

ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ДОВКІЛЛЯ

NUCLEAR POWER AND THE ENVIRONMENT



Науково-технічний журнал

ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ДОВКІЛЛЯ

NUCLEAR POWER AND THE ENVIRONMENT

№ 1 (23) 2022

Головний редактор

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

Заступники головного редактора

Паскевич С. А., канд. біол. наук (ІПБ АЕС НАН України),
Масько О. М., канд. хім. наук (ДП «ДНІЦ СКАР»)

Співзасновники:

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій
Національної академії наук України (ІПБ АЕС НАН України),
ДП «Державний науково-інженерний центр систем
контролю та аварійного реагування» (ДП «ДНІЦ СКАР»),
ГО «Українське ядерне товариство»

Виходить до 4 разів на рік

Свідцтво про державну реєстрацію друкованого
засобу масової інформації Серія КВ № 23679-13519пр
від 20.12.2018 р.

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@isnppr.kiev.ua

Затверджено до друку вченою радою ІПБ АЕС НАН України
(протокол № 4 від 20.06.2022 р.)

Підписано до друку 22.06.2022. Формат 60×90 1/8
Папір крейдяний. Друк офсет. Умов. друк. арк. 10
Тираж 200 пр. Зам. №

Віддруковано в ТОВ «НВП «Інтерсервіс»,
м. Київ, вул. Бориспільська, 9.

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 (ДП «ДНІЦ СКАР»),
Габелков С. В., д-р фіз.-мат. наук (ІПБ АЕС НАН України),
Дубковський В. О., д-р техн. наук, проф. (ОНПУ),
Інюшев В. В., канд. техн. наук (ДП «ДНІЦ СКАР»),
Кравченко В. П., д-р техн. наук, проф. (ОНПУ),
Корольов О. В., д-р техн. наук, проф. (ОНПУ),
Куц В. М., канд. фіз.-мат. наук (ДП «ДНІЦ СКАР»),
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 Шеффільда, Велика Британія),
Pretzsch G., Dr. (GRS, Німеччина),
Schillebeeckx P., Dr. (JRC, Бельгія),
Washiya T., Dr. (IAEA, Японія)

Відповідальні секретарі

Куцина І. В. (ІПБ АЕС НАН України),
Новосолов Г. М., канд. фіз.-мат. наук (ДП «ДНІЦ СКАР»)

Літературне редагування Куциної І. В. (ІПБ АЕС НАН України)
Комп'ютерна верстка Лютого А. О. (ІПБ АЕС НАН України)

© Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, 2022

© ДП «Державний науково-інженерний центр систем
контролю та аварійного реагування», 2022

© ГО «Українське ядерне товариство», 2022

Київ 2022

ЗМІСТ

CONTENTS

<i>В. І. Борисенко, А. В. Носовський</i> Щодо будівництва нових ядерних енергоблоків в Україні3	<i>V. I. Borysenko, A. V. Nosovskyi</i> On the construction of new nuclear power units in Ukraine3
<i>І. Г. Шараєвський, Т. С. Власенко, Л. Б. Зімін, А. В. Носовський, Н. М. Фіалко, Г. І. Шараєвський</i> Дослідження спектральних образів нейтронного шуму реакторів типу ВВЕР у нерегламентних теплогідрравлічних режимах активних зон 10	<i>I. G. Sharaevsky, T. S. Vlasenko, L. B. Zimin, A. V. Nosovskyi, N. M. Fialko, G. I. Sharaevsky</i> Study of WWER reactors neutronic noise spectral images in irregular thermohydraulic regimes of core zones 10
<i>Д. І. Хвалін</i> Основні вимоги до сучасних систем діагностики потужних турбогенераторів28	<i>D. I. Khvalin</i> The basic requirements for modern diagnostic systems of powerful turbogenerators28
<i>О. А. Кучмагра, Г. І. Одинокін</i> Інформаційно-вимірювальний канал із двокамерним блоком детектування параметрів нейтронного потоку39	<i>O. A. Kuchmagra, G. I. Odynokin</i> Two-chamber unit for detecting parameters in the neutron flux39
<i>В. В. Деренговський, І. С. Скітер</i> Трирівнева модель оцінки потенційних сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему на основі глобального факторально-індикаторного критерію45	<i>V. V. Derenhovskiy, I. S. Skiter</i> Three-level model assessment of potential scenarios of the Shelter object transformation into an ecologically safe system based on global factor.....45
<i>A. M. Novikov</i> Comparative assessment of the dynamics of the average annual deposition velocity of ^{90}Sr and ^{137}Cs for a long term period after the Chornobyl accident for the cities of Ukraine, Kyiv and Chornobyl56	<i>A. M. Novikov</i> Comparative assessment of the dynamics of the average annual deposition velocity of ^{90}Sr and ^{137}Cs for a long term period after the Chornobyl accident for the cities of Ukraine, Kyiv and Chornobyl56
<i>І. В. Куцина, В. С. Гавриленко, Д. І. Хвалін</i> Результати діяльності Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України у 2021 році 64	<i>I. V. Kutsyna, V. S. Havrylenko, D. I. Khvalin</i> The work results of the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the NAS of Ukraine in 2021 64
Правила для авторів76	Author Guidelines76

В. І. Борисенко, А. В. Носовський

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

Щодо будівництва нових ядерних енергоблоків в Україні

Ключові слова:

ядерна енергетика,
сучасні реакторні технології,
експлуатація у понадпроектний
термін,
встановлена потужність АЕС,
виробництво електроенергії

Ядерна енергетика є важливим фактором забезпечення енергетичної незалежності України. Однак станом на 2022 р. 80 % усього парку енергоблоків АЕС України (12 з 15) вже експлуатуються більше 30 років. У світі цей показник становить 68 %. Два енергоблока з реакторами типу ВВЕР-440 експлуатуються вже більше 40 років, а до 2028 р. кількість реакторів в Україні, що експлуатуються більше 40 років, збільшиться до 10. Тому є очевидними необхідність і важливість впровадження програми будівництва нових ядерних енергоблоків для забезпечення енергетичної незалежності України. У статті розглянуто важливі характеристики сучасної реакторної установки AP1000, яка ліцензована у США, Канаді та деяких інших країнах. Представлена інформація щодо переваг проекту AP1000 перед іншими сучасними реакторними установками EPR-1750, APR-1400, ВВЕР-1200, а також питання, на які необхідно звернути особливу увагу під час виконання відповідних етапів робіт з обґрунтування і впровадження технології AP1000 в ядерній енергетиці України.

За останні декілька десятиліть позиції ядерної енергетики у світовому енергетичному балансі значно знизилися. Причинами стали аварії на АЕС Three Mile Island у США, Чорнобильської АЕС в Україні та АЕС Fukushima-Daiichi в Японії. Так, якщо в 1970-х рр. у світі щорічно починалося будівництво до чотирьох десятків ядерних енергоблоків, а в експлуатацію вводилося більш двох десятків енергоблоків, то на сьогодні у світі щорічно вводяться в експлуатацію декілька одиниць ядерних реакторів. Станом на 01.01.2022 р. у процесі будівництва перебувають усього 52 енергоблоки, частина з яких будуються вже більше 30 років.

На АЕС України станом на 01.01.2022 р. експлуатуються 15 енергоблоків з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР): 13 — з ВВЕР-1000 і 2 — з ВВЕР-440. Частка АЕС у загальному виробництві електроенергії в Україні з 2015 р. становить більше 50 %. Тому є очевидним, що ядерна енергетика в Україні відіграє важливу роль у забезпеченні її енергетичної незалежності. Зусилля науково-технічної спільноти України мають бути спрямовані

на підтримку безпечної експлуатації ядерних енергоблоків АЕС, а також обґрунтування вибору сучасної реакторної технології для енергетики України.

На рис. 1 наведено інформацію про вік експлуатації енергоблоків на АЕС України станом на 01.01.2022 р.: 12 з 15 енергоблоків (80 %) уже відпрацювали 30-річний проектний термін експлуатації, їхня експлуатація відбувається у понадпроектні терміни. Для порівняння, у світі станом на 01.01.2022 р. з 442 енергоблоків, які перебувають у стані експлуатації, 300 (68 %) перетнули 30-річний термін експлуатації [1].

