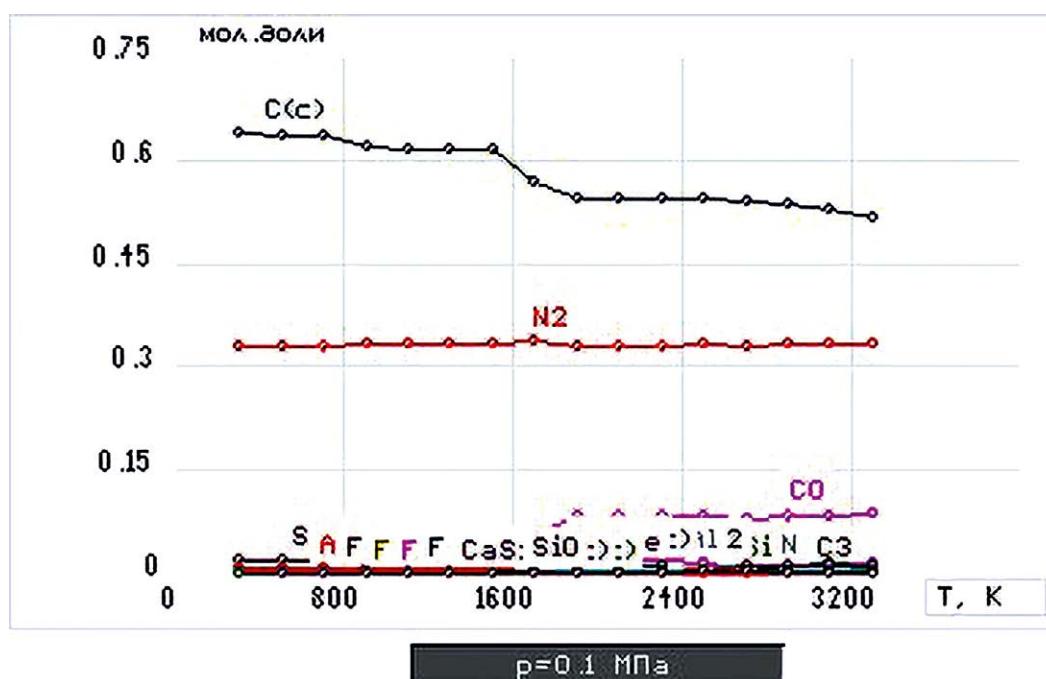


Fig. 1. Equilibrium curves of the system “C + SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ + CaO + MgO + S + N₂
0.9433 : 0.0305 : 0.0105 : 0.0101 : 0.0002 : 0.0031 : 0.00048 : 1”

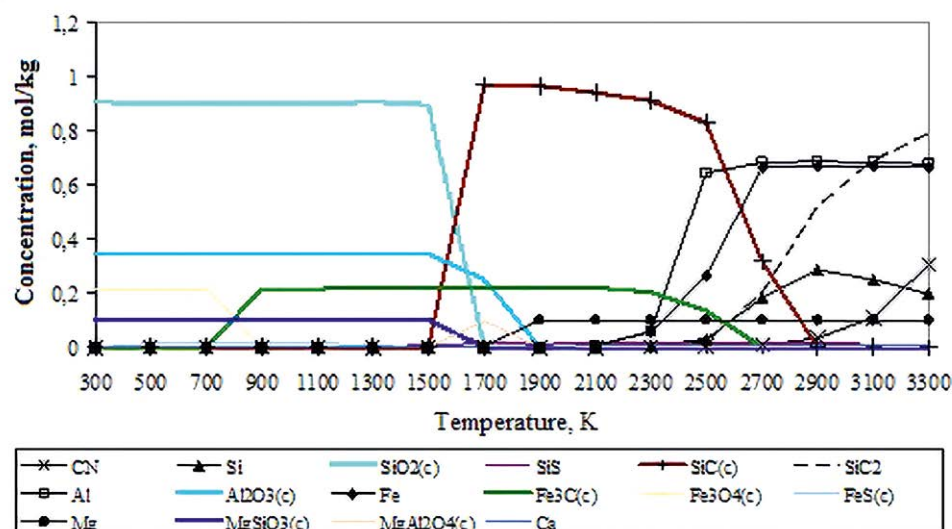


Fig. 2. Equilibrium curves of the system "C + SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ + CaO + MgO + S + N₂ 0.9433 : 0.0305 : 0.0105 : 0.0101 : 0.0002 : 0.0031 : 0.00048 : 1" (excluding carbon, nitrogen and CO)

od of high-temperature purification of graphite to high degrees of purity must be effective.

Determination of hydrodynamic features of fluidization of natural graphite on a cold model

Natural graphite powder, due to the platelet (lamellar) shape of its particles, is an inconvenient material for creating a FB. During blowing it with gas, instead of the usual bubble boiling, one or more channels are formed, through which most of the gas passes. In order to pass the bubble boiling of the material and ensure the possibility of continuous operation of the installation (loading/unloading without cooling of the installation), the working zone of the reactor is made in the form of a graphite cone with an opening angle of 25°, which ensured the creation of a "spouted bed". In addition, part of the fluidizing agent (nitrogen) was supplied in a pulsating mode.

The experiments were carried out in the cold mode of operation of the ETFB laboratory installation with the outer cover open to determine the optimal parameters for supplying the fluidizing agent (nitrogen) to the working area, which would ensure good mixing of the material in the working area. At the first stage, nitrogen was supplied in a single flow in a stationary and pulsating mode in the center of the working area. Graphite samples Nor. 1–7 with a filling volume of 0.5 l were selected for the research. The schematic picture of material fluidization is presented in Fig. 3.

Based on the results of visual observation of the fluidization nature, it can be noted that the boiling of sample

No. 6 was characterized by the formation of a channel and the ejection of material at the point that was above the hole for nitrogen supply and the finished material discharge. The boiling of sample No. 5 was similar to that of sample No. 6, but it was characterized by a smaller emission of graphite particles. During the boiling of sample No. 4, the working area was heavily "dusted" with finely dispersed material, which prevented the visual control of the process. Higher values of the nitrogen flow did not ensure proper boiling and mixing of the material, but only caused a higher discharge of the material through the channel and an increase in the removal of the material. Lower values of nitrogen consumption led to the "laying down" of graphite material. The material of samples No. 2 and No. 3 was generally in a stationary state and only under mechanical influence, a channel was formed in it through which nitrogen passed. Practically the same picture also occurred for sample No. 1.

To assess the possibility of intensification of fluidization of the material, similar experiments were conducted on a cold model of the working zone of the laboratory installation with an additional supply of nitrogen through side holes in the peripheral electrode. The visual picture of fluidization is shown in Fig. 4.

Additional supply of nitrogen through side channels increased the intensity and degree of homogeneity of boiling, however, during pulsations and when the supply was stopped, the material flowed through these holes into the cold zone of the reactor (outside the peripheral electrode). Therefore, in order to avoid the removal of graphite material during experiments on heat treatment of graphite, it was

Table 2. The equilibrium composition of the system “C + SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ + CaO + MgO + S + N₂ 0.9433 : 0.0305 : 0.0105 : 0.0101 : 0.0002 : 0.0031 : 0.00048 : 1” (mol /kg)

T	N ₂	C(c)	CO	CN	Si	SiO ₂
300	16.5158	31.8558	3.59E-11	1.93E-22	1.93E-22	0.904849
500	16.5158	31.8505	4.24E-05	1.93E-22	1.93E-22	0.898249
700	16.5158	31.8428	0.015449	1.93E-22	1.93E-22	0.898249
900	16.5158	30.8556	0.690432	1E-19	1.93E-22	0.898249
1100	16.5158	30.7066	0.988257	4.38E-15	1.93E-22	0.898249
1300	16.5158	30.6927	1.00374	7.01E-12	2.11E-16	0.904845
1500	16.5158	30.6717	1.02286	1.55E-09	1.95E-10	0.895677
1700	16.5158	27.7346	2.98863	1E-07	2.27E-07	1E-30
1900	16.1687	26.6007	4.12938	2.59E-06	0.000011	1E-30
2100	16.17	26.6468	4.11041	3.56E-05	0.000245	1E-30
2300	16.202	26.7137	4.08349	0.000309	0.003171	1E-30
2500	16.5125	26.8634	4.03821	0.001956	0.028484	1E-30
2700	16.5034	27.0783	4.02613	0.009271	0.182607	1E-30
2900	16.4794	26.6359	4.10524	0.035102	0.287433	1E-30
3100	16.4178	26.0983	4.14568	0.111012	0.249027	1.15E-27
3300	16.2695	25.1775	4.15654	0.304904	0.195782	2.86E-30

Table 3. The equilibrium composition of the system “C + SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ + CaO + MgO + S + N₂ 0.9433: 0.0305: 0.0105: 0.0101: 0.0002: 0.0031: 0.00048: 1” (mol /kg)

T	SiS	SiC(c)	SiC ₂	Al	Al ₂ O ₃	Fe	Fe ₃ C
300	1.93E-22	1E-30	1.93E-22	1.93E-22	0.347129	1.93E-22	1E-30
500	1.93E-22	1E-30	1.93E-22	1.93E-22	0.347129	1.93E-22	1E-30
700	1.93E-22	1E-30	1.93E-22	1.93E-22	0.347129	1.93E-22	1E-30
900	1.18E-21	1E-30	1.93E-22	1.93E-22	0.347129	9.1E-16	0.21656
1100	1.3E-12	1E-30	1.93E-22	1.93E-22	0.347129	1.46E-11	0.21661
1300	3.21E-06	1E-30	6.96E-20	7.4E-16	0.347129	1.14E-08	0.219052
1500	0.00875	1E-30	5.43E-13	1.32E-10	0.347129	1.47E-06	0.221844
1700	0.015843	0.97136	3.19E-09	3.45E-07	0.248792	5.59E-05	0.221825
1900	0.010174	0.964793	5.47E-07	5.79E-05	1.68E-28	0.000931	0.221534
2100	0.015825	0.940029	3.33E-05	0.002617	1E-30	0.008648	0.218961
2300	0.015797	0.91188	0.000986	0.060511	1E-30	0.054233	0.203766
2500	0.015749	0.829023	0.017608	0.644204	1E-30	0.264013	0.133839
2700	0.015708	0.314833	0.201436	0.684619	1E-30	0.665531	1.37E-26
2900	0.015198	5.54E-26	0.519755	0.687619	1E-30	0.665528	1E-30
3100	0.012531	1.15E-27	0.690585	0.684705	1.15E-27	0.665519	1.15E-27
3300	0.006462	2.86E-30	0.787044	0.677185	2.86E-30	0.665494	2.86E-30

Table 4. The equilibrium composition of the system “C + SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ + CaO + MgO + S + N₂ 0.9433 : 0.0305 : 0.0105 : 0.0101 : 0.0002 : 0.0031 : 0.00048 : 1” (mol /kg)

T	Fe ₃ O ₄	FeS	Mg	MgSiO ₃	MgAl ₂ O ₄	Ca
300	0.219198	8.73E-26	1.93E-22	0.101673	1E-30	1.93E-22
500	0.216553	0.015874	1.93E-22	0.101673	1E-30	1.93E-22
700	0.216553	0.015874	1.93E-22	0.101673	1E-30	1.93E-22
900	1E-30	0.015853	6.68E-21	0.101673	1E-30	1.93E-22
1100	1E-30	0.015701	5.45E-14	0.101673	1E-30	4.06E-20
1300	1E-30	0.008377	3.94E-09	0.101673	1E-30	1.07E-14
1500	1E-30	9.11E-29	1.37E-05	0.101659	1E-30	1.32E-10
1700	1E-30	1E-30	0.003334	2.42E-28	0.098337	7.44E-07
1900	1E-30	1E-30	0.101663	1E-30	4.15E-29	0.000926
2100	1E-30	1E-30	0.101668	1E-30	1E-30	0.006599
2300	1E-30	1E-30	0.101671	1E-30	1E-30	0.006597
2500	1E-30	1E-30	0.101672	1E-30	1E-30	0.006596
2700	1E-30	1E-30	0.101672	1E-30	1E-30	0.006586
2900	1E-30	1E-30	0.101671	1E-30	1E-30	0.006561
3100	1.15E-27	1.15E-27	0.101666	1.15E-27	1.15E-27	0.006507
3300	2.86E-30	2.86E-30	0.101656	2.86E-30	2.86E-30	0.006399

Table 5. Thermophysical characteristics of the graphite purification process in the system “C + SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ + CaO + MgO + S + N₂ 0.9433 : 0.0305 : 0.0105 : 0.0101 : 0.0002 : 0.0031 : 0.00048 : 1”

T	S _{ENTR}	I _{ENTL}	U _{IE}	Cp'	MMg	Cp'g
300	3.463	-1836.07	-1836.33	0.868105	28.0657	1.03964
500	3.96746	-1636.52	-1664.35	1.09949	28.0771	1.05506
700	4.36624	-1398.47	-1453.89	1.28715	28.0696	1.10121
900	4.85966	-1004.42	-1091.29	1.7041	28.1551	1.14742
1100	5.16411	-701.943	-818.675	1.43207	28.0181	1.18605
1300	5.40897	-408.561	-554.503	1.46715	28.015	1.21837
1500	5.63026	-98.667	-274.018	0	28.0304	1.24355
1700	6.19055	800.53	572.822	1.55988	28.049	1.26386
1900	6.52949	1402.58	1130.3	1.53444	28.037	1.27762
2100	6.68637	1716.1	1409.48	1.59609	28.0749	1.28859
2300	6.85231	2081.93	1738.94	2.32702	28.161	1.31578
2500	7.18254	2877.86	2479.37	2.79016	28.4868	1.45347
2700	7.4615	3604.48	3152.71	4.54308	29.269	1.50295
2900	7.67097	4187	3688.32	2.18372	29.5018	1.53879
3100	7.81788	4627.68	4087.09	2.3405	29.5847	1.61597
3300	7.99715	5202.58	4616.29	3.74655	29.6971	1.85524

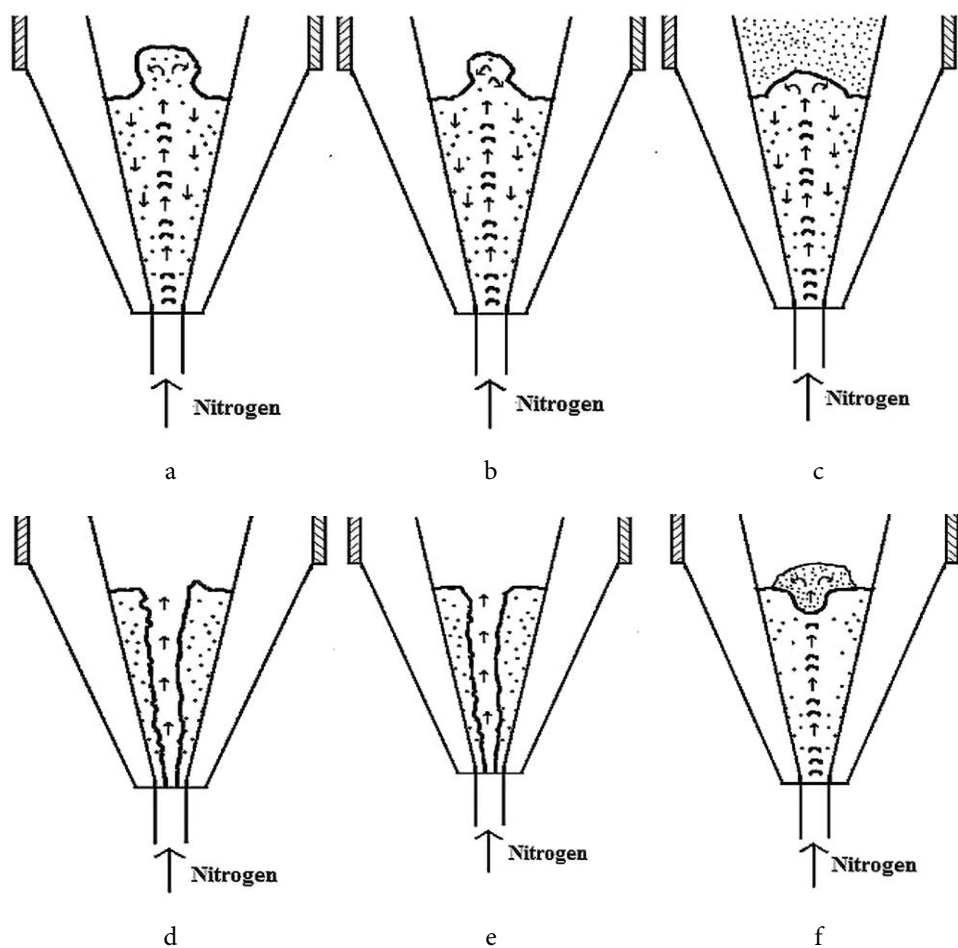


Fig. 3. Character of natural graphite particles fluidization in the “cold” mode of operation of the ETFB installation: a — No. 6, b — No. 5, c — No. 4, d — No. 3, e — No. 2, f — No. 1

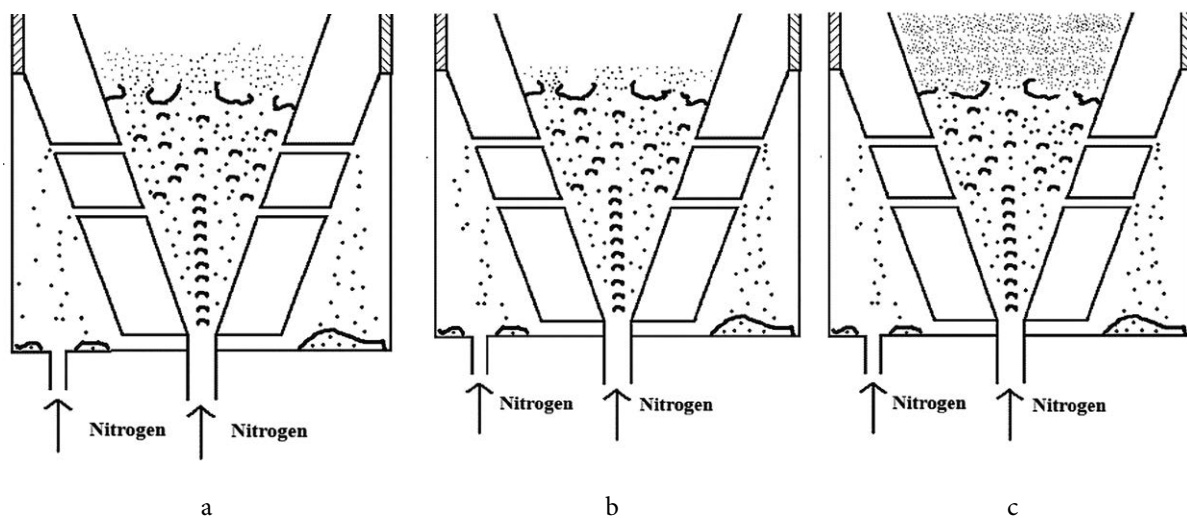


Fig. 4. The nature of natural graphite particles fluidization in a cold model of the working area of a laboratory installation with ETFB with additional holes for nitrogen supply: a — sample No. 5, b — sample No. 6, c — sample No. 4

decided to temporarily abandon the additional holes in the peripheral electrode of the ETFB laboratory installation.

Laboratory installation for researching the process of the natural graphite high-temperature purification

The laboratory installation with ETFB is designed to determine the principle possibility of enriching natural powdered graphite to a carbon content of 99.9% mass. using its high-temperature (over 2273 K) treatment in an inert atmosphere. The choice of a gas distribution device in the form of a cone is due to the creation of conditions for the continuity of the process (unloading/loading the reaction zone of the reactor without cooling the installation). The scheme of the reactor is presented in Fig. 5.

The reactor works as follows: through the fittings 1 and 2, through the pipe 3, nitrogen is supplied to the reaction zone 4 in stationary and pulsating mode, respectively. Nitrogen exits into the atmosphere through pipe 5 and cyclone cleaner 6. Through the hole for monitoring the process 7, the starting material is loaded into the reaction zone 4 and a current is supplied to the electrode

8. The lower 9 and upper 10 covers are cooled with water. The height of the electrode is regulated by a worm-type mechanism 11. The temperature is measured by a pyrometer through the hole 12 and a thermocouple 13. After the process, the material is unloaded into the bunker 14. The outer layer of thermal insulation 15 is made of heat-resistant wool MKRR-130, the inner layer 16 is made of technical carbon. The outer cylindrical case is made of stainless steel X18H10T.

The basic technological scheme is shown in Fig. 6.

The appearance of the installation is shown in Fig. 7.

The installation works as follows: cooling water is supplied to the reactor 1 by opening the ball valve 2, nitrogen is supplied to the gas distribution comb 4 by opening the shut-off valve on the cylinder 3, then nitrogen is supplied in stationary mode by opening the valve 5 through the rotameter 6. By opening the valve 7 through the rotameter 8, the receiver 9 and the pulsator 10 supply nitrogen in a pulsating mode. Nitrogen, after passing through reactor 1, enters the purifier 11 and the hood 12. Material is loaded through the observation window 13. By turning on the switch 14, current is supplied to the reactor 1 through the transformer 15 and the electrode 16.

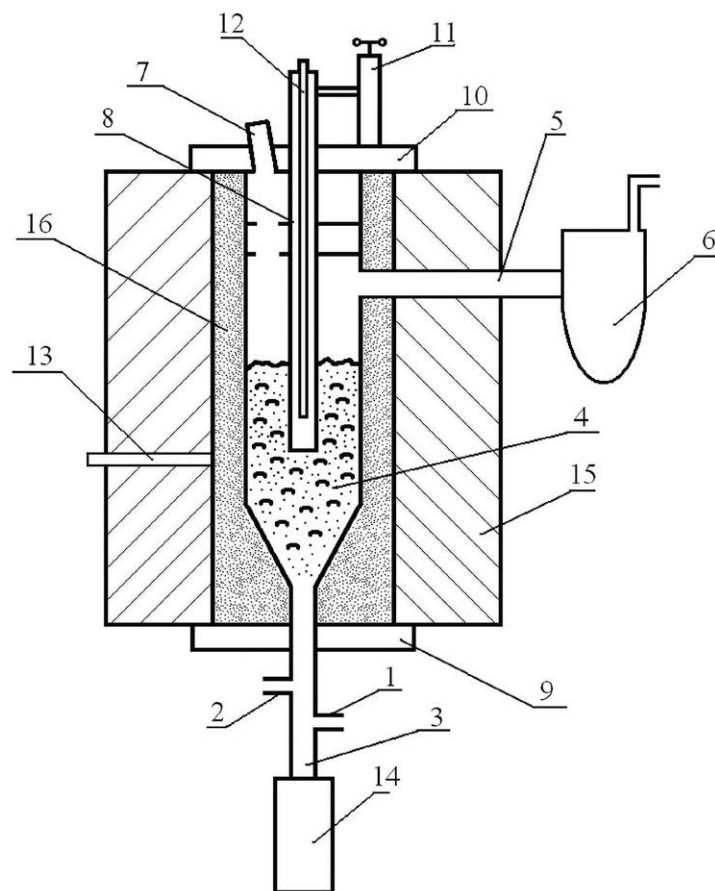


Fig. 5. Scheme of the reactor of the laboratory installation for researching the process of natural graphite purification:

- 1 — fitting for nitrogen supply in stationary mode,
- 2 — fitting for nitrogen supply in pulsating mode,
- 3 — pipe for nitrogen supply, 4 — reaction zone (FB),
- 5 — pipe for nitrogen removal, 6 — cyclone cleaner,
- 7 — hole for tracking the process/material loading,
- 8 — electrode, 9 — lower water cooling cover,
- 10 — upper water cooling cover, 11 — mechanism for adjusting the height of the electrode, 12 — hole for tracking radiation for the pyrometer,
- 13 — thermocouple, 14 — bunker for cooling the finished product, 15 — external thermal insulation,
- 16 — internal thermal insulation

Table 6. The value of the operating parameters of the laboratory installation for the research of the process of natural graphite high-temperature purification

Parameter	Unit of measurement	A measurement value or range
The volume of the reaction zone	m ³	0.0015
Type of gas distribution device		cone
The type of electric current between the electrodes		Removable
Amperage	A	0...400
High-voltage	B	20...60
Material processing temperature	°C	1500...3000
Duration of material processing	h	0.5...1.5

After the process, the material is unloaded through the unloading and cooling system 17.

Table 6 shows the ranges of changes in the operating parameters of the laboratory installation for the research of high-temperature purification of natural graphite.

Pyrometers Promyn (Ukraine) and FLUS IR-866 U (China) will be used to measure the temperature.

Basic principles of experimental research

The results of preliminary thermodynamic calculations show that some of the impurities pass into the gas phase according to their evaporation temperature. Another part of the impurities, namely among themselves, forms compounds that also pass into the gas phase (for example, Fe₃C at temperatures above 1923 decomposes into Fe and carbon) and are carried to the purifier with inert gas. The calculated range of temperatures at which graphite reaches a high degree of purity is 2573...2873 K. Part of the graphite can interact with oxygen, which is formed from oxide impurities and be carried into the purifier in the form of CO. Estimated losses of graphite from oxidation to CO will be 7...10% mass.