Таким чином, можна констатувати, що для підтримки рівня встановленої потужності енергоблоків на АЕС України, з урахуванням обмеженого терміну їхньої експлуатації у понадпроектні терміни, необхідна програма будівництва нових ядерних енергоблоків в Україні.

Сьогодні останніми є побудовані в 2004 р. ядерні енергоблоки № 2 на Хмельницькій АЕС та № 4 на Рівненській АЕС. Національна атомна енергогенеруюча компанія (НАЕК) «Енергоатом» планувала добудувати енергоблоки № 3 та 4 Хмельницької АЕС,

© В. І. Борисенко, А. В. Носовський, 2022

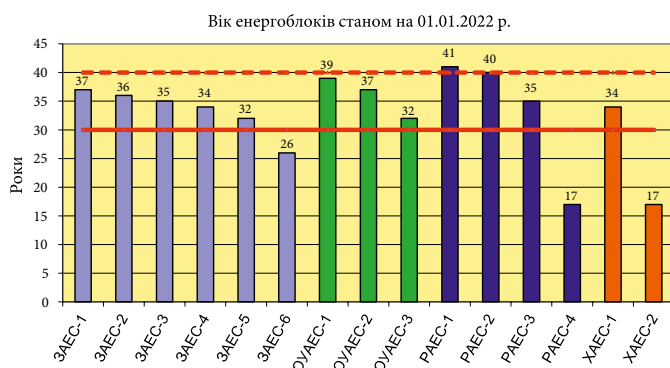


Рис. 1. Вік енергоблоків АЕС України станом на 01.01.2022 р.

зведення яких за проектом реакторної установки ВВЕР-1000/В-320 почалося, відповідно, в 1986 і 1987 рр., проте в 1990 р. було зупинене мораторієм на будівництво АЕС [2].

У 2006 р. було проведено обстеження та оцінка стану будівельних конструкцій недобудованих енергоблоків на предмет можливості їхньої добудови. Результатом цього в 2010 р. стало підписання та ратифікація Верховною Радою України угоди між Україною та Російською Федерацією щодо будівництва енергоблоків № 3 та 4 Хмельницької АЕС з реакторною установкою ВВЕР-1000/В-392Б, яку запропонувала російська компанія «Атомстройекспорт». Рішення про початок будівництва було закріплено Законом України «Про розміщення, проектування та будівництво енергоблоків № 3, 4 Хмельницької АЕС» [3], який був ухвалений у 2012 р. Проте через події, пов'язані зі збройним конфліктом на Донбасі, втратив свою чинність через три роки внаслідок денонсації угоди між Україною та Росією.

Наступним кроком у зрушенні питання стало коригування та доопрацювання техніко-економічного обґрунтування вищезгаданого будівництва в частині зміни постачальника реакторної установки, яким було визначено чеську компанію Skoda JS. У 2019 р. були знову розпочаті роботи з обстеження наявних будівельних конструкцій енергоблоків № 3 та 4 Хмельницької АЕС для підтвердження можливості забезпечення вимог до проектною довговічності та надійності експлуатації існуючих будівельних конструкцій, враховуючи проведення комплексу ремонтно-відновлювальних робіт.

Однак керівництво Міністерства Енергетики України у 2019 р. без належного наукового обґрунтування оприлюднило концепцію, згідно з якою в 2060 р. частка АЕС у виробництві електроенергії має становити 25 %, а джерел відновлювальної енергетики — 75 %.

а джерел відновлювальної енергетики — 75 %. Про добудову енергоблоків Хмельницької АЕС у той же час забули і почали говорити про АЕС з малими модульними реакторами (ММР).

Погляди деяких фахівців стосовно розв'язання енергетичних проблем України на основі «перспективних» технологій ММР не мають належного техніко-економічного і наукового обґрунтування, а також не підтверджуються необхідною апробованою практикою, оскільки у світі такі реактори ще лише розробляються. Сьогодні можна тільки констатувати, що застосування для виробництва електроенергії технологій ММР буде дорожчим порівняно з використанням традиційної, апробованої технології експлуатації енергоблоків потужністю 500–1 000 МВт.

Технологія ММР широко обговорюється у науково-технічних публікаціях як один із шляхів можливого перспективного розвитку ядерної енергетики. Але появу першого енергоблока, побудованого за цією технологією, можна очікувати через 5–6 років, а результати референтного досвіду з експлуатації першого блоку ММР будуть доступні ще через 5–6 років.

Уже в серпні 2020 р. керівництво НАЕК «Енергоатом» зробило нову заяву щодо повернення до проекту добудови енергоблоків Хмельницької АЕС. Подальший розвиток ядерного енергетичного сектору на період до 2035 р. передбачає збільшення виробництва електроенергії на АЕС України. Для досягнення такої мети важливим завданням поряд з забезпеченням експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектні строки є дослідження з обґрунтування оптимального вибору перспективних ядерних установок для заміщення енергоблоків, які виводяться з експлуатації. Враховуючи наявні у світі та в Україні тенденції на ринку постачання електроенергії, одним із шляхів є оновлення парку наявних в Україні енергоблоків з ВВЕР на перспективні, більш економічні та безпечні проекти реакторних установок нового покоління.

В Енергетичній стратегії України на період до 2035 р. «Безпека, Енергоефективність, Конкурентоспроможність» серед основних заходів для реалізації стратегічних цілей у сфері генерування електроенергії передбачені [4]:

реалізація програм щодо покращення ефективності використання потужностей державних підприємств, зокрема підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП) АЕС;

вибір реакторних технологій для будівництва нових ядерних енергоблоків на заміщення потужностей АЕС, які будуть виводитися з експлуатації після 2030 р.

Проте після пуску в 2004 р. двох енергетичних реакторів на Хмельницькій і Рівненській АЕС в Україні не здійснювалося будівництво таких реакторів, що призвело до практичної втрати спроможності спорудження нових енергоблоків атомних електростанцій. Враховуючи високу вартість нового будівництва, а отже й високу собівартість електроенергії під час роботи в амортизаційний період (15–20 років), ядерна енергетика в Україні без державної підтримки втрачає свої позиції. Наслідком цього стане вимушене, для «балансування» енергосистеми країни, збільшення на ринку частки теплових електростанцій на викопному паливі. Це, відповідно, зумовить як збільшення обсягу шкідливих викидів у атмосферу, так і зростання вартості електроенергії.

Тому оптимальним на майбутнє з позицій як екологічної, так і економічної політики України є поступове заміщення енергоблоків, які вичерпали «проектний ресурс», на сучасні нові енергоблоки з підвищеним рівнем безпеки. Це дозволить підтримувати частку АЕС в енергобалансі України на рівні 40÷50 %, а також сприятиме виконанню її зобов'язань щодо зростання застосування в енергетиці частки низьковуглецевих технологій.

Проте Україна протягом багатьох років так і не може визначитись із перспективами будівництва нових ядерних установок, які в майбутньому будуватимуться замість енергоблоків, що знімаються з експлуатації. З деякою періодичністю як перспективні реактори розглядають канадські реактори CANDU з важководним теплоносієм, російські ВВЕР, корейські та китайські проекти, а також ММР. Тому в Україні існує актуальна проблема з обранням перспективної реакторної технології з якісно вищими показниками безпеки.

Для обґрунтування вибору типу реакторної установки необхідно розробити наукові і техніко-економічні основи оптимального вибору перспективних ядерних установок для України. Оптимізація вибору має виконуватися за різними показниками, серед яких питання безпеки, техніко-економічні показники, вимоги до конструкційних та інших матеріалів, включаючи технологічні матеріали, будівельні конструкції та ін.

І головне при цьому, щоб обов'язково були максимально враховані можливості виробництва обладнання підприємствами України. На підприємствах України вже давно потрібно розміщувати замовлення щодо виготовлення номенклатури обладнання для АЕС, а не закуповувати його за величезними цінами в Російській Федерації (наприклад, як це робиться

із закупівлею запчастин для дизель-генераторів). Со- ромно за країну, яка володіє високотехнологічними підприємствами, будує космічні ракети, літаки та не може зробити запчастини для дизелів, які проекту- вались у 60-х роках минулого століття.