Conclusions

1. Part of the substances (Si; SiC₂; SiS; Al; Fe; Mg; Ca; SiO) that should be formed during the process of high-temperature purification of graphite at temperatures above 2800 K are in a gaseous state. Therefore, to carry out this process, the reaction temperature must be above 2800 K.

2. On the basis of thermodynamic calculations of the main thermochemical reactions, a laboratory installation for researching the process of high-temperature graphite purification was developed and cold hydrodynamic tests were created.

References

1. Toniolo B. (2016). *European Carbon and Graphite Association ECGA. Annual Report 2014–2015*. Bruxelles, Belgium: ECGA, 19 p. Available at: http://www.ecga.net/sites/default/files/pdf/ecga_ar_2014–15_draft-final.pdf.
2. Jewell S., Kimball S. M. (2017). *Mineral commodity summaries 2017*. U. S. Geological Survey, Reston, U.S., 202 p., doi.org/10.3133/70180197.
3. Olson D. W. (2014). *Graphite. U. S. Geological Survey Minerals Yearbook — 2014 Graphite [Advance release]*. U. S. Department of the Interior, U. S. Geological Survey, 15 p.
4. Keeling J. (2017). Graphite: properties, uses and South Australian resources. *MESA Journal*, vol. 84 (3), pp. 28–41.
5. Siow K. S. (2017). Graphite Exfoliation to Commercialize Graphene Technology. *Sains Malaysiana*, vol. 46 (7), pp. 1047–1059. doi.org/10.17576/jsm-2017–4607–06.
6. Kalyoncu R. S. (2000). *Graphite. U. S. Geological Survey Minerals Yearbook*. Reston, US: U. S. Geological Survey, pp. 76–77.
7. Crossley P. (2000). Graphite: high-tech supply sharpens up. *Industrial Minerals*, vol. 398, pp. 31–47.
8. Vasilenko I. Ya., Osipov V. A., Rublevskij V. P. (1992). *Radioaktivnyj uglerod [Radioactive carbon]*. *Priroda*, no. 12, pp. 59–65. (in Rus.)
9. Vlasova K. P. (1964). *Grafit kak vysokotemperaturnyj material [Graphite as a high temperature material]*. Collection of articles. Moscow: Mir, 420 p. (in Rus.)
10. Zhmurikov Ye. I., Bubnenkov I. A., Dremov V. V., Samarin S. I., Pokrovskiy A. S., Kharkov D. V. (2013). *Grafit v nauke i yadernoj tekhnike [Graphite in science and nuclear engineering]*. Novosibirsk, 193 p. (in Rus.)
11. Dollezhal N. A., Yemelyanov I. Ya. (1980). *Kanalnyj yadernyj energeticheskij reaktor [Channel nuclear power reactor]*, Moscow: Atomizdat, 208 p. (in Rus.)
12. Komir A. I., Odeychuk N. P., Nikolaenko A. A., Tkachenko V. I., Derevyanko V. A., Krivchenko O. V., She-

- pelev A. G. (2016). [Graphite as a Structural Material for Generation IV Nuclear Energy Systems]. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tehniki* [Issues of Atomic Science and Technology], vol. 1 (101), pp. 51–55. (in Rus.)
13. Barsukov V. Z., Khomenko V. G., Senik I. V., Chernyy O. Sh. (2013). [Lithium batteries for transport applications: modern problems and prospects]. *Voprosy Khimii i Khimicheskoy Tekhnologii* [Issues of Chemistry and Chemical technology], no. 4, pp. 127–131. (in Rus.)
 14. Moradi B., Botte G. G. (2016). Recycling of graphite anodes for the next generation of lithium ion batteries. *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 46 (2), pp. 123–148. doi.org/10.1007/s10800-015-0914-0.
 15. Li J., Henry F., Feng Y. (2017). How to develop best carbon/graphite products for lead-carbon battery applications (Superior Graphite). Poster session presented at the 10th International conference on lead-acid batteries LABAT'2017, (Golden Sands, Bulgaria 13–16 June 2017), p. 23.
 16. Elementenergy. *Cost and performance of EV batteries* (Final report for The Committee on Climate Change). Retrieved from Elementenergy, 2012, 91 p.
 17. Simeiko K. V., Kuprianchuk S. V., Syniahovskyi A. O. (2023). Technologies and Promising Developments of Graphite Production (Overview). *Nuclear Power and the Environment*, vol. 4 (26), pp. 9–23. doi.org/10.31717/2311-8253.23.1.2. (in Ukr.)

**Сімейко К. В.^{1,2}, Кожан О. П.², Сидоренко М. А.¹,
Рябчук В. С.², Лобач К. В.³, Скоблик О. М.¹,
Гавриленко В. С.¹, Сабенін П. А.¹**

¹Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,
вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

²Інститут газу НАН України, вул. Дегтярівська, 39, Київ,
03113, Україна

³Національний науковий центр “Харківський
фізико-технічний інститут”, вул. Академічна, 1, Харків,
61108, Україна

Термодинамічні розрахунки та гідродинамічні дослідження процесу високотемпературного очищення графіту в електротермічному псевдозрідженому шарі

Загальне збільшення споживання електроенергії та розвиток ядерної енергетики, в тому числі ядерних

реакторів нового покоління, де застосовуються матеріали на основі графіту, безумовно веде до зростання необхідності його виготовлення. Тому розробки та вдосконалення технологій виробництва графіту високої чистоти (у тому числі ядерної), а саме розуміння термодинамічних та гідродинамічних процесів очищення графіту, мають велике практичне значення.

У роботі проведено термодинамічні розрахунки основних хімічних реакцій процесу високотемпературного очищення графіту. Для проведення термодинамічних розрахунків був взятий зразок природного графіту з чистотою до 94,33 %мас. зі складом домішок: SiO₂ — 3,05 %мас.; Al₂O₃ — 1,05 %мас.; Fe₂O₃ — 1,01 %мас.; CaO — 0,2 %мас.; MgO — 0,31 %мас.; S — 0,048 %мас. Термодинамічні параметри процесу визначалися термодинамічним методом (програма TERRA). Під час проведення розрахунку було взято 0,9433 моль С, 0,0305 моль SiO₂, 0,0105 моль Al₂O₃, 0,0101 моль Fe₂O₃, 0,0002 моль CaO, 0,0031 моль MgO, 0,00048 моль S та 1 моль N₂, діапазон температур: 300...3278 К, тиск 0,1 МПа. З отриманих результатів видно, що за температури вище 1600 К частина вихідного вуглецю окислюється до CO, а азот фактично не впливає на проходження процесів. А також враховуючи, що частина речовин CO; Si; SiC₂; SiS; Al; Fe; Mg; Ca; SiO за температур 2800...3200 К перебувають у газовому стані та виносяться в очисник, з чого можна зробити висновок, що для проведення цього процесу температура реакції має бути вище 2800 К.

Вивчення гідродинамічних особливостей графіту у псевдозрідженому шарі проводилось на створеній модельній установці з псевдозрідженим шаром. Робоча зона апарату виконана у вигляді графітового конуса з кутом розкриття 25°, що забезпечувало створення «фонтануючого шару». Крім того, частина зріджуючого агента (азоту) подавалася в пульсуючому режимі. Для проведення досліджень було обрано 6 зразків графіту з різними фізичними властивостями і хімічним складом, об'єм засипки 0,5 л.

На основі термодинамічних розрахунків основних термодинамічних реакцій розроблено та холдних гідродинамічних випробувань створено лабораторну установку для дослідження процесу високотемпературного очищення графіту.

Ключові слова: графіт ядерної чистоти, електротермічний псевдозріджений шар, високотемпературна очистка, термодинаміка, гідродинаміка.

Надійшла 08.08.2024

Received 08.08.2024

О. Г. Тищенко¹, П. В. Піовар², Н. М. Цидик¹

¹ Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

² Поліський національний університет, бульв. Старий, 7, Житомир, 10008, Україна

Оцінка впливу наслідків природних пожеж на лісові екосистеми за даними космічного знімання і таксаційного обстеження лісових насаджень

Ключові слова:

структура рослинності,
лісові пожежі,
дистанційне зондування Землі,
геоінформаційні технології,
NDVI,
NBR,
deltaNBR

Представлено структурні особливості рослинних угруповань у зоні забруднення радіонуклідами, які зазнали впливу масштабних лісових пожеж. З використанням даних космічного знімання Sentinel 2, а також даних лісовпорядкування визначено категорії та класи рослинності. Наведено приклади тематичних карт, що показують ступінь впливу пожеж на хвойні, листяні, мішані лісові екосистеми та ділянки з мозаїчним рослинним покривом. На територіях, що постраждали від пожежі, рослинність була поділена за ступенем пошкодження лісу на такі категорії: сильно вигорілий ліс (згарище), вигорілий з невеликими ділянками вегетуючих дерев (рідколісся), пожежа в підстилці (низові пожежі в лісі) — сильна пожежа, середня пожежа, слабка пожежа. Розглянуто статистичні показники NDVI, NBR та deltaNBR для визначених категорій пожеж у рослинних угрупованнях.

Вступ

Важливим етапом у створенні інформаційної основи в оцінці наслідків пожежі на лісові екосистеми був збір та накопичення первинних даних космічного знімання і наземних обстежень деревної рослинності на ділянках, пройдених пожежею в зоні відчуження та території природного заповідника «Древлянський», що розташовані на забрудненій радіонуклідами території. Наступним завданням було відпрацювання технології геоінформаційного аналізу з використанням комплексу даних дистанційного зондування, а також даних про структуру лісових екосистем та характерні для них лісорослинні умови. Такі інформаційні матеріали дали змогу провести класифікацію даних та картографувати наслідки лісових пожеж, що відбувалися у визначені для дослідження періоди, починаючи з 2015 р. Створені

тематичні карти використовувалися як картографічні моделі, що відображають структуру, стан та зміну природних екосистем під дією несприятливих зовнішніх факторів. Вивчення ушкоджених ділянок лісу та оцінка впливу лісових пожеж на рослинність за територією дослідження було проведено з використанням даних космічного знімання супутника Sentinel 2. Підготовку картографічних даних — створення контрастних кольорових синтезованих зображень за комбінацією спектральних діапазонів супутника; розрахунок вегетаційних індексів; систематизацію вхідної інформації, а також формування похідних інформаційних шарів та їхній аналіз — проведено з використанням пакета ArcGIS та інших картографічних програмних додатків.

У рамках укладеної в червні 2023 р. угоди про співробітництво між Інститутом проблем безпеки атомних електростанцій НАН України та Поліським національним університетом, яка передбачала вза-

ємний обмін даними спостережень і результатами наукових досліджень у сфері впливу лісових пожеж та інших факторів на стан забруднених радіонуклідами екосистем Українського Полісся, отримано дані супутника Sentinel 2 за 2015–2017 рр. Ця інформація, а також та, що доступна через Sentinel Hub за проектом Copernicus, організованим за ініціативи Європейського агентства, дала змогу аналізувати стан та виявляти зміни рослинного покриву під впливом негативних явищ у навколишньому середовищі.

Характеристика вхідних даних космічного знімання

Дані супутникових каналів різних спектральних діапазонів являють собою чорно-біле растрове зображення у форматі geo-tiff, яке було використано з метою створити комбінацію каналів і, таким чином, отримати контрастне кольорове зображення, а також провести розрахунок вегетаційних індексів. Отримані після обробки даних картографічні шари містять ознаки для ідентифікації структури, стану та змін на підстильній поверхні Землі. Точність карти структури та стану рослинності визначається просторовим розрізненням вхідних даних дистанційного зондування. На цей час оптимальним джерелом інформації за доступністю та просторовим розрізненням є дані супутника Sentinel 2, запущеного на орбіту з 2015 р. Він має 13 каналів у спек-

трах видимого та інфрачервоного діапазонів електромагнітного випромінювання, що надходить від поверхні Землі. Характеристики каналів супутника наведено в табл. 1. Інформаційні продукти супутника — це шари даних, геоприв'язані та сформовані в географічній проекції UTM/WGS84 projection. Практичний досвід застосування даних космічного знімання показав, що аналіз рослинного покриву найбільш ефективно проводити з використанням червоного (RED), ближнього інфрачервоного (NIR) або видимого і ближнього інфрачервоного (VNIR) та короткого інфрачервоного (SWIR) діапазонів супутника Sentinel 2 [1, 2, 3].