Нарешті у 2021 р. під час візиту Президента України Володимира Зеленського до Сполучених Штатів Америки підписано меморандум з американською компанією Westinghouse Electric про співпрацю, який передбачає спільне з НАЕК «Енергоатом» будівництво та розміщення в Україні АЕС з реакторами AP1000. Компанія Westinghouse братиме участь у добудові четвертого енергоблока Хмельницької АЕС за техно- логією AP1000 та ще чотирьох енергоблоків інших атомних електростанцій України [5]. Сторони домо- вилися про застосування американської технології AP1000, що є єдиною з технологій реакторів покоління III+, ліцензованою Комісією з ядерного регулювання США, а також у кількох країнах Європи та Азії.

На міжнародній конференції «Атомні можливості для розвитку країни» 22.11.2021 р. НАЕК «Енергоатом» і компанія Westinghouse підписали дві угоди щодо будівництва двох нових енергоблоків на майданчи- ку Хмельницької АЕС [6]. Одна з угод передбачає за- купівлю послуг компанії Westinghouse з проектуван- ня енергоблоків, друга угода — закупівлю тренажера й обладнання з тривалим терміном виробництва.

Станом на 2022 р. серед проектів реакторних установок, які належать до покоління III+, реакторна установка AP1000 компанії Westinghouse є найбільш привабливою для енергетики України за багатьма аспектами:

1. Реактор AP1000 ліцензовано в США, Канаді та деяких інших країнах.
2. Чотири енергоблоки з реактором AP1000 біль- ше чотирьох років експлуатуються на двох АЕС у Ки- таї (Sanmen-1, 2, Haiyang-1, 2) [1].
3. У США на АЕС Vogtle ведеться будівництво двох енергоблоків з реакторами AP1000. Фізичний пуск на першому енергоблоці заплановано на 2022 р.
4. Реактор AP1000 має електричну потужність 1 150 МВт, яка є найменшою серед інших реакторів нового покоління: EPR-1750, APR-1400, ВВЕР-1200. Та- ким чином, потужність AP1000 складає майже 10 % від сумарної потужності всіх джерел електропос- тачання в нічний мінімум літнього електроспоживан- ня в Україні, а відповідно й вимоги до «гарячого» резерву є більш сприятливими.
5. Економічні показники експлуатації AP1000 в Китаї є дуже привабливими. Так, наприклад,

Таблиця 1. Виробництво електроенергії на AP1000 в Китаї (у млрд кВт · г)

Рік	Енергоблок			
	Sanmen-1	Sanmen-2	Hayang-1	Hayang-2
2019	8987	906	9457	9935
2020	8758	8786	8762	9066

у табл. 1 наведено дані щодо виробництва електроенергії на енергоблоках з AP1000 АЕС Китаю. Як бачимо, КВВП лежить у діапазоні 90–99 %, що є одними з найкращих показників серед АЕС світу [1].

Станом на 2022 р. реактор AP1000 є найбільш апробованим серед інших проєктів реакторів третього покоління у тому числі й тому, що в проєкті широко використовуються як існуючі технології, так і пасивні системи безпеки.

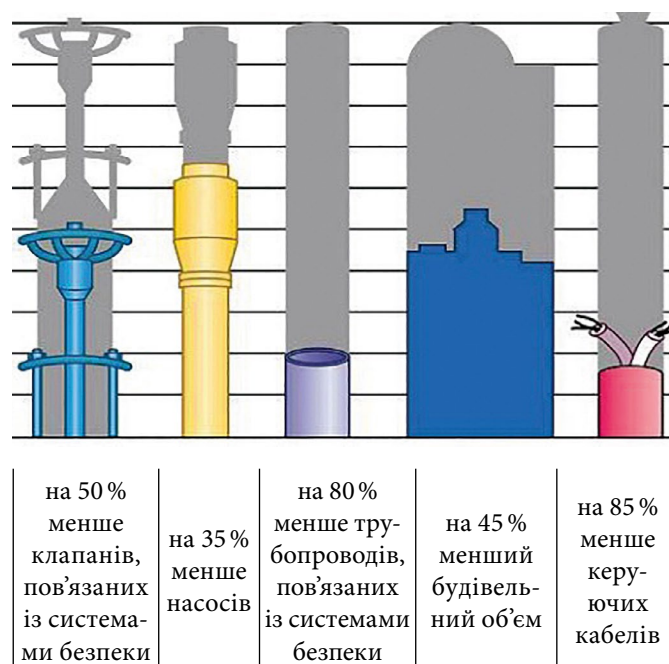
У конструкції також зменшено кількість компонентів, у тому числі труб, кабелів, електроарматури. У порівнянні з попередніми проєктами компанії Westinghouse в проєкті AP1000 зменшено деякі показники (рис. 2) [7].

Економічні показники інших проєктів з реакторами нового покоління є не такими привабливими. Наприклад, КВВП працюючих енергоблоків з EPR-1750, APR-1400, ВВЕР-1200 лежить у діапазоні 70–90 %, що є нижчим, ніж для AP1000 (табл. 2) [1].

Є й інші показники, за якими енергоблоки з AP1000 на першому етапі експлуатації виглядають більш привабливими. Наприклад, на двох з чотирьох енергоблоків з ВВЕР-1200 були проблеми з електрогенераторами, на EPR-1750 проблеми з герметичністю твелів.

Однак і в AP1000 також є проблемні питання.

1. Відомо про проблеми з головними циркуляційними насосами AP1000 як на етапі попередніх випробувань, під час яких було виявлено пошкодження різних елементів ГЦН, так і під час вже промислової

**Рис. 2. Порівняльний аналіз деяких показників AP1000 з попередніми проєктами компанії Westinghouse**

експлуатації на Sanmen-2. У 2019 р. на Sanmen-2 відмовив один з ГЦН, для заміни якого пішов майже цілий рік (див. табл. 1).

2. На перших шести енергоблоках, які вже практично побудовані (чотири в Китаї, два в США) реальні строки будівництва значно перевищують проєкті. Так, наприклад, середні строки будівництва енергоблоків з AP1000 в Китаї складають 8–9 років, у порівнянні з проєктними 4 роками. У США енергоблоки з AP1000 на АЕС також будуються вже більше 8 років [1].

3. Питання щодо вартості будівництва AP1000 також не є вирішеним. Станом на кінець 2021 р. загальна вартість будівництва двох енергоблоків з AP1000 на АЕС Vogtle складає вже більше 20 млрд доларів.

4. Логістичне питання щодо доставки на майданчик АЕС великогабаритних конструкцій і облад-

Таблиця 2. Виробництво електроенергії на сучасних ядерних енергоблоках (у млрд кВт · г)

Рік	EPR-1750		APR-1400	ВВЕР-1200			
	TAISHAN-1	TAISHAN-2	BARAKAN-1	НВАЕС-2-1	НВАЕС-2-2	ЛАЕС-2-1	ЛАЕС-2-2
2017				5620			
2018	3056			7747		2345	
2019	11953	5356		7186	3557	7137	
2020	9170	12455	1562	7602	7603	7531	660

нання. Відомо, що діаметр корпусу реактора AP1000 в районі патрубків складає ~5 м, а діаметр парогенератора ~6 м. Тому традиційна схема доставки обладнання залізницею є неможливою, і для майданчиків Хмельницької, Рівненської та Южноукраїнської АЕС необхідно вирішувати проблему доставки вантажів автотранспортом на великі відстані (більше 100 км).

На жаль, на сьогодні енергоблоки з AP1000 в інших країнах на майданчиках АЕС не будуються. У 2016 р. на рівні керівництва США й Індії було зроблено заяву про наміри будівництва 6 енергоблоків з AP1000 в Індії у штаті Андхра Прадеш, однак до практичних кроків досі так і не перейшли. Також наміри Польщі побудувати 6 реакторів американського виробництва, про які було заявлено в 2020 р., також поки що залишаються намірами. І в самих США було видано 14 ліцензій на будівництво AP1000: по два енергоблока на АЕС Bellefonte, Levy Country, V. C. Summer, Vogtle, W. S. Lee, Turkey Point, Harris [5]. Як відомо, будівництво ведеться тільки на АЕС Vogtle, а на АЕС V. C. Summer будівництво зупинено у 2018 р. Таким чином, за останні 8 років, починаючи з 2013 р., нове будівництво енергоблоків з AP1000 не починалося. Великобританія у 2018 р. обрала технологію EPR-1750 для будівництва заміщуючих потужностей на АЕС Hinkley Point [1].

Таким чином, підсумовуючи наведену інформацію, можна погодитися з визначенням як пріоритетної реакторної технології легководяних реакторів великої потужності технології AP1000 для подальшого врахування під час формування стратегії розвитку ядерної енергетики України. Але цей вибір був отриманий на основі експертних оцінок відповідно до використаного методу багатокритеріального аналізу безпеки, а до експертних оцінок завжди є багато питань. Науковці Інституту проблем безпеки АЕС НАН України мають досвід не тільки у використанні методу багатокритеріального аналізу, а й у практичних роботах з розробки пристроїв для реакторів AP1000, які розробляли для китайських АЕС, а також використання нових видів бетонних сумішей для біологічного захисту. Вважаємо, що досвід наукових установ НАН України буде прийнятий до відома під час будівництва нових ядерних енергоблоків.

У січні 2021 р. НАЕК «Енергоатом» видав окреме доручення щодо підготовки пропозицій стосовно реалізації проекту «Створення українського енергоблока АЕС» із зазначенням першочергових завдань з підготовки до спорудження нових енергоблоків АЕС із максимальною локалізацією виробництва

в Україні. Шкода, що це доручення запізнилося років на 20, тому що за цей час Україна позбавилась будівельників, монтажників, налагоджувальників обладнання та інших фахівців зі спорудження АЕС, які покинули країну в пошуках кращої долі.

Ми всі розуміємо важливість інноваційних технологій для підтримки й розвитку ядерної енергетики. Використання ядерної енергії має розвиток тільки завдяки науково-технічному прогресу. Прикро про це говорити, але в Україні нічого не робиться, щоб підняти інноваційну діяльність у ядерній галузі на відповідний рівень. Поки що «інноваційна діяльність», на жаль, зводиться до закупівлі за кордоном існуючих і не завжди прогресивних технологій і обладнання. У результаті ми бачимо знищення національних наукових шкіл, занепад наукових інституцій тощо.

Згадуючи досвід Китаю, набутий під час спорудження чотирьох енергоблоків з AP1000, є доцільним використання такого досвіду і в Україні. Наприклад, середній рівень локалізації під час будівництва в Китаї цих енергоблоків склав ~55 %. При цьому на першому з чотирьох енергоблоків Sanmen-1 рівень локалізації склав ~25 %, а на четвертому Haiyang-2 — вже ~70 % [8]. Також необхідно відзначити й відому неузгодженість між американськими і китайськими партнерами по проекту під час внесення змін у проектну документацію, а загалом тільки за період з 2009 до 2013 рр. у проект енергоблока Sanmen-1 було внесено 18 000 змін [9].

Висновки

Вибір технології AP1000 як пріоритетної реакторної технології легководяних реакторів великої потужності для подальшого врахування в рамках формування стратегії розвитку ядерної енергетики України є прийнятним, але цей вибір необхідно підтвердити з боку експлуатуючої організації з урахуванням необхідних процедур узгодження відповідного ТЕО та інших заходів відповідно до діючого законодавства України.

Під час обґрунтування рішення щодо вибору AP1000 необхідно звернути увагу на вже відомі проблемні питання щодо впровадження технології Westinghouse, а також досвід КНР.

Національній академії наук України під час формування тематики фундаментальних і прикладних наукових досліджень варто передбачати пріоритетні програми і завдання, спрямовані на вирішення питань, пов'язаних із розвитком ядерної

енергетики, а також забезпечити подальше виконання прикладних досліджень з розробки наукової та техніко-економічної основи оптимального вибору перспективних ядерних установок для України. Оптимізація вибору має виконуватися за різними показниками, серед яких питання безпеки, техніко-економічні показники, вимоги до конструкційних матеріалів, включаючи технологічні матеріали й будівельні конструкції. Також під час проведення оптимізації необхідно максимально враховувати можливості виробництва обладнання підприємствами України.

Вважаємо доцільним рекомендувати ДП НАЕК «Енергоатом» залучати інститути НАН України до робіт, пов'язаних із науково-технічним обґрунтуванням вибору перспективних ядерних установок в Україні, а також пов'язаних з реалізацією проекту «Створення українського енергоблока АЕС» та програми будівництва нових ядерних енергоблоків.

Список використаної літератури

1. The Database on Nuclear Power Reactors // Power Reactor Information System (PRIS); IAEA : official website. — Available at: <https://pris.iaea.org/pris>.
2. Постанова Верховної Ради Української РСР «Про мораторій на будівництво нових атомних електростанцій на території Української РСР» від 02.08.1990 № 134-XII. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/134-12>.
3. Закон України «Про розміщення, проектування та будівництво енергоблоків № 3 і 4 Хмельницької атомної електричної станції» від 06.09.2012 р. № 5217-VI // Відомості Верховної Ради. — 2013. — № 42. — ст. 583.
4. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р]. — 66 с.
5. Енергоатом та Westinghouse підписали Меморандум про будівництво нових енергоблоків в Україні // Енергоатом : офіційний веб-сайт. — Режим доступу: https://www.energoatom.com.ua/ua/press_centra-19/novini_kompanii-20/p/energoatom_ta_westinghouse_pidpisali_memorandum_pro_budivnictvo_novih_energoblokov_v_ukraini-47993.
6. Енергоатом і американська компанія Westinghouse підписали угоди про будівництво в Україні нових атомних енергоблоків // Енергоатом : офіційний веб-сайт. — Режим доступу: https://www.energoatom.com.ua/ua/press_centra-19/novini_kompanii-20/p/

[energoatom_i_amerikanska_kompaniya_westinghouse_pidpisali_ugodi_pro_budivnictvo_v_ukraini_novih_energoblokov-48509](https://www.energoatom.com.ua/ua/press_centra-19/novini_kompanii-20/p/energoatom_i_amerikanska_kompaniya_westinghouse_pidpisali_ugodi_pro_budivnictvo_v_ukraini_novih_energoblokov-48509).

7. Gaio P. Westinghouse. AP1000: The PWR Revisited / P. Gaio // Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21st Century: Proceedings of an International Conference (Vienna, Austria, 27–30 October, 2009).
8. China Nuclear News Weekly Roundup — 07/30–08/03 // NicobarGroup : official website. — Available at: <http://www.nicobargroup.com/news-views-1/?offset=1534152278098>.
9. AP-1000 в Китае — уроки и новые вопросы // atominfo.ru. — Режим доступу: <http://atominfo.ru/newsh/o0557.htm>.

V. I. Borysenko, A. V. Nosovskyi

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

On the Construction of New Nuclear Power Units in Ukraine

The article provides information on the pace of construction and commissioning of nuclear power units at nuclear power plants in the world over the past 60 years. Nuclear energy is the most important factor in ensuring the energy independence of Ukraine. As of 2022, 80% of the entire fleet of Ukrainian nuclear power units (12 out of 15) have already been in operation for more than 30 years. In the world, this figure is 68%. Two power units with VVER-440 reactors have been in operation for more than 40 years, and by 2028 the number of power units at Ukrainian NPPs, that have been in operation for more than 40 years, will increase to 10. Therefore, the need and importance of introducing a program for the construction of new nuclear power units to ensure energy independence of Ukraine are obvious. The article discusses the most important characteristics of the modern AP1000 reactor unit, which is licensed in the USA, Canada and some other countries. Information is presented on the advantages of the AP1000 project over other modern reactor plants EPR-1750, APR-1400, VVER-1200, as well as issues that need to be paid special attention, when performing the relevant stages of work on the justification and implementation of the AP1000 technology in the nuclear power industry of Ukraine. For example, the installed capacity utilization factor of operating power units with EPR-1750, APR-1400, VVER-1200 is lower than for AP1000. When

justifying the decision to choose AP1000, it is necessary to pay attention to the already known problematic issues of implementing Westinghouse technology. It is recommended to involve the institutes of the National Academy of Sciences of Ukraine in the work, related to the scientific and technical substantiation of the choice of promising nuclear installations for Ukrainian NPPs.

Keywords: nuclear power, modern reactor technologies, operation beyond design time, NPP installed capacity, electricity generation.