За даними радіометричних вимірювань NASA був складений перелік пожеж, унаслідок яких ушкоджено великі за площею ділянки лісу в період 2015–2022 рр. [4] для радіаційно забрудненої території зони відчуження та природного заповідника «Древлянський», розташованого в зоні безумовного відселення. У результаті були сформовані набори вхідних даних інформаційних продуктів супутника Sentinel 2, придатних для визначення контурів осередків пожеж і ушкодженого внаслідок впливу вогню рослинного покриву, також були зібрані дані, що характеризують рослинність до моменту пожежі.

Інформаційні продукти супутника Sentinel 2 розбиті на частини площею 100 км² і мають спеціальні позначення сцен — Tile. Чотири сцени супутникових даних забезпечують необхідну інформацію по

Таблиця 1. Параметри каналів у інформаційних продуктах супутника Sentinel 2

Номер каналу	Назва каналу	Центральна лінія спектрального діапазону, нм	Просторове розрізнення, м
B02	BLUE	490	10
B03	GREEN	560	10
B04	RED	665	10
B08	Near-infrared (NIR)	842	10
B05	Visible and Near Infrared (VNIR) Red edge	705	20
B06	Visible and Near Infrared (VNIR) (NIR)	740	20
B07	Visible and Near Infrared (VNIR)	783	20
B08A	Visible and Near Infrared (VNIR))	865	20
B11	short-wave infrared (SWIR)	1610	20
B12	short-wave infrared (SWIR)	2190	20
B01	Ultra Blue (Coastal and Aerosol)	443	60
B09	Short Wave Infrared (SWIR)	945	60
B10	Short Wave Infrared (SWIR)	1375	60

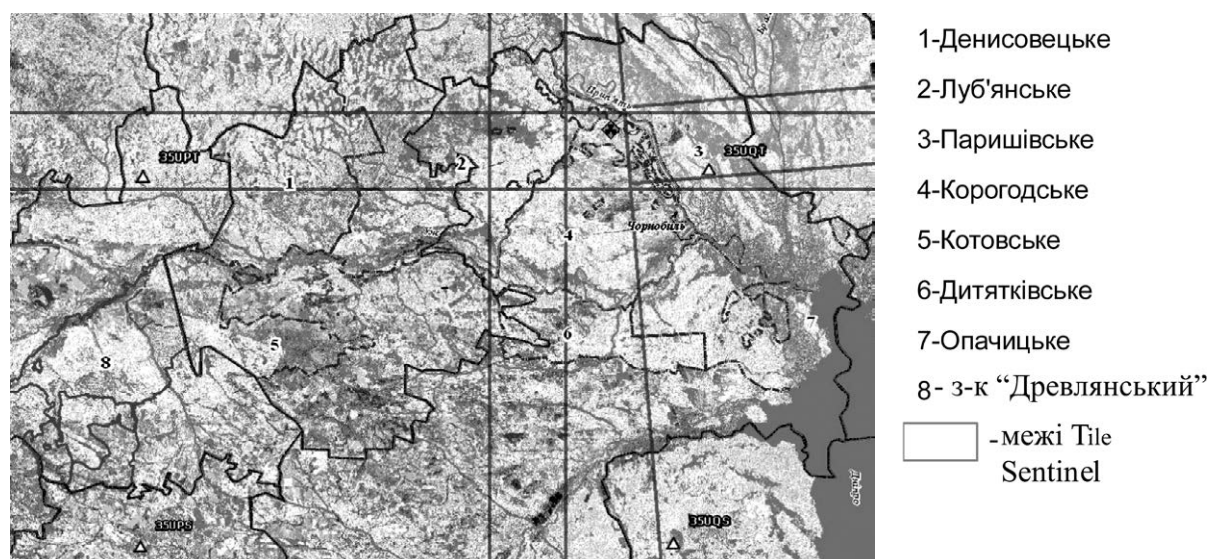


Рис. 1. Територія дослідження впливу пожеж на рослинність у зоні радіоактивного забруднення на мультиспектральному знімку Sentinel 2:
35UPT; 35UQT; 35UPS; 35UQS — позначення сцен даних космічного знімання

лісництвах зони відчуження та територію заповідника «Древлянський». На рис. 1 показано позначення відповідних сцен супутникових даних для території дослідження.

З метою аналізу пожеж та їхнього впливу на рослинний покрив за період 2015–2016 рр. були сформовані набори вхідних растрових та похідних від них інформаційних матеріалів у геопросторових базах даних формату *.gdb (рис. 2). Такий формат даних необхідний для проведення геопросторового аналізу за допомогою інструментарію ArcGIS.

На рис. 3 наведено проект складу бази даних у форматі *.gdb, яку необхідно наповнювати інформацією для проведення оцінки стану лісових екосистем, визначення запасів фітокомпонентів у лісових екосистемах та потенціалу відновлення деревостанів після ушкодження від пожежі.

Геоінформаційні методи для аналізу стану рослинного покриву та його динаміки на досліджуваній території

Підготовка та систематизація інформації про стан лісових екосистем та їхньої трансформації після пожежі проводилися з використанням методів геоінформаційного аналізу за підготовленим алгоритмом, що передбачав підготовку й аналіз растрових даних космічного знімання з подальшою конвертацією у формат дискретних цифрових даних, а також створення векторних картографічних шарів [6]. Метою

дослідження було визначення зміни у структурі рослинного покриву, виявлення осередків ушкодженої рослинності різного ступеня, а також ділянок із неушкодженими здоровими рослинами. Осередки вегетуючих деревостанів створюють сприятливі умови для відновлення лісових екосистем після ушкодження.

Алгоритм використання даних космічного знімання супутника Sentinel 2 з урахуванням часових термінів проходження пожеж має такі кроки:

1. Підготовка діапазонів спектральних даних супутника: растрового зображення комбінації каналів з метою визначення структури рослинного покриву до та після ушкодження. Технологія створення контрастного зображення комбінації каналів 11+08+04 передбачала використання інструментів пакета ArcGIS — Raster/Raster Processing/composite Bands.
2. Підготовка діапазонів спектральних даних супутника: розрахунок показників NDVI, NBR та deltaNBR із використанням каналів NIR, SWIR, RED у растровому форматі.
3. Визначення зони інтересу (AOI) за знімком комбінації каналів у векторному форматі *.shp.
4. Створення картографічного векторного шару рослинного покриву до факту пожежі.
5. Перетин растрового зображення розподілу показників вегетаційних індексів NDVI, NBR та deltaNBR за певну дату, шейп-файлів (*.shp) зони інтересу та шару рослинності.
6. Конвертація даних NDVI та deltaNBR з растрового формату у векторний точковий формат.

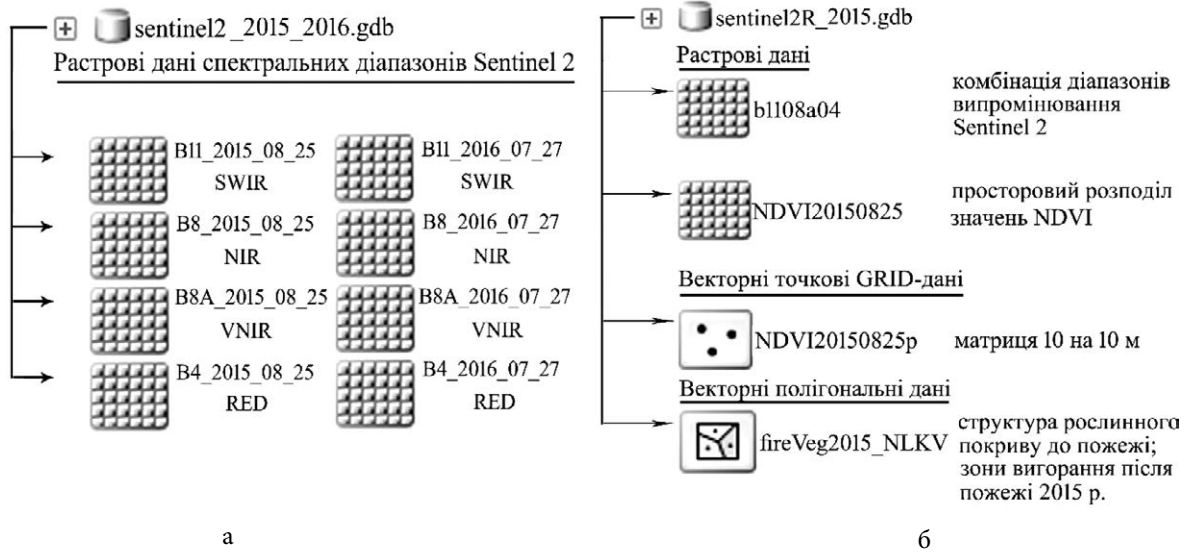


Рис. 2. Структура бази даних вхідної інформації супутника Sentinel 2 та похідних інформаційних матеріалів: а — первинні растрові дані; б — похідні інформаційні набори даних



Рис. 3. Набори інформаційних матеріалів для аналізу стану та трансформації лісових екосистем

7. Вибірка значень для NDVI, що характеризують зниження вмісту хлорофілу в рослинних клітинах і, як наслідок, падіння вегетативної активності рослин, або значення NBR і deltaNBR, що є параметрами низького вмісту вологи в рослинності та його зміни в часі.

8. Формування бази даних похідних растрових та векторних даних для території дослідження.

9. Створення тематичних карт.

У результаті комбінування різних спектральних діапазонів каналів супутника Sentinel 2, зокрема 4, 8, 11 або 12, отримано контрастне зображення, де

осередки вигорання мали темний тон і контрастували із зеленим кольором здорової рослинності. Комбінація каналів створена інструментом Raster Processing/Composit Bands у наборі інструментів Data Management Tools пакета ArcGIS. Для визначення змін рослинного покриву під впливом небезпечних для навколишнього середовища факторів використовувався підхід, що передбачав спільний аналіз мультиспектральних космічних знімків та вегетаційних індексів, розрахованих для досліджуваних екосистем. Показники для диференціації рослинного покриву містилися на зображенні комбінації каналів супутникових даних. Дані були проаналізовані в різні вегетаційні періоди з урахуванням гам кольорів та текстури на знімку. Комбінація діапазонів RED + NIR + SWIR з урахуванням вегетаційного періоду та оцінки особливостей розташування в ландшафті дала можливість визначити в лісовому покриві: хвойний, листяний та мішаний деревостани, а також ділянки з трав'янистою або трав'янисто-чагарниковою рослинністю.

На спектральному зображенні ділянки з накопиченою після вигорання фітокомпонентів золою відображалися в темних відтінках фіолетового та темно-коричневого кольорів. Частково ушкодженим деревостанам властивий тьмянний тон. Здоровій рослинності відповідали яскраві відтінки від світло- до темно-зеленого кольору. Зів'яла трав'яниста рослинність відображалася в жовтій та помаранчевій гамі, поверхня з дуже рідким рослинним покривом мала світло-ліловий колір.

Оброблені супутникові дані стали основою для створення векторних шарів структури рослинного покриву та його змін. Технологія геоінформаційного аналізу передбачала низку оверлейних операцій, які виконувалися в середовищі картографічних програмних пакетів: ArcGIS та MapInfo. Картографічні шари рослинності перетиналися з іншими інформа-

ційними шарами, приєднуючи, таким чином, необхідні дані для проведення оцінки. Характеристика інформаційних матеріалів за даними дистанційного зондування, що використовувалися для аналізу структури рослинності, наведена в табл. 3.

Розрахунок вегетаційних індексів

Крім мультиспектральних знімків для аналізу стану рослинного покриву після лісових пожеж були розраховані показники NDVI, NBR та deltaNBR. Вегетаційні показники отримані засобами розширеного геопросторового аналізу (Spatial Analyst Tools) інструментом Map Algebra/Raster Calculator. Для розрахунку вегетаційних індексів використовували математичну комбінацію декількох спектральних діапазонів даних космічного знімання, що визначала різницю між здоровою рослинністю з високою відбивальною властивістю та ділянками, де вегетаційна активність була слабкою, тобто з ураженою рослинністю з нещільним покривом або мінеральними поверхнями. Використання вегетаційних індексів разом з даними наземних обстежень по лісництвах [5] дало змогу дослідити видовий склад, розподіл продуктивності та густоти рослинного покриву. Нормалізований вегетаційний індекс NDVI [1, 2] був розрахований за допомогою математичного виразу

$$NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red), \quad (1)$$

де NIR — ближній інфрачервоний діапазон; Red — видимий червоний діапазон.