References

1. *The Database on Nuclear Power Reactors. Power Reactor Information System (PRIS)*. IAEA: official website. Available at: <https://pris.iaea.org/pris>.
2. Resolution of the Verkhovna Rada of the Ukrainian SSR "On the moratorium on the construction of new nuclear power plants in the Ukrainian SSR" dated 02.08.1990, no. 134-XII. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/134-12>. (in Ukr.)
3. Law of Ukraine "On the location, design and construction of power units no. 3 and 4 of the Khmelnytskyi Nuclear Power Plant" dated 06.09.2012, no. 5217-VI. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], 2013, no. 42, art. 583. (in Ukr.)
4. *Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness"*. Approved by the Order of the Cabinet of Ministers dated 18.08.2017 no. 605-p, 66 p. (in Ukr.)
5. *Memorandum on construction of new power units in Ukraine signed between Energoatom and Westinghouse*. Energoatom: official website. Available at: https://www.energoatom.com.ua/en/press_center-19/company-20/p/memorandum_on_construction_of_new_power_units_in_ukraine_signed_between_energoatom_and_westinghouse-47993. (in Ukr.)
6. *Agreements signed between Energoatom and Westinghouse for constructing new nuclear power units in Ukraine*. Energoatom: official website. Available at: https://www.energoatom.com.ua/en/press_center-19/company-20/p/agreements_signed_between_energoatom_and_westinghouse_for_constructing_new_nuclear_power_units_in_ukraine-48509. (in Ukr.)
7. Gaio P. (2009). Westinghouse. AP1000: The PWR Revisited. Proceedings of an *International Conference "Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21st Century"* (Vienna, Austria, 27–30 October, 2009).
8. *China Nuclear News Weekly Roundup — 07/30–08/03*. NicobarGroup: official website. Available at: <http://www.nicobargroup.com/news-views-1/?offset=1534152278098>.
9. *AP-1000 in China — lessons and new questions*. *atominfo.ru*. Available at: <http://atominfo.ru/newsh/o0557.htm>.

Надійшла 29.12.2021

Received 29.12.2021

І. Г. Шараєвський, Т. С. Власенко, Л. Б. Зімін, А. В. Носовський,
Н. М. Фіалко, Г. І. Шараєвський

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

Дослідження спектральних образів нейтронного шуму реакторів типу ВВЕР у нерегламентних теплогідравлічних режимах активних зон

Ключові слова:

реактори ВВЕР,
активна зона,
нейтронний шум,
спектральні характеристики
сигналів,
теплогідравлічні аномалії,
діагностика

Узагальнено відомості про особливості проявів потенційно небезпечних теплогідравлічних аномалій, що непередбачено виникають у процесі експлуатації активних зон реакторів типу ВВЕР. Значну увагу приділено загрозі неконтрольованого виникнення в тепловидільних збірках латентних передаварійних та аварійних експлуатаційних станів під час генерації парової фази на поверхні тепловидільного елемента, включаючи кризу тепловіддачі при подальшому кипінні теплоносія. Відзначено, що в цих умовах тепловіддача, яка має відбуватися виключно в конвективному режимі, характеризується також неконтрольованим виникненням процесу кипіння, від активації перших центрів пароутворення до формування розвиненої пазиркової структури теплоносія. Розглянуто обмежені можливості сучасних технічних засобів моніторингу технічного стану ВВЕР, які не забезпечують виявлення зазначених аномалій та передаварійних режимів тепловіддачі. З огляду на дані про флуктуації потоку нейтронів показано, що шумові складові на виході штатних електронно-емісійних вимірювачів нейтронного потоку несуть важливу діагностичну інформацію, яка наразі втрачається, щодо теплогідравлічних процесів в об'ємі активної зони. З урахуванням цього зроблено висновок про необхідність невідкладної розробки методології оперативної ідентифікації випадкових спектральних реалізацій нейтронного шуму, що реєструється на виходах нейтронних детекторів існуючих систем внутрішньореакторного контролю. Визначено характер необхідних надійних даних про спектральну структуру основних типів діагностичних образів (сигнатур або патернів) нейтронного шуму відповідно до основних типів теплогідравлічних аномалій. Наведено аналіз даних відомих, а також виконаних за участі авторів реакторних експериментів, на основі якого доведено, що спектральна структура авто- та когерентної густини сигналів на виході штатних детекторів нейтронного потоку містить вичерпну діагностичну інформацію стосовно типу та місця локалізації парорідинних структур в активній зоні реактора ВВЕР. З огляду на це проаналізовано інформаційні характеристики окремих спектральних діапазонів нейтронного шуму і зроблено висновки щодо безпосередньої відповідності їх до характерних теплогідравлічних процесів як об'єктів діагностики.

Вступ

Можна вважати доведеним [1, 2], що в процесі експлуатації основних типів конструкцій ядерних

енергоустановок (ЯЕУ) з водо-водяними реакторними установками (РУ) ВВЕР, які відповідно до проєктних вимог у штатних експлуатаційних режимах мають забезпечувати в активній зоні (АкЗ) цього

© І. Г. Шараєвський, Т. С. Власенко, Л. Б. Зімін, А. В. Носовський,
Н. М. Фіалко, Г. І. Шараєвський, 2022

реактора підігрів легководного теплоносія виключно в конвективному режимі тепловіддачі з поверхні тепловидільного елемента (ТВЕЛ), можливим є не прогнозоване виникнення в їхніх тепловидільних збірках (ТВЗ) низки потенційно небезпечних теплогідравлічних аномалій. Показово, що визначальною термодинамічною особливістю цих експлуатаційних порушень теплогідравлічного характеру, що здатні неконтрольовано розвиватися в ТВЗ ядерних реакторів (ЯР) водо-водяного типу, є латентне виникнення нештатного процесу генерації парової фази на поверхні ТВЕЛ. З огляду на високий рівень потенційної загрози, яку являє собою для безпеки ЯР процес виникнення в ТВЗ ВВЕР експлуатаційних аномалій теплогідравлічного характеру, у першу чергу мають бути відзначені не тільки фізичні особливості неконтрольованого виникнення основних типів структурних форм процесу кипіння в АкЗ водо-водяних реакторів, але також розглянуті головні наслідки латентного розвитку цього нештатного режиму експлуатації для безпеки РУ. У цьому контексті також має бути врахована та потенційна загроза, яку несе неконтрольований розвиток процесу генерації парової фази в ТВЗ, верхньою межею трансформації якого, як відомо [3], є криза тепловіддачі та руйнація ТВЕЛ.

Відповідно до фундаментальних постулатів експлуатаційної безпеки РУ [1–3 та ін.], втрата герметичності оболонок ТВЕЛ через виникнення на поверхні їхньої тепловіддачі кризи кипіння теплоносія (або через інші причини) створює реальну загрозу функціонуванню водоохолоджуваних (ВО) ЯР. Водночас, спираючись на дані аналізу сучасного стану технічних засобів систем внутрішньореакторного контролю (СВРК) [4], треба звернути увагу на те, що ці засоби в структурі існуючих комп'ютерних комплексів моніторингу та діагностики технологічних параметрів сучасних ЯЕУ не забезпечують можливості оперативного виявлення та надійної ідентифікації в процесі експлуатації ЯР низки потенційно небезпечних аномальних та передаварійних теплогідравлічних процесів (ТГП) в ТВЗ РУ. Серед цих експлуатаційних порушень, насамперед, такі фазові перетворення, як початок генерації парової фази та подальший розвиток структурних форм двофазного потоку аж до виникнення кризи тепловіддачі під час кипіння. У той же час слід відзначити, що надійність діючих та створюваних РУ типу ВВЕР, включаючи перспективні ВО ЯР цього класу з надкритичними термодинамічними параметрами (НКП) легководного теплоносія, може

бути істотно підвищена, у першу чергу на основі розробки та створення інтегрованих до структури перспективних СВРК якісно нових засобів оперативної діагностики теплогідравлічних режимів ТВЗ. Визначальним при цьому є те, що зазначені діагностичні засоби нового покоління мають забезпечити надійний контроль ТГП в АкЗ ВВЕР, який наразі є відсутнім. З цих позицій як об'єкти оперативної діагностики (тобто, насамперед, раннього автоматичного виявлення) слід розглядати всі нерегламентні режими генерації парової фази на поверхні ТВЕЛ та структурні форми двофазного потоку, починаючи з такої вихідної теплогідравлічної аномалії, якою є режим активації перших центрів пароутворення. З огляду на це образи (тобто сигнатури або патерни) експлуатаційних порушень теплогідравлічного характеру в АкЗ реакторів типу ВВЕР підлягають дослідженню та систематизації як основа для розробки алгоритмів їхньої автоматичної ідентифікації. Використання в якості діагностичних ознак цих образів спектральних параметрів нейтронного шуму в АкЗ реакторів ВВЕР під час вирішення завдань оперативного контролю теплогідравлічного стану АкЗ ВО ЯР, як показано в роботі [4], не має альтернативи.

Показово, що вищезазначена безпекова концепція є загальноновизнаною і підлягає реалізації на основі розробки не тільки принципово нових підходів до автоматичної ідентифікації аномальних та передаварійних ТГП в АкЗ, але й нових фізичних принципів, що полягають у використанні прихованої діагностичної інформації, яка міститься в шумах технологічних параметрів РУ: флуктуацій нейтронного шуму, температури, тиску та ін. Особливо це стосується флуктуаційних складових сигналів нейтронного потоку в АкЗ ВВЕР, оскільки ці сигнали (тобто нейтронний шум) забезпечують можливість оперативного контролю всього об'єму АкЗ на основі вже існуючих СВРК. З огляду на дані досліджень [2–4 та ін.], пріоритетною науковою проблемою є розробка методології оперативної автоматичної діагностики АкЗ ВО ЯР, що включає створення спеціалізованого математичного та програмного забезпечення, а також реалізацію відповідних програмно-технічних засобів для забезпечення в реальному часі процедур автоматичної ідентифікації теплогідравлічних аномалій. Як відзначено вище, необхідну практичну основу для реалізації відповідних алгоритмів автоматичної шумової діагностики порушень теплогідравлічного характеру мають складати дані системного аналізу спектральної структури та інформаційної значущості

окремих ділянок спектра нейтронного шуму ВО ЯР. Розгляду й систематизації результатів експериментальних досліджень, що були виконані за останні роки в цьому актуальному науковому напрямі, і присвячено цю наукову публікацію.

Фізика теплогідрравлічних аномалій у реакторах із до- та надкритичними параметрами теплоносія. Матеріалознавчі аспекти пошкоджуваності ТВЕЛ

У контексті системного аналізу фізичних особливостей виникнення теплогідрравлічних аномалій у некиплячих реакторах типу ВВЕР, а також можливого впливу цих аномалій на безпеку РУ мають розглядатися два визначальних експлуатаційних діапазони термодинамічних параметрів АкЗ ВО ЯР: а) докритичний, що є робочим для всіх існуючих та розроблюваних типів РУ третього покоління з реакторами водо-водяного типу; б) надкритичний, який розглядається як перспективний при створенні пілотних зразків РУ четвертого покоління [5, 6]. З огляду на принципові фізичні відмінності перебігу процесів теплообміну в АкЗ РУ з до- та надкритичними параметрами теплоносія під час аналізу проблематики теплогідрравлічної надійності ЯР третього та четвертого покоління мають бути відзначені нижченаведені визначальні фізичні аспекти безпекової проблематики цих типів реакторів.

Як відомо [2, 3], процеси кипіння теплоносія в АкЗ реакторів типу ВВЕР з докритичними параметрами, що за певних умов (наприклад, при форсуванні теплової потужності ЯР) можуть виникати в їхніх ТВЗ, є фізично зумовленими неконтрольованою оперативним персоналом стохастичною динамікою виникнення та подальшого розвитку процесу фазового переходу. Нижньою межею цього процесу є фізично нечітка ймовірнісна область активації перших центрів пароутворення, що дає початок можливому прихованому розвитку парорідинних структур з підвищеним паровмістом у ТВЗ. Характерно, що ці латентні (для оперативного персоналу) структури можуть бути представлені не тільки пазирковим режимом плинну двофазного теплоносія, але також снарядною, емульсійною, дисперсно-кільцевою його структурними формами, що відрізняються наявністю в них розвинених парових структур. При цьому верхньою межею такого динамічно сформованого в реакторному каналі по його висоті парорідинного конгломерата є короткотерміновий (терміном у декілька секунд)

аварійний теплогідрравлічний процес виникнення на поверхні ТВЕЛ стійких парових плівок (тобто кризи тепловіддачі 1-го роду), який призводить до незворотної руйнації відповідних конструкцій.

Таким чином, прихована перманентна генерація парової фази в ТВЗ реакторів ВВЕР з докритичними термодинамічними параметрами АкЗ обґрунтовано розглядається спеціалістами як потенційна загроза безпеці ВО ЯР. Показово, що цей парорідинний конгломерат, який формується по висоті ТВЗ, попередньо (на окремих ділянках реакторного каналу знизу догори за течією потоку) проявляє себе через виникнення таких характерних структурних форм двофазного потоку: 1) режим активації перших центрів пароутворення, що являє собою нижню межу процесу початку кипіння теплоносія; 2) структура розвиненого пазиркового кипіння з переходом до снарядного, емульсійного та кільцевого режимів плинну двофазного теплоносія в ТВЗ; 3) режим пазирково-плівкового кипіння з коагуляцією окремих центрів пароутворення в локальні нестабільні парові плівки (їхнє виникнення безпосередньо передуює розвитку аварійного режиму кризи тепловіддачі); 4) аварійний режим стійких парових утворень, формування яких безпосередньо ініціює розвиток кризи тепловіддачі та швидкоплинну руйнацію ТВЕЛ. З огляду на цю аварійну динаміку слід відзначити:

1) своєчасне виявлення на основі комплексу інформативних діагностичних ознак, зокрема таких, як параметри нейтронного шуму, перших двох із вищеперелічених початкових типів парових структур, відповідно до результатів циклу досліджень [4], слід розглядати як необхідну фізичну передумову для реалізації превентивної оперативної діагностики АкЗ ВВЕР із метою своєчасного запобігання руйнації ТВЕЛ унаслідок виникнення кризи тепловіддачі в ТВЗ;

2) до теперішнього часу спеціалісти з реакторної теплофізики вважали, що початок генерації парової фази на поверхні ТВЕЛ у ТВЗ реакторів ВВЕР не несе безпосередньої загрози штатній експлуатації ТВЕЛ, оскільки не може призводити до проникаючого пошкодження їхніх оболонок;

3) як показали окремі дослідження для ВО ЯР для виробництва плутонію, які використовують алюмінієві оболонки ТВЕЛ (ці роботи свого часу було започатковано експериментами [7–9]), виникнення теплогідрравлічних аномалій у ТВЗ у вигляді розвинених пазиркових структур є здатним ініціювати появу наскрізних проникаючих пошкоджень не тільки алюмінію, але також і цирконію;

4) експериментально було встановлено, що в області бульбашкового кипіння на поверхні тепловіддачі під діючими центрами пароутворення виникають пульсації температури з частотою у декілька десятків герц та флуктуації температури поверхні тепловіддачі з амплітудою до трьох десятків градусів. При цьому зазначені параметри коливань залежать від густини теплового потоку, масової швидкості теплоносія, а також довжини ділянки обігріву ТВЕЛ;

5) як свідчать результати теплофізичного аналізу цієї проблеми, виконаного в монографії [2], визначальною причиною множинних наскрізних пошкоджень і пов'язаного з ними порушення герметичності ТВЕЛ у режимі поверхневого кипіння теплоносія на його поверхні можуть бути термічні напружки, що виникають у матеріалі оболонок за умов температурних пульсацій, пов'язаних зі швидкоплинним випарюванням мікрошару завтовшки в декілька мікрон, що формується в основі зростаючого парового бульбашки.