Класичний показник NDVI застосовувався для визначення виду і стану рослинності і мав діапазон змін від -1 до 1. Від'ємні значення дають водні та мінеральні поверхні, будівлі, хмари, сніг. Відкритий ґрунт із дуже зрідженою рослинністю відповідали значенням індексу 0,1–0,2. Рослинність має завжди

Таблиця 3. Інформаційні матеріали за даними дистанційного зондування для аналізу структури рослинності

Растрові шари	Канали	Показники	Використання в аналізі
Комбінація каналів	11; 08; 08a; 04 (SWIR; NIR; RED)	Колір та текстура	Структура та вид рослинності
Просторовий розподіл NDVI	NIR; RED	від -1 до 1	Вегетативна активність, стан та продуктивність рослин
Просторовий розподіл NBR; deltaNBR	SWIR; NIR	1) від -1 до 1; 2) від < = -800 до > 660	Вміст та зміни вологи у вегетативній масі рослин

Таблиця 4. Статистичні параметри показника NDVI за категоріями пожежі з різним ступенем впливу на рослинність у 2015 р.

Категорія пожежі	Розподіл площі ушкодження рослинних екосистем за показником NDVI, %			NDVI середнє
	до 0,2	від 0,2 до 0,3	більше 0,3	
Згарище: сильна пожежа	58,7	33,09	8,2	0,19
Сильна низова пожежа	13,4	31,42	55,2	0,32
Низова пожежа	3,1	15,11	81,8	0,40
Слабка низова пожежа	0,6	2,80	96,6	0,52
Низова + трав'яна пожежі	32,1	35,92	32,0	0,26
Трав'яна + низова пожежі	21,1	30,22	48,7	0,29
Трав'яна пожежа	7,5	19,77	72,7	0,36
Ліс листяний: неушкоджений	0,6	0,86	98,5	0,62
Ліс хвойний: неушкоджений	0,0	0,00	100,0	0,57

плюсові значення від 0,2 до 1. Показник здорової щільної рослинності має величину від 0,66 до 1; для нещільної рослинності цифра змінювалася від 0,2 до 0,5. Відмерлі рослини мали значення від –1 до 0, слабкі від 0,2 до 0,33. Слабо ураженим рослинам відповідали значення від 0,33 до 0,66.

На прикладі даних щодо пожежі 2015 р. відпрацьовувалася технологія оцінки впливу вогню пожежі на лісові екосистеми з використанням вегетаційних індексів. Один з етапів включав визначення просторового розподілу значень NDVI по лісових екосистемах на досліджуваній території, що представлені в растровому форматі. Такі дані були конвертовані у формат дискретних даних і через Query-запити до підготовлених інформаційних шарів отримано їхні статистичні характеристики. Перший шар містив значення NDVI, категорію ураженої пожежею екосистеми, її площу та кількість точок із значенням NDVI у матриці точкових значень з кроком 10 × 10 м. Другий визначав зведені статистичні характеристики категорій з різним ступенем впливу пожежі на лісові екосистеми: від неушкоджених ділянок до згарищ, що утворилися внаслідок верхових та сильних низових пожеж у лісі. Для статистичного аналізу визначено категорії пожежі, що мають різний ступінь впливу на рослинність. Загибель або сильне ушкодження дерев відбувається після проходження верхової та сильної низової пожеж у лісі. Цей найбільший ступінь ушкодження визначений категоріями: згарище та згарище з незначними за площею залишками живої деревної рослинності. За низової пожежі в лісі вигорають трав'янисті біоцено-

зи, низькорослі дерева та чагарникова рослинність, крона високих дерев не ушкоджується. Після впливу низової пожежі середнього та слабого ступеня екосистема лісу має потенціал до відновлення вегетації. За наслідками низові лісові пожежі розбиті на категорії: сильна низова; низова (середній ступінь ушкодження); слабка низова. Вигорання на ділянках із мозаїчним рослинним покривом виділено в категорії: низова + трав'яна пожежі — з переважанням деревної рослинності; трав'яна + низова пожежі — з переважанням трав'янистої рослинності, окремо визначена трав'яна пожежа. Найбільша кількість низьких значень (до 0,2) показника NDVI припадає на категорії згарище та згарище з окремими невеликими ділянками деревостанів, що свідчить про високий відсоток загибелі дерев у лісових екосистемах. У табл. 4 наведено діапазони зміни значень NDVI в екосистемах з різним навантаженням від вогню пожежі.

Ще одним параметром для визначення ступеня пірогенного впливу на рослинність є показники NBR та deltaNBR. Нормалізований індекс випалювання (NBR) розраховується як різниця спектральної яскравості діапазонів короткого інфрачервоного (SWIR) та ближнього інфрачервоного випромінювання (NIR) [3, 6]. Індекс NBR є нормованою різницею значень спектральних діапазонів супутника, що визначає небезпеку зменшення в клітинах рослин вмісту вологи, і як наслідок є дуже чутливим до впливу вогню на рослинність. Індекс визначають за формулою

$$NBR = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR). \quad (2)$$

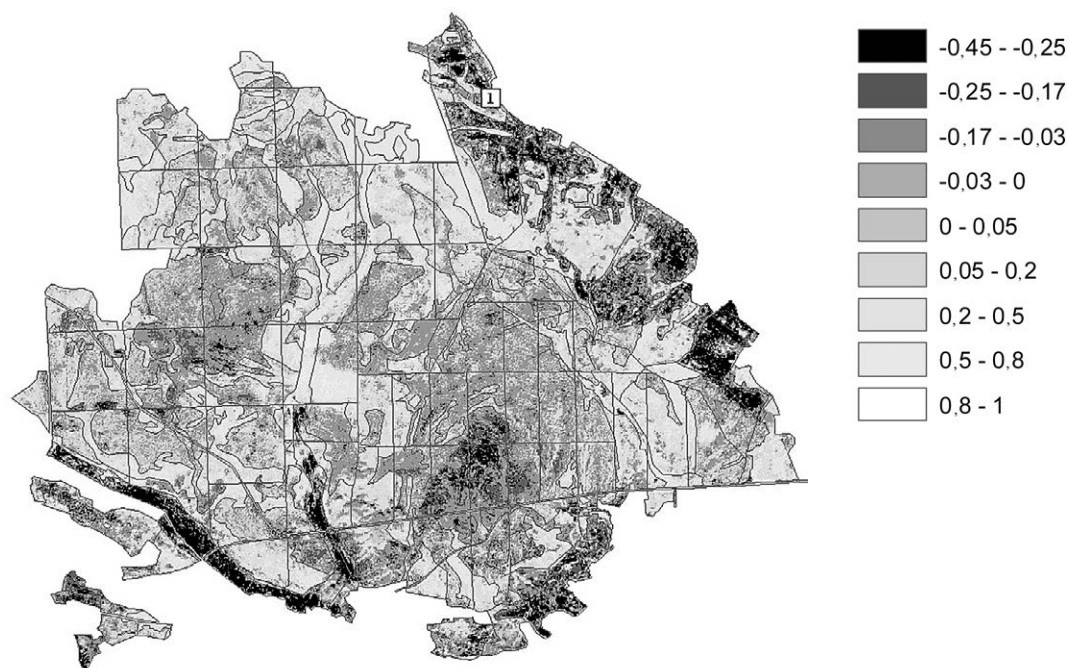


Рис. 4. Оцінка ушкодження екосистем після пожежі в серпні 2015 р. по Денисовецькому лісництву за класами показника NBR

Значення за шкалою NBR змінюються від -1 до 1 . Рослинності за активної вегетації властивий високий рівень віддзеркалення в ближньому інфрачервоному діапазоні спектра, вигорілі ділянки добре віддзеркалюють у короткохвильовому спектрі.

На рис. 4 показано результат аналізу супутникових даних з оцінкою пожежі у 2015 р. по Денисовецькому лісництву за показником NBR. Від'ємні значення NBR вказують на велику втрату вологи в клітинах рослин [3, 6]. Ділянки з низьким NBR корелюють із категорією

згарища за показником NDVI. Аналіз розподілу значень NBR за категоріями пожеж показав, що найбільш сухий рослинний покрив спостерігався на ділянках, де трав'яниста рослинність чергується з поодинокими деревами та на згарищах. Більше половини площі об'єктів у таких категоріях мали значення NBR до $-0,03$. Неушкоджені ділянки лісу, що розташовані поблизу зони вигорання, мали значення NBR від $0,2$ до $0,5$ (табл. 5).

На рис. 4 представлено приклад класифікації території після пожежі за показником NBR. Зміну

Таблиця 5. Статистичні параметри показника NBR за категоріями пожежі з різним ступенем впливу на рослинність у 2015 р.

Категорія пожежі	Площа екосистеми за класами NBR, %							
	до $-0,25$	$-0,25$ до $-0,17$	$-0,17$ до $-0,03$	$-0,03$ до 0	0 до $0,05$	$0,05$ до $0,2$	$0,2$ до $0,5$	$0,5$ до 1
Згарище: сильна пожежа	7,6	16,4	39,9	11,1	14,9	8,1	1,7	0,232
Сильна низова пожежа	4,1	5,9	23,6	8,4	15,7	34,3	7,9	0,031
Низова пожежа	0,2	1,2	12,5	6,0	12,9	46,6	20,7	0,013
Слабка низова пожежа	0,1	0,5	6,3	3,3	7,3	34,2	48,1	0,176
Низова + трав'яна пожежі	12,2	19,0	44,0	7,4	8,2	11,1	1,5	0,032
Трав'яна + низова пожежі	15,2	21,8	44,0	5,9	5,9	6,2	1,0	0,000
Трав'яна пожежа	5,7	13,7	57,8	7,5	7,7	6,8	0,8	0,000
Ліс листяний: неушкоджений	0,0	0,5	3,9	2,1	4,7	26,1	62,7	0,000
Ліс хвойний: неушкоджений	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	97,7	0,000

вмісту вологи в рослинах на поверхні Землі до та після ушкодження виявляє масштабований коефіцієнт випалювання ΔNBR , отриманий як різниця стану рослинності до пожежі NBR_1 та після пожежі NBR_2 . Він розраховується за даними двох послідовних часових термінів з використанням формули

$$\Delta NBR = NBR_1 - NBR_2. \quad (3)$$

Розподіл показника ΔNBR показано на прикладі аналізу пожежі в заповіднику «Древлянський». За показником ΔNBR проведено оцінку зміни стану вологості рослинності в Мотіїківському відділенні заповідника після пожежі 2020 р. Рослинний покрив території заповідника розділений на 4 категорії: ліс неушкоджений; частково вигорілий ліс (рідколісся); сильно вигорілий ліс (згарище); луки. Значення показника менш ніж -100 свідчить про зростання вмісту вологи, тобто відповідає ділянкам відновлення процесу вегетації. Критичними для стану вегетації є значення вище 440 . На таких ділянках рослинність має помірно-високе та високе зниження вмісту вологи. За визначеними категоріями рослинного покриву отримано розподіл показника ΔNBR та проведено статистичний аналіз даних. Більшість площі об'єктів, де зберігся здоровий деревостан, припадає на значення ΔNBR від -100 до 100 , що свідчить про незначні зміни вмісту вологи в рослинах, тобто екосистема зберегла стійкий стан.

На рис. 5 наведено розподіл площі екосистем із різним ступенем ушкодження за класами зміни вмісту вологи в рослинах (ΔNBR) після пожежі.

Перевірка факту пожежі за даними наземного обстеження по лісництвах

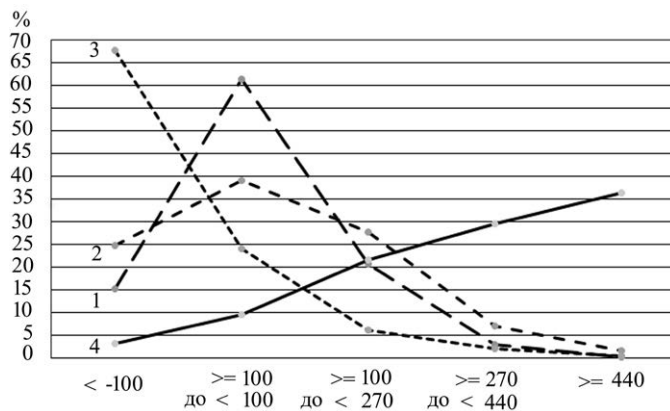


Рис. 5. Розподіл площі екосистем за величиною параметра ΔNBR : 1 — ліс неушкоджений; 2 — ліс частково ушкоджений (рідколісся); 3 — ділянки з трав'янистою рослинністю; 4 — ліс сильно вигорілий

За даними таксаційних обстежень 2016 р. проведено аналіз площ, пройдених пожежею в лісництвах зони відчуження [5]. Наземні обстеження проводили через 5 років з метою оцінки обсягів здорових та ушкоджених деревостанів у лісництвах. У таких обстеженнях стан трав'янистих біоценозів не оцінювався.

Для виконання послідовності запитів і проведення розрахунків площі ушкоджених лісових екосистем по кварталах лісництв за наземними даними необхідно було підготувати інформаційні таблиці. Підготовка включала створення структури інформаційної таблиці з полями для ідентифікації та атрибутивними даними. Ідентифікаційне поле (NLKVVYD) складалося з номерів лісництва, кварталу і виділу, воно використовувалося для приєднання інформації з інших картографічних шарів та агрегації даних (рис. 6). Наступним кроком було проведено заповнення таблиці атрибутивними даними та відповідну кодифікацію. Атрибутивні дані забезпечили відображення сутності об'єктів у тематичному аналізі. Вони містили оцінку ушкоджених деревостанів відповідно до документації таксаційних обстежень [5]. Така підготовка даних дала змогу за допомогою послідовності запитів розрахувати площу ушкоджених лісових екосистем по кварталах лісництв. На рис. 6 позначено цифрами: 1 — вхідні дані таксаційних обстежень осередків пожежі в лісництвах за виділами; 2 — агреговані дані за кварталами; 3 — картографічний шар просторового розподілу осередків пожежі та їхньої площі у кварталах лісництв, створений за даними Sentinel 2.

За даними таксаційних обстежень 2016 р. в лісництвах зони відчуження зазначено такі ступені ушкодження деревостанів: згарища з високим ступенем ушкодження від 70 до 100 %; низова пожежа сильно-

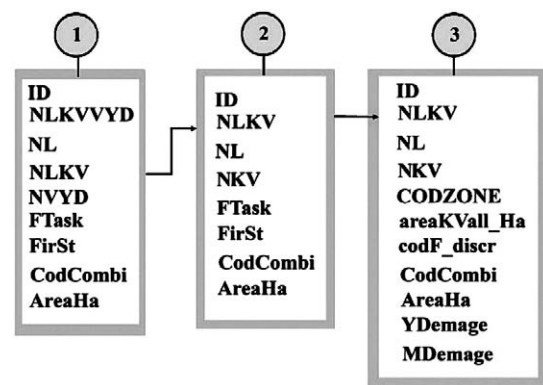


Рис. 6. Структура інформаційних таблиць, що містять дані щодо пірогенного ушкодження лісових екосистем за кварталами лісництв зони відчуження

го ступеня від 50 до 70 %; низова пожежа середнього ступеня від 20 до 50 %; низова пожежа слабого ступеня від 10 до 20 %.

Порівняльний аналіз наземних даних з даними дистанційного зондування показав, що факт пожежі у кварталах Денисовецького лісництва підтвердився в 98 % випадків. Загальна площа ушкоджених пожежею деревостанів у 2015 р. за кварталами разом із суміжними ділянками трав'янистої рослинності на галявинах становила 4 642 га, з них під деревостанами 4 033 га. Під згарищами визначено 3 233 га ділянок лісу. На рис. 7 показано картосхему розподілу осередків пожежі різного ступеня ушкодження, що утворилися в серпні 2015 р., складену за даними таксаційного обстеження [5]. Потенціал для відновлення деревостанів мають площі ділянок неушкодженого лісу, що позначені на діаграмі білим кольором.

По Луб'янському лісництву маємо збіг 90 % випадків пожежі за кварталами лісництв відповідно до даних наземного обстеження і космічного знімання. Площа лісів разом з трав'янистою рослинністю на галявинах, пройдена пожежею, 5 605 га. Деревна рослинність становила 4 446 га, з них: згарища 2491 га, низова пожежа сильного ступеня 236 га, середнього ступеня 916 га, слабого ступеня 803 га.

У Корогодському лісництві пожежа охоплювала 113,3 га, з них: згарища 70,5 га, низова пожежа сильного ступеня 25,1 га, середнього ступеня 13,2 га, слабого ступеня 4,5 га. Розбіжність розрахунків площ за супутниковими і наземними даними полягала в тому, що за мультиспектральним знімком невеликі відокремлені осередки низової пожежі в лісі визначаються погано і можуть не враховуватися у розрахунках.

Для категорії згарища розрахований запас фітокомпонентів малого діаметра, що повністю вигорає внаслідок сильної пожежі для типових видів насаджень сосни та берези. Загальна площа згарищ за таксаційним описом 2016 р. в зоні відчуження 6064 га. Розраховано, що насадження сосни на згарищі становило 90,9 %, берези 6,7 %, інші види насаджень 2,4 %. Запас деревини на згарищі отримано з використанням кількості запасу сухоюстю за таксаційним описом ушкоджених ділянок лісу [5]. Алгоритм розрахунку запасу кори, гілок, хвої або листя, а також підросту взято з монографії [7]. В алгоритмі використано залежність величини запасу фітокомпонентів малого діаметра від запасу деревини за віковими групами в насадженні. У табл. 6 наведено розраховану питому масу фітокомпонентів на вигорілих ділянках сосни та берези в зоні відчуження.

Створення тематичних карт для оцінки впливу пожеж на лісові екосистеми

Технологія геоінформаційного аналізу передбачала вивчення структури рослинності за растровими зображеннями в різні вегетаційні періоди і створення на їхній основі наборів векторних картографічних шарів. Наступним кроком була побудова тематичних карт з метою візуалізації результатів дослідження. Метою дослідження було проаналізувати ступінь ушкодження рослинного покриву на ділянках, що зазнали пірогенного впливу, та визначити потенціал для відновлення деревної рослинності. У 2015 р. в зоні відчуження та безумовного відселення утворилося декілька великих за площею осередків пожежі.

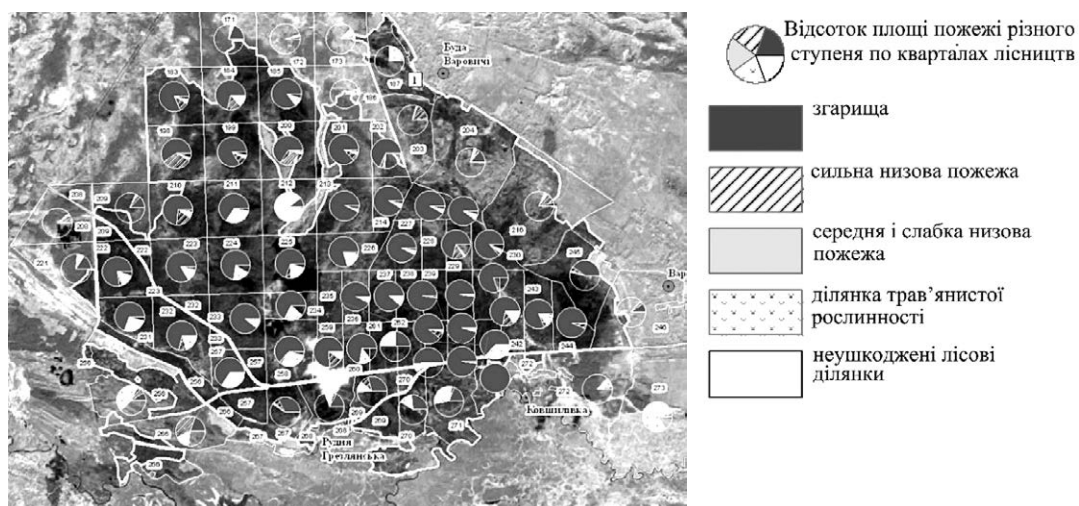


Рис. 7. Розподіл осередків пожежі в серпні 2015 р. за даними таксаційного обстеження в Денисовецькому лісництві

Таблиця 6. Питома маса фітокомпонентів малого діаметра у вигорілих насадженнях сосни та берези після пожежі 2015 р.

Порода дерев	Площа згарища, м ²	Питома маса, кг/м ²				
		Деревина	Кора	Гілки	Хвоя	Листя
Сосна	55 143 000	10,11	0,52	0,92	0,27	0
Береза	4 046 000	7,27	1,24	1,28	0	0,25

За інформацією інтернет-порталу Fire Map найбільші ушкодження від пожеж зафіксовані в березні-квітні та серпні 2015 р. [4]. У результаті аналізу даних космічного знімання визначено осередки пожежі, а ділянки лісових екосистем розподілено за ступенем їхнього ушкодження. На рис. 8 показано приклад

просторово-часової зміни рослинного покриву під впливом однієї з масштабних пожеж у зоні відчуження. Тематичні карти створені після аналізу набору даних: мультиспектрального знімка Sentinel 2, векторних картографічних шарів: рослинного покриву станом до пожежі; класифікації стану рослинності

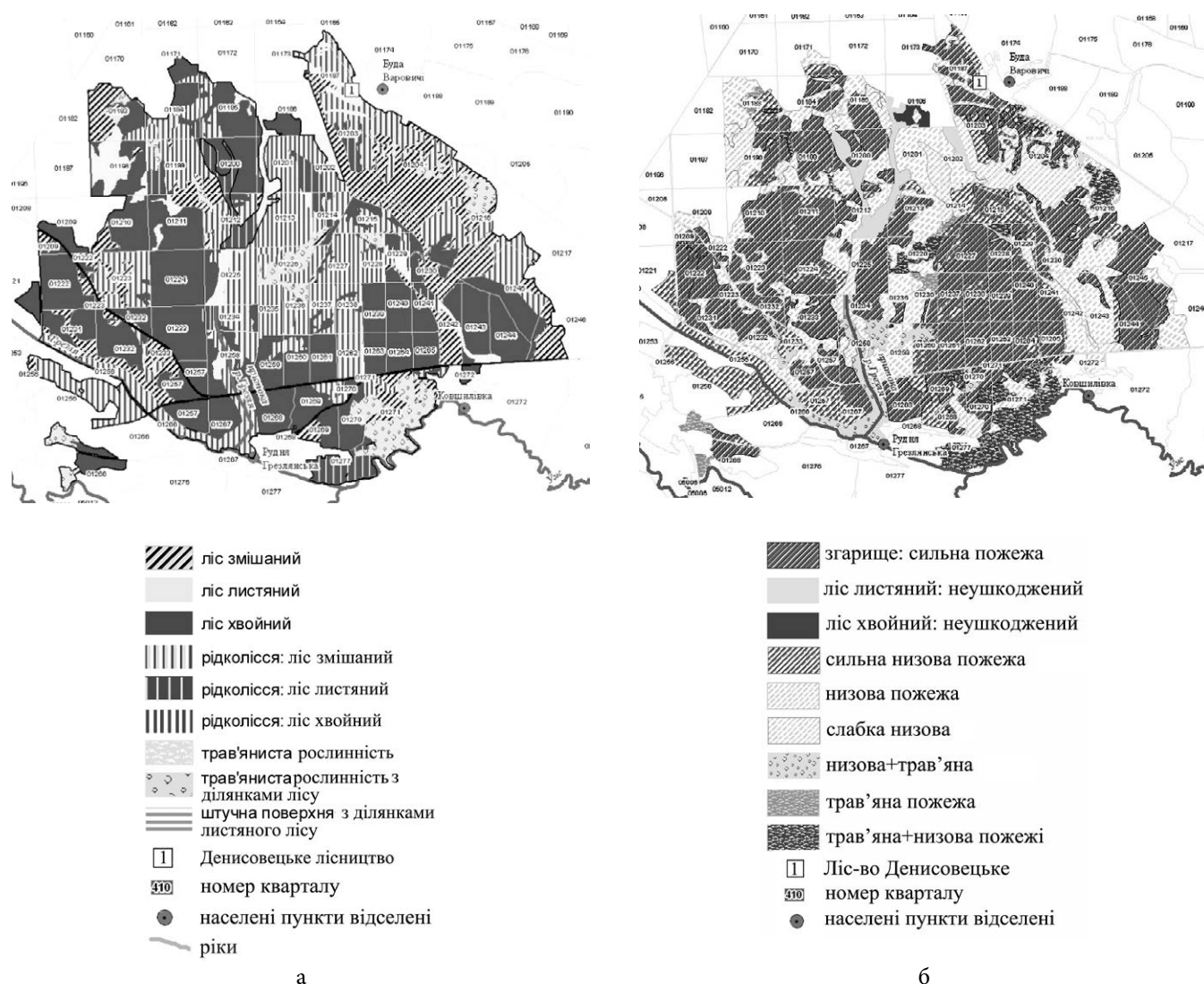


Рис. 8. Зміни в рослинному покриві внаслідок пожежі та ступінь ушкодження лісових екосистем у серпні 2015 р. в Денисовецькому лісництві: рослинний покрив до (а) та після пожежі (б)

після пожежі; розподілу вегетаційного індексу NDVI, розрахованого після проходження пожежі.

Використання супутникової інформації дало змогу розділити рослинність за ступенем ушкодження від пожежі та визначити площу за різними категоріями ушкодження лісових екосистем.

Великий за площею осередок пожежі утворився у квітні 2015 р. на території Луб'янського та Корогодського лісництв. За розрахунками пройдена пожежею площа була 5295 га. Площа сильно ушкодженого лісу становила 2089 га, з них згарищ 1640 га (78 %), сильної низової пожежі 449 га (22 %).