Відповідно до результатів роботи [10], в якій розглянуто сучасну проблематику теплогідрравлічної безпеки перспективних реакторів ВВЕР із НКП легководного теплоносія, можна стверджувати:

1) існує достатньо глибока фізична аналогія між процесом генерації парової фази в докритичних ВО ЯР та процесом псевдофазового переходу в перспективних реакторах ВВЕР із НКП;

2) наявність псевдокипіння в умовах НКП робить неадекватним розгляд надкритичного теплоносія як однофазної системи, в якій фазові перетворення є неможливими;

3) виникнення перших псевдопарових утворень в області НКП, що генеруються рухомими осередками турбулентних вихорів у пристінковому шарі надкритичного теплоносія, становить необхідну фізичну передумову для подальшого переходу цього початкового режиму псевдобульбашкового кипіння до його аварійного псевдоплівкового різновиду;

4) виникнення режиму псевдоплівкового кипіння є фізичною першопричиною розвитку аварійного режиму погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в умовах НКП;

5) у цих умовах спектральна структура акустичної емісії процесу псевдофазового переходу в навколотокритичній області адекватно характеризує визначальні фізичні особливості псевдокипіння, що реалізується на молекулярному рівні;

6) спектральні параметри акустичних (акусто-емісійних) та нейтронношумових діагностичних сигналів відзначаються певною подобою, що дає

принципову можливість використання нейтронношумових сигналів для оперативної діагностики процесу псевдофазового переходу в умовах НКП;

7) відсутність на теперішній час пілотних зразків перспективних реакторів ВВЕР із НКП унеможливає отримання реальної нейтронношумової діагностичної інформації стосовно потенційно небезпечних теплогідрравлічних аномалій в АкЗ цих ЯР;

8) наявність реальних експериментальних даних зі спектральних параметрів нейтронного шуму в докритичних реакторах ВВЕР може розглядатися як необхідне фізичне підґрунтя та засаднича передумова для розробки діагностичних підходів та створення методології оперативної превентивної діагностики діючих та перспективних ВО ЯР.

З урахуванням конкретизованих вище діагностичних завдань, що підлягають реалізації в реакторах ВВЕР докритичного та надкритичного термодинамічних діапазонів АкЗ, доцільним є системний аналіз отриманих на теперішній час експериментальних результатів, а також систематизація інформаційних характеристик нейтронного шуму. Розгляд цих актуальних наукових питань наведено в наступних розділах цієї публікації.

Аналіз інформаційних характеристик спектральних параметрів одномірних сигналів нейтронного шуму

Відповідно до даних роботи [4] слід відзначити:

1. Визначальні ймовірнісні характеристики акустичного та нейтронного шуму в АкЗ енергетичних ВО ЯР відповідно до умов генерації парової фази на поверхні ТВЕЛ є подібними. Зокрема, це стосується стаціонарного характеру цих діагностичних сигналів в умовах сталості режимних параметрів процесу теплообміну, а також широкополосної структури та близької до рівномірної спектральної густини.

2. Частотний діапазон, а також особливості й характер спектрального складу автоспектральної густини (АСГ) нейтронного шуму як стаціонарного випадкового процесу в цілому є подібними до відповідних характеристик акустичних сигналів у киплячому теплоносії. Параметри функцій просторової когерентності акустичних і нейтронних двомірних шумових сигналів у ТВЗ містять важливу діагностичну інформацію щодо характеру фазового переходу на поверхні ТВЕЛ. Врахування даних фазового спектра двомірного діагностичного сигналу, що сформований відповідними парами одномірних сигналів де-

текторів прямого заряду (ДПЗ), що встановлені в каналах нейтронних вимірювань (КНВ) АкЗ реакторів ВВЕР, дає змогу забезпечити триангуляційну діагностику ТВЗ, тобто ідентифікувати тип теплогидравлічної аномалії на відповідній ділянці нейтронного вимірювального каналу.

3. Ознаковий діагностичний простір, що сформований на основі параметрів когерентної спектральної густини (КСГ) двовимірного акустичного або нейтронного сигналу, містить важливу діагностичну інформацію про структурні характеристики двофазного потоку на ділянці, що обмежена парами ДПЗ, які утворюють лінійну просторову структуру. Фізичний взаємозв'язок між параметрами КСГ, виміряними на відповідній ділянці КНВ, та режимом плинну парорідного потоку в ТВЗ між цими парами нейтронних детекторів має ймовірнісний характер.

4. Наявність фізично зумовленого ймовірнісного взаємозв'язку між параметрами КСГ двовимірних діагностичних сигналів у РУ водо-водяного типу створює принципову основу для можливості ідентифікації областей локалізації аномальних і аварійних режимів тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в об'ємі АкЗ реактора ВВЕР.

Враховуючи вищеперелічені фізико-математичні аспекти, що їх обґрунтовано в роботі [4], слід звернути увагу на відомі результати досліджень спектральної структури одно- та двовимірних сигналів нейтронного потоку в АкЗ ВО ЯР. Показовою в цьому діагностичному контексті є, зокрема, робота [11], яка відображає типові підходи до якісної оцінки стану АкЗ ВО ЯР на основі попереднього моніторингу та подальшого евристичного аналізу результатів вимірювань. Типові результати цих досліджень наведено на рис. 1 з роботи [11].

Подібні якісні підходи використовували також інші автори наступних за хронологією досліджень, які також обмежувались якісним описом зміни спектральної структури АСГ і КСГ нейтронного шуму в умовах перебігу теплогидравлічних режимів в експериментальній ТВЗ ЯР. Показово, що в кожній із цих робіт для аналізу спектральної структури діагностичних сигналів використовувався детермінований підхід, що передбачає граничні рівні спектральної інтенсивності в певних частотних діапазонах АСГ або КСГ. Безумовно, надійність діагностичних рішень на основі такого спрощеного підходу була неприйнятно низькою. Неефективність подібного детермінованого підходу до ідентифікації стохастичних діагностичних сигналів є очевидною для спеціалістів [12, 13 та ін.]. Проте, незважаючи на всебічне теоретичне обґрун-

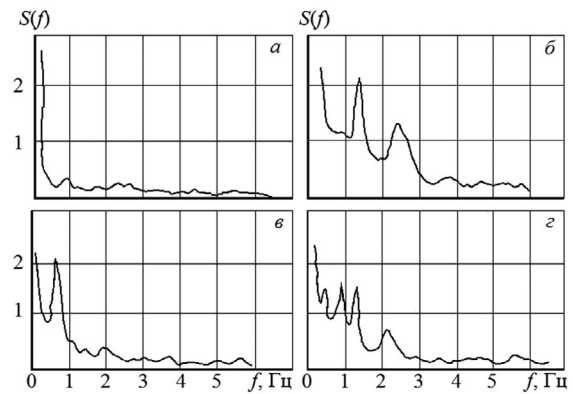


Рис. 1. Характер частотної структури АСГ нейтронного шуму в дослідницькому ЯР ВВР-СМ у різних теплогидравлічних режимах АкЗ: режим конвективної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в умовах вільної (а) та примусової (б) циркуляції теплоносія; режим поверхневого кипіння у ТВЗ в умовах вільної (в) та примусової (г) циркуляції [11]

тування неспроможності детермінованих вирішальних правил для вирішення завдань автоматичної класифікації випадкових об'єктів, спроби застосування цих правил не припинялися й у наступні роки (відповідна бібліографія наведена в [4]). Так, наприклад, у роботі [14] відзначається, що «при значному збільшенні середньоквадратичних флуктуацій температури і збереженні високої когерентності між сигналами нейтронного потоку на вході й виході з АкЗ можна стверджувати про наявність кипіння з недогрівом». Суб'єктивізм та низька ефективність таких якісних описів у проектній документації для перспективної діагностичної системи АкЗ ВВЕР є очевидною.

Неадекватність таких суттєво спрощених (фактично детермінованих) вирішальних правил, у яких використовуються граничні рівні дисперсії діагностичного сигналу або рівні інтенсивності певної множини його спектральних ознак, як це реалізовано, наприклад, у [15], є характерною рисою для більшості наступних досліджень. Висновок авторів [14] про те, що «збереження високої когерентності між сигналами нейтронного потоку на вході й виході з АкЗ свідчать про наявність кипіння з недогрівом» також не можна визнати обґрунтованим, оскільки це твердження суперечить висновкам відомих робіт, наприклад, [16]. Так, із використанням моделі ідентифікації режимів кипіння на основі «спостереження за частотою акустичних стоячих хвиль» на основі підходів, запропонованих раніше в роботі [17], авторами [14] було зроблено невдалу спробу практичної реалізації цієї моделі. Такий результат слід вважати очікуваним,

оскільки в роботі [1] уже була обґрунтована фізична неадекватність такого підходу до класифікації теплогідравлічних режимів парогенеруючого каналу.