За супутниковими даними в Денисовецькому лісництві площа згарищ (верхова + низова пожежі) і сильної низової пожежі в лісі становила 3121 га, з них згарищ — 2524 га (81 %), сильної низової пожежі — 597 га (19 %).

З 9850 га пройденої вогнем площі лісів трьох лісництв зони відчуження та гарантованого відселення загинули та критично пошкоджені деревостани визначені на 5210 га. У цій категорії площа хвойних лісів з невеликими ділянками листяних дерев або трав'янистої рослинності була 4484 га, мішаних лісів — 707 га, листяних лісів — 19 га. Слабо ушкоджені лісові екосистеми мали площу 1806 га, з них хвойні ліси — 686 га, листяні ліси — 665 га, мішані ліси — 455 га. Площа ділянок підприємств основного та допоміжного циклів та відселених населених пунктів була невеликою — 218 га, з них площа згарищ — 44 га, а ділянок, ушкоджених низовою, слабкою низовою та трав'яною пожежами, 175 га.

Висновки

У результаті проведеного аналізу супутникової інформації та наземних даних таксаційних обстежень лісових екосистем за кварталами лісництв зони відчуження та заповідника «Древлянський», розташованого в зоні гарантованого відселення, визначено високу ефективність використання даних дистанційного зондування з метою визначення осередків вигорання рослинного покриву внаслідок пожежі. Досліджено ступінь ушкодження ділянок у зоні дослідження, що зазнали впливу лісових пожеж. Використання сумісного аналізу даних дистанційного знімання та інформації наземного обстеження збільшила обґрунтованість діагностичних тематичних карт структури та оцінки стану рослинного покриву.

Класифікація структури рослинності, проведена за супутниковими даними, була використана як картографічна модель стану лісових насаджень за різні

періоди: до пожежі та після пожежі. За допомогою даних космічного знімання визначено, що ділянки, пройдені пожежею, мають дуже нерівномірну і строкату картину ураження рослинного покриву. На інтенсивність ушкодження та його площу впливав вид деревостану. У хвойних деревостанах створюються сприятливі умови для розповсюдження вогню в екосистемі, зважаючи на накопичення великої маси сухих фітокомпонентів малої фракції. У хвойному лісі перебіг пожежі складний і має важкі наслідки для екосистеми. Суха хвоя довго розкладається й нагромаджується в товстому шарі сухої підстилки. Накопичена за декілька років суха маса фітокомпонентів сприяє виникненню затяжної сильної низової пожежі, у результаті чого ушкоджені деревостани мають тенденцію до всихання в наступний вегетаційний період. Вміст смоляних речовин у хвойних деревах сприяє розповсюдженню вогню у крони дерев і переходу до верхової пожежі та формування згарищ або згарищ із невеликим відсотком живих дерев.

У листяних березових деревостанах відпад листя розкладається протягом року, не утворюючи товстого шару сухих фітокомпонентів. Таким чином, екосистемам березового лісу в разі весняної пожежі характерний швидкий перебіг низової пожежі середнього та слабого ступеня впливу. Аналіз супутникових знімків після пожеж такого характеру показує, що в екосистемі листяного лісу дерева часто поновлюють вегетацію у той же рік після пожежі.

Список використаної літератури

1. Кохан С. С. Дистанційне зондування Землі. Теоретичні основи / С. С. Кохан, А. Б. Востоков. — Київ : Вища школа, 2009. — 510 с.
2. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування: монографія / за ред. В. І. Лялько, М. О. Попова. — Київ : Наукова думка, 2006. — 360 с.
3. Key C. H. Landscape Assessment (LA) / C. H. Key, N. C. Benson // Key, Carl H.; Benson, Nathan C. 2006. Landscape Assessment (LA) // FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD / D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson, S. Sutherland, L. J. Gangi. — Fort Collins, CO: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006. — P. LA-1–55.
4. Дані радіометричних вимірювань NASA. — Режим доступу: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_M-C61_356618.zip, https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_M-C61_356618.zip

- modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_SV-C2_356620.zip (дата звернення: 08.06.2023).
5. Таксаційний опис земельних ділянок лісового фонду станом на 01.01.2017 р. — ДСКП «Північна Пуща», 2017. — 1 електрон. опт. диск.
 6. ArcGIS Pro 3.3. — Режим доступу: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/get-started/get-started.htm>; <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/arcpy/image-analyst/nbr.htm>.
 7. Інтегрована система охорони лісів від пожеж: монографія / С. В. Зібцев, П. І. Лакида, П. П. Яворовский [та ін.]. — Київ : Наукова столиця, 2020. — С. 98–100.

O. G. Tyshchenko¹, P. V. Pyvovar², N. M. Tsydyk¹

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 12, Lysohirska st., Kyiv, 03028, Ukraine

² Polissia National University, 7, Staryi Boulevard, Zhytomyr, Zhytomyr region, 10008, Ukraine

Assessment of the Effects of Fires on Forest Ecosystems Based on Space Survey Data and Forest Plantation Survey Data

The article presents the structural features of plant communities in the zone of contamination of radionuclides, which affected by large-scale forest fires. The areas of the Exclusion Zone and the Drevlianskyi Nature Reserve (the guaranteed resettlement zone) that affected by forest fires were identified and the extent of their damage was investigated. Using Sentinel 2 satellite imagery data, as well as forest survey data, categories and classes of vegetation were determined. Examples of thematic maps showing the degree of fire impact on coniferous, deciduous, mixed forest ecosystems and areas with mosaic vegetation cover provided. In the areas affected by the fire, the vegetation divided according to the degree of forest damage into the following categories: heavily burned forest (dead forest), burned with small areas of vegetative trees, fire in the tree litters: heavy fire, medium-, and light fire. The statistical indicators of NDVI and NBR for defined categories of fire in plant groups revisited. The use of joint analysis of remote sensing data and ground survey information increased the validity of diagnostic thematic maps of the structure and assessment of the state of vegetation cover. The classification of vegetation structure based on remote sensing data of the Earth used as a cartographic model of the state of forest plantations

for different periods: before the fire and after the fire. The satellite imagery data showed that the areas affected by the fire have a very uneven and variegated pattern of vegetation damage. The type of stand influenced the intensity of the damage and area. In coniferous stands, favorable conditions created for the spread of fire in the ecosystem, due to the accumulation of a large mass of small fraction of dry plant components. In the case of a spring fire, birch forest ecosystems characterized by a rapid course of a low-level fire of medium and low impact. Analysis of satellite images after fires of this nature shows that in the deciduous forest ecosystem, trees often resume vegetation in the same year after the fire.

Keywords: vegetation structure, forest fires, remote sensing of the Earth, geoinformation technologies, NDVI, NBR, deltaNBR.

References

1. Kokhan S. S., Vostokov A. B. (2009). *Dystantsiine zonduvannia Zemli. Teoretychni osnovy* [Remote sensing of the Earth. Theoretical foundations]. Kyiv: Vyshcha shkola (in Ukr).
2. Lyalko V. I., Popova V. O. (eds.) (2006). *Bahatospektral'ni metody dystantsiinoho zonduvannia Zemli v zadachakh pryrodokorystuvannia* [Multispectral methods of remote sensing of the Earth in nature management problems]. Kyiv: Naukova Dumka, 360 p. (in Ukr).
3. Key C. H., Benson N. C. (2006). Landscape Assessment (LA). In: Lutes D. C., Keane R. E., Caratti J. F., Key C. H., Benson N. C., Sutherland S., Gangi L. J. *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD*. Fort Collins, CO: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, p. LA-1–55.
4. *Dani radiometrychnykh vymyruvan' NASA. (2015).* [NASA radiometric measurement data]. — Retrieved from: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_M-C61_356618.zip, https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/data/download/DL_FIRE_SV-C2_356620.zip.
5. Taxation description of land plots of forest fund as 01.01.2017. SSE “Pivnichna Pushcha”, 2017. (in Ukr).
6. ArcGIS3.3. — Available at: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/get-started/get-started.htm>; <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/arcpy/image-analyst/nbr.htm>.
7. Zibtsev S. V., Myroniuk V. V., Bohomolov V. V., Yavorovskiy P. P., Soshenskyi O. M., Humeniuk V. V., Sedonin S. Ye., Levchenko V. V., Puzrina N. V. (2020). *Itehrovana systema okhorony lisiv vad pozhezh* [Integrated forest fire protection system]. Kyiv, Naukova stolytsia, 340 p. (in Ukr).

Надійшла 06.09.2024

Received 06.09.2024

Правила для авторів

Загальні вимоги

1. Редакція збірника «Ядерна енергетика та довкілля» приймає раніше неопубліковані авторські статті, що відповідають профілю видання та мають наукове та практичне значення. Тексти статей та всі матеріали до них повинні бути ретельно відредаговані та перевірені.

2. Статті, які є результатами робіт, проведених у сторонніх організаціях, повинні мати супровідний документ від цих організацій. Разом зі статтею до редакції журналу має бути поданий документ про можливість відкритої публікації матеріалів та згоду авторів на поширення їх через мережу Інтернет.

3. Матеріали, що надходять до редакції для публікування, проходять обов'язкове рецензування. Зауваження рецензентів направляють розробнику матеріалів без вказівки імен рецензентів. Після отримання рецензій і відповіді автора редакційна рада ухвалює рішення про можливість і порядок публікації роботи. Незначні правки стилістичного, номенклатурного та формального характеру вносять до тексту без узгодження з автором.

4. Редакція приймає статті українською або англійською мовою.

5. Рукопис статті можна подати у вигляді електронної копії (на електронному носії або електронною поштою). Стаття повинна бути створена за допомогою текстового редактора Microsoft Word з урахуванням таких вимог: шрифт — Times New Roman; розмір — 11 пт; міжрядковий інтервал — 1,5; розстановка переносів — переносів немає; форматування — по ширині; колір шрифту — чорний; абзацний відступ — 1,5 см; розміри полів, мм: зліва — 24 мм, справа — 16 мм, зверху — 22 мм, знизу — 28 мм.

6. Загальний обсяг статті разом з графічними матеріалами не повинен перевищувати 15 сторінок формату A4.

7. На титулі статті має бути представлено її УДК.

Українською та англійською мовами слід навести:

прізвище, ім'я та по батькові автора;

його учений ступінь, звання, посаду, ідентифікатор ORCID;

повну назву організації, де працює автор, і її поштову адресу;

назву статті;

анотацію та ключові слова.

8. У разі співавторства додатково слід вказати прізвище, ім'я та по батькові автора, відповідального за контактування з редакцією, його телефон і адресу електронної пошти.

9. Графічний матеріал подають у форматі EPS, TIFF або JPG з густиною точок на дюйм не менше 300 dpi. Зображення повинні бути якомога зрозумілішими. Варто враховувати, що друкована версія журналу виходить чорно-білим друком, тому автору варто звернути увагу на те, щоб через втрату кольору не були втрачені важливі деталі рисунків.

Назви та докладне пояснення змісту слід наводити в підписах під рисунками, а не на самих ілюстраціях. Текст не повинен повторювати інформацію, представлену в рисунках, він має тільки давати основні висновки за ними та резюмувати інформацію. Якщо рисунки мають малу кількість даних, їх варто замінити описом у тексті. Якщо рисунок складається з кількох підрисунків (а, б, в, ...), то підпис до рисунка має містити опис кожного з підрисунків. Розмір шрифту надписів на рисунках і підписів до них — 10 пт, гарнітура — Times New Roman.

Графіки повинні відображати великі обсяги даних ясно і зрозуміло. Оформляючи в статті графіки, автор має переконатися, що в них підписано всі осі, вказано всі одиниці виміру для величин, підписано всі криві й масиви даних.

Схеми допомагають визначити ключові деталі в процесі, тому мають бути позбавлені зайвої інформації. Оформляючи схему, потрібно підписати всі ключові елементи й навести додаткові пояснення в її заголовку та основному тексті.

10. Таблиці нумерують послідовно, відповідно до першого згадування про них у тексті. Перед кожною таблицею повинна стояти її назва. Слід розшифрувати всі нестандартні аббревіатури у виносках, використовуючи таку послідовність символів: *, **. Слід упевнитися, що кожна таблиця процитована в тексті.

11. Формули створюють у формульному редакторі MathType Equation або MS Equation та нумерують у круглих дужках з правого боку. Грецькі і кириличні літери в формулах варто набирати прямим шрифтом (опція «текст»), латинські – курсивом. Позначення величин і символи в тексті і таблицях варто набирати як елементи тексту, а не як об'єкти формульного редактора.

12. Посилання на рисунок, графік, схему або таблицю є обов'язковим у тексті статті та згадується безпосередньо перед рисунком, графіком, схемою або таблицею.

13. Скорочення слів, словосполучень, назв, термінів, за винятком загальноприйнятих, можливе тільки після їх повного першого згадування в тексті. Далі таке слово або формулювання слід вживати лише в скороченому вигляді.

14. Одиниці вимірювання мають бути вказані у відповідних метричних одиницях або в їх десяткових кратних одиницях.

15. Матеріали, які не відповідають зазначеним вимогам, редакцією не розглядаються.

16. Публікація у журналі є безкоштовною. Виплата авторського гонорару не передбачається.

Структура та зміст статті

Стаття повинна бути побудована за традиційним для світової наукової періодики планом: структурована за розділами та завершуватися конкретними висновками, в яких у лаконічній формі викладено результати роботи та пропозиції автора, що впливають із викладеного матеріалу.

Назва статті повинна відображати основну ідею дослідження; акцентувати на важливості дослідження; бути лаконічною; зацікавлювати читачів.

Прізвища авторів англійською мовою подаються відповідно до прийнятої міжнародної системи транслітерації (з української – відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 55 від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею», з російської – відповідно до «Системы транслитерации Библиотеки конгресса США»). Наведення прізвища у різних системах транслітерації призводить до дублювання профілів (ідентифікаторів) автора в базі даних (профіль створюється автоматично в разі збігу його даних по двох публікаціях).

У списку авторів вказуються лише ті особи, які зробили значний внесок у створення роботи на інтелектуальному, практичному або концептуальному рівні. Першим вказується той, хто зробив основний внесок у написання статті. У випадках, коли інші особи або організації сприяли дослідженню, опублікованому у статті, про них доречно згадати наприкінці статті у розділі Подяка (Acknowledgement).

Анотація – це стисла інформація про зміст статті. Багато читачів знайомитимуться тільки з анотацією статті, тому вона має бути зрозумілою та інформативною за умови опублікування її окремо від статті. Вона не має повторювати відомості, що містяться в заголовку. Анотація українською мовою має бути розміром приблизно 1000 знаків. Оскільки єдиним джерелом інформації щодо змісту статті для іноземних спеціалістів є анотація англійською мовою, вона має бути більшою за обсягом (не менше 1800 знаків), більш структурованою та не має бути перекладним варіантом анотації українською. Оптимальним для такої анотації є структурування відповідно до основних елементів самої статті (актуальність, матеріали та методи, висновки тощо). Вона має бути інформативною (позбавленою загальних слів), змістовною (відображати основний зміст статті та результатів досліджень) і містити термінологію, характерну для іноземних спеціальних текстів. Неприйнятним є нередатований автоматичний переклад за допомогою онлайн-сервісів.

Ключові слова використовуються для індексування роботи в електронних системах та мережі Інтернет. Чим краще будуть підібрані ключові слова до роботи, тим більше людей зможуть її знайти, здійснюючи пошук за такими самими ключовими словами. Це збільшить читаність статті, а отже, підвищить ймовірність її

цитування. Ключові слова повинні відображати зміст статті та бути конкретними у своїй предметній галузі.

Структура статті передбачає такі основні розділи:

вступ;

стан проблеми та аналіз літературних даних;

постановка завдань дослідження;

матеріали дослідження, експериментальна частина;

інтерпретація результатів та їх апробація;

висновки.

Вступ має надати читачеві інформацію (зокрема довідкового характеру), необхідну для того, щоб зрозуміти, яке питання вивчалось, а також причини, з яких автор проводить дослідження. У вступі стисло потрібно відобразити передумови до проведення дослідження: подати загальне розуміння проблеми, яку автор порушив, й аргументовано обґрунтувати актуальність дослідження, описати проблему та тематику, а також навести актуальні знання, пов'язані з розглянутими науково-дослідницькими завданнями.

Стан проблеми та аналіз літературних даних дає змогу виявити «нішу», де автори проводять наукові дослідження. Розділ пишуть на основі публікацій періодичних наукових видань (книги, підручники, монографії, стандарти, звіти до таких не належать). Огляд періодики з проблеми, що досліджується автором, має охоплювати джерела не більше 10-річної давності (у галузі ІТ-технологій – 5-річної давності). Обов'язковим є огляд закордонних наукових періодичних видань. Цей розділ є одним із найважливіших, оскільки з нього випливає, наскільки автор особисто розуміє стан проблеми, яку береться досліджувати.

У літературному огляді висвітлюють не вирішені іншими вченими частини проблеми, які досліджує автор; викладають причини цього дослідження; чітко визначають цілі дослідження, які повинні узгоджуватися з іншою частиною рукопису; наводять посилання на важливі джерела, які дають змогу повніше розкрити суть роботи.

Правильно підібраний літературний огляд передбачає:

цитування автором найбільш релевантних результатів попередніх досліджень і пояснення того, наскільки вони співвідносяться з поточним дослідженням;

посилання на дослідження різних дослідницьких груп;

посилання на оригінальні дослідження, а не на велику кількість оглядових статей;

максимальна користь цитат для читача (читачеві не цікаво, коли автор посилається на велику кількість своїх робіт або на інші роботи для того, щоб показати глибину своїх знань);

посилання на результати інших досліджень, які або суперечать отриманим автором результатам (якщо такі є), або підтверджують їх.

Джерела в тексті статті повинні бути відсортовані за порядком згадування.

Матеріали дослідження, експериментальна частина є розділом, зі змісту якого має бути зрозуміло, як отримано всі результати. Варто описати систему дослідження (методи, методика тощо). Методи, які використовували для обробки даних, мають бути обґрунтовані (спиратися на статистику). Автор, який використав методику опублікованого дослідження, повинен послатися на неї та дати резюме процедури в тексті статті.

Результати дослідження мають бути чітко визначені, а підсумкові результати – об'єктивно підтверджені (наприклад, результатами математичного, статистичного, імітаційного моделювання, натурними експериментами, фундаментальними положеннями наукових дисциплін у відповідній предметній галузі).

Забороняється генерування статті засобами штучного інтелекту. Використання таких засобів може бути припустимим для пошуку інформації та покращення читабельності тексту статті. Отримана інформація повина бути ретельно перевірена авторами, які несуть остаточною відповідальність за точність, достовірність і доцільність змісту своєї роботи.

Інтерпретація результатів та їх апробація передбачає приклади практичних рішень (результати чисельних експериментів, графіки, діаграми тощо) на основі отриманих автором наукових результатів. Приклади дають змогу оцінити адекватність запропонованих теоретичних рішень та їх практичну значимість. Потрібно вказати, в умовах якого виробництва були впроваджені або можуть бути впроваджені результати досліджень.

Якщо результати не є основною метою статті, їх можна узагальнити й не публікувати дані детально. Тим не менш, у разі недостатньої кількості інформації читач може втратити довіру до дослідження, припустивши, що автор приховує слабкі докази.

Висновки відображають, наскільки матеріал дослідження відповідає його цілям, сформульованим у вступі. Варто означити, чи існують альтернативні інтерпретації отриманих результатів та порівняти отримані результати з результатами інших досліджень.

Доречно вказати, як результати наукової розвідки можуть вплинути на майбутні дослідження, чи є в дослідженні обмеження. Перевірте відповідність описаних висновків отриманим даним.

Список використаної літератури

Кожна констатація факту чи опис попередніх висновків, цитати, методи, моделі, рисунки, таблиці тощо, запозичені з інших робіт, обов'язково супроводжуються посиланням на першоджерело.

Посилання на список літератури повинні бути пронумеровані послідовно відповідно до їх порядку у тексті.

Правильне описання джерел, на які посилаються автори, є запорукою того, що цитовану публікацію буде враховано в процесі оцінювання наукової діяльності її авторів, а отже, й організації, регіону, країни. За цитуванням журналу визначається його науковий рівень, авторитетність тощо.

Після статті українською мовою має бути розміщено два списки:

1) *Список використаної літератури* — джерела мовою оригіналу, оформлені відповідно до вимог українського стандарту бібліографічного опису ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 «Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання».

2) *References* — той самий список літератури, де джерела кирилицею транслітеровані в латинському алфавіті та подані за допомогою міжнародної системи запису посилання American Psychological Association (APA).

Для статті англійською мовою достатньо лише списку «References».

Оформлення бібліографічного списку «Список використаної літератури»

1. Основним нормативним документом для оформлення списку літератури є ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 «Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання».

2. Бібліографічний опис складають за такою загальною формою:

Автори. Основна назва [Загальне позначення матеріалу] = Паралельна назва: відомості, що стосуються назви / перші відомості про відповідальність ; відомості про інших осіб чи установи, які несуть інтелектуальну відповідальність за видання. – Відомості про повторність видання / Відповідальність за повторне видання. – Зона специфічних відомостей. – Місце видання: Видавництво, рік. – Фізична (кількісна) характеристика. – (Серія. Підсерія ; №, т.). – Примітки. – Стандартний номер та умови доступності.

Елементи, виділені жирним шрифтом, є факультативними.

3. Бібліографічний опис кожного окремого документа складається на мові цього документа.

4. У випадках, коли документ має одного, двох, трьох авторів – у заголовку вказується прізвище тільки першого автора (спочатку прізвище, потім ініціали). За косою рисою в зоні назви та відомостей про відповідальність вказуються прізвища авторів з ініціалами (обов'язково повторюється прізвище першого автора, зазначеного у заголовку бібліографічного опису; спочатку ініціали, потім прізвище).

5. Проміжки між знаками та елементами запису є обов'язковими і використовують для розрізнення знаків граматичної і приписаної пунктуації.

6. Уніфіковані форми скорочень українською та латинською мовами: та інші (et alii) – та ін. (et. al.); і так далі (et cetera) – і т. д. (etc.); без місця (sine loco) – б. м. (s. l.); без видавця (sine nomine) – б. в. (s. n.).

7. Джерела у списку варто розміщувати послідовно відповідно до їх порядку у тексті.

Оформлення списку літератури «References»

1. Список літератури («References») для Scopus та інших зарубіжних баз даних (БД) необхідно наводити окремим блоком, повторюючи список, наданий українською/російською мовою, незалежно від того, є в ньому іноземні джерела чи немає.

2. За основу побудови посилання в списку літератури латиницею в журналі «Ядерна енергетика та до-вкілля» взято принципи формування бібліографічних посилань American Psychological Association (APA).

Бібліографічні посилання латиницею для журналу створюють за принципом, що дасть змогу зарубіжним наукометричним базам у найлегший спосіб фіксувати дані про елементи кожного посилання та забезпечити коректні показники їх цитованості.

3. В опис статті необхідно вносити всіх авторів, не скорочуючи перелік до трьох, як це рекомендовано чинними в Україні державними стандартами.

4. Деякі елементи бібліографічного опису подають курсивом, як показано на зразках нижче.

5. У випадках оформлення україно- або російськомовного джерела іншою мовою після заголовка і відомостей про видання, транслітерованих латиницею, в [квадратних дужках] вказується переклад українського (російського) заголовка разом з відомостями про видання в англійську мову.

6. Для транслітерування прізвищ авторів, назв статей, книжок, видавництв тощо варто користуватися онлайн-конвертерами окремо для українською та російською мов, посилання на які подані нижче. Ці ресурси пропонують найпоширеніші варіанти транслітерування: для української мови – згідно з чинним стандартом (Паспортний КМУ); для російської – відповідно до правил Держдепартаменту США. Такий підхід дозволить уніфікувати дані для міжнародних баз, адже різні системи транслітерації сприятимуть створенню різних результатів.

Онлайн-конвертер з української мови для транслітерації: <http://translit.kh.ua/?passport>.

Онлайн-конвертер з російської мови для транслітерації: <http://ru.translit.net/?account=bgn>.

Для україномовних і російськомовних статей, які використовують з журналів, рекомендуємо такий варіант структури бібліографічних посилань в References:

ПІБ авторів (транслітерація);

рік видання в дужках;

назва статті у варіанті, що транслітерується, і переклад назви статті англійською мовою в квадратних дужках [];

назва джерела (транслітерація) і переклад назви джерела англійською мовою [];

вихідні дані з позначеннями англійською мовою.

позначення мови оригіналу (in Rus., in Ukr.).

Спростити процес створення списку «References» дають змогу ресурси автоматичного формування бібліографічних описів за пропонованими стандартами. Причому описи можна створювати для різних видів публікацій (книга, стаття з журналу, інтернет-ресурс тощо). Приклади таких сайтів: <http://www.easybib.com>; <http://www.bibme.org>.

Приклади оформлення списку літератури References та більше інформації дивіться на сайті журналу pre.org.ua в розділі «Вимоги до статей».