У контексті аналізу інформативності спектральних характеристик нейтронного шуму в АкЗ, тобто параметрів АСГ і КСГ, що мають розглядатися як діагностичні ознаки, треба звернути увагу на наступний методичний недолік, який притаманний переважній більшості досліджень в області нейтронношумової діагностики теплогідравлічних режимів ЯР. У цьому разі мова йде, у першу чергу, про відсутність у відомих роботах температурного контролю ТВЗ ЯР, що в більшості випадків практично не дало можливості класифікувати зареєстровані в експериментах АСГ і КСГ нейтронного шуму відповідно до характерних ділянок температурних режимів поверхні тепловіддачі ТВЕЛ у процесі підвищення потужності АкЗ. Такий методичний недолік зумовлює значну невизначеність фактичних меж теплогідравлічних режимів в експериментальному каналі. Так, зокрема, у переважній більшості досліджень перехід до режиму початку кипіння в ТВЗ дослідницьких ЯР визначався за непрямими ознаками, через що експертна оцінка моменту переходу до початку генерації парової фази в АкЗ була суто суб'єктивною. З огляду на ці методичні вимоги слід зазначити таке. Імовірнісний, тобто фізично нечіткий характер меж, що існують між теплогідравлічними режимами в реакторному каналі, а також суб'єктивний характер експертних оцінок під час визначення спектральних образів кожного з типів теплогідравлічних аномалій унеможливають застосування не тільки детермінованих підходів до класифікації теплогідравлічних режимів, але також суттєво знецінюють суб'єктивну оцінку розташування фізичних меж між цими режимами. З урахуванням очевидних технічних труднощів, що є притаманними всім фізичним експериментам з термометрією поверхні реальних ТВЕЛ в АкЗ ЯР, надійні експериментальні дані щодо термометрії цих поверхонь в експериментальній ТВЗ реактора ВВЕР-440 було отримано тільки в роботі [18].

Показово, що аналіз частотної структури АСГ у режимі конвективної тепловіддачі та при пузирковому кипінні теплоносія за даними [11, 18] свідчать про високу інформативність спектральних ознак нейтронного шуму, також про принципову можливість розпізнавання пузиркового режиму плин двохфазного потоку у ТВЗ ЯР по параметрах АСГ сигналів ДПЗ. У той же час ніяких конкретних рекомендацій щодо розробки алгоритмів автоматичної класифіка-

ції теплогідравлічних режимів ТВЗ за параметрами нейтронного шуму у ВО ЯР автори наявних у відкритому доступі публікацій не надають. Проте на основі наявних експериментальних даних можна зробити важливий практичний висновок. Зміна частотної структури сигналів ДПЗ реактора ВВЕР, що реєструється під час переходу відповідної ділянки ТВЗ від конвективної тепловіддачі до процесу генерації парової фази, має у своїй основі зумовлене фазовим переходом локальне збурення термалізаційних властивостей уповільнювача, яке безпосередньо обумовлює зміну спектра енергії нейтронів, що дифундують у цьому об'ємі АкЗ. Наведені далі результати досліджень спектральних параметрів КСГ підтверджують цей висновок.

Аналіз інформаційних характеристик спектральних параметрів двомірних сигналів нейтронного шуму

На відміну від режимних параметрів процесу тепловіддачі (тиску, масової швидкості та недогріву теплоносія) істотно більший вплив на спектральні характеристики нейтронного шуму має місце розташування детектора нейтронного потоку: усередині АкЗ або поза нею. Ілюстрацією цієї тези може бути рис. 2, наведений за даними роботи [11], на якому подано результати синхронної реєстрації АСГ флуктуацій нейтронного потоку у ВО ЯР типу PWR під час використання нейтронного детектора типу ДПЗ, а також під час вимірювань нейтронного шуму позазонними іонізаційними камерами.

Як свідчать ці результати, детектори типу ДПЗ, що розташовані безпосередньо в об'ємі АкЗ, дозволяють виявити важливі особливості структури спектрів флуктуацій нейтронного потоку, які при застосуванні позазонних сенсорів принципово не можуть бути виявлені. Представлені для порівняння на рис. 3 за даними [18] КСГ сигналів внутрішньозонних ДПЗ (а, б, в), а також іонізаційних камер (г), що їх було встановлено поза корпусом реактора, підтверджують цей висновок.

У цьому контексті необхідно також звернути увагу на параметри КСГ двомірного сигналу нейтронного шуму, що може бути сформований на основі використання штатних вимірювальних засобів, утворених парами сигналів суміжних ДПЗ саме в цьому КНВ. Як свідчать ці дані, поява парової фази на контрольованій ділянці ТВЗ, яка оснащена КНВ, що утворює лінійну просторову структуру ДПЗ, зумовлює відповідну трансформацію частотної структури КСГ.

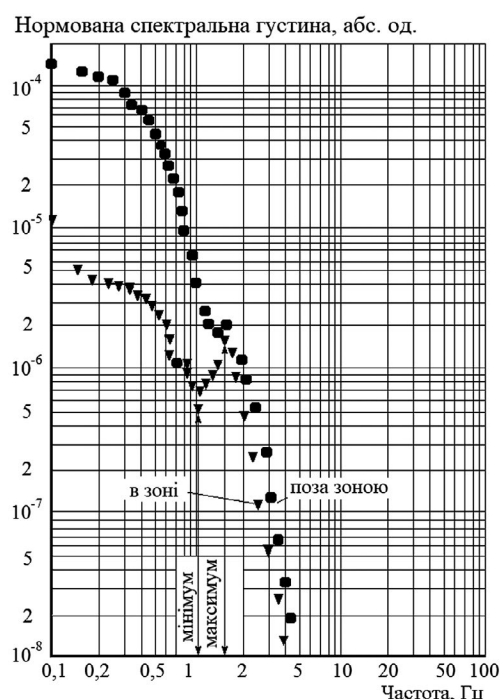


Рис. 2. Результати синхронної реєстрації АСГ флуктуацій нейтронного потоку в ЯР типу PWR при використанні внутрішньозонного нейтронного детектора та при вимірюванні нейтронного шуму поза корпусом ЯР [11]

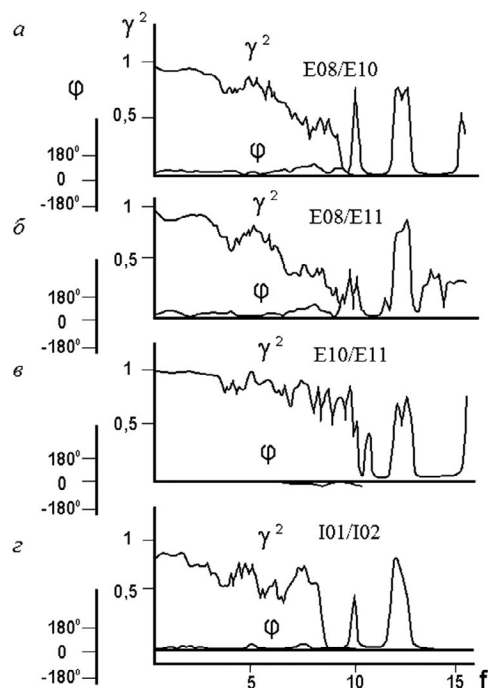


Рис. 3. Когерентний (γ^2) і фазовий (ϕ) спектри двовірних діагностичних сигналів в експериментальній ТВЗ реактора ВВЕР-440 в конвективному режимі тепловіддачі для двовірних діагностичних сигналів, сформованих виходами: а) ДПЗ E08 і E10; б) ДПЗ E08 і E11; в) ДПЗ E10 і E11; г) іонізаційних камер I01 та I02 [18]

Остання принципово може бути виявлена на основі відповідного алгоритму ідентифікації цих спектральних образів. З огляду на такий фізичний зв'язок важливим видається аналіз частотної структури КСГ двовірного нейтронношумового сигналу, що сформований виходами суміжних сенсорів ДПЗ у КНВ у режимі конвективної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ у процесі експлуатації реактора ВВЕР-440. Ці експериментальні результати, що представлені реалізаціями АСГ та КСГ, обчисленими з аналогових виходів ДПЗ реактора ВВЕР-440, представлено на рис. 4 за даними роботи [19]. Проте слід зазначити, що систематичні дослідження параметрів функції просторової когерентності в ТВЗ реакторів типу ВВЕР за умови забезпечення термометрії поверхні ТВЕЛ у жодному з відомих досліджень (за винятком роботи [4], дані якої наведено далі) до цього часу не були виконані.

На рис. 5, за даними роботи [11], представлено результати реєстрації АСГ нейтронного шуму в дослідницькому ВО ЯР в умовах появи механічного ушкодження органу регулювання, що спричинило зміну вібраційного стану цього структурного еле-

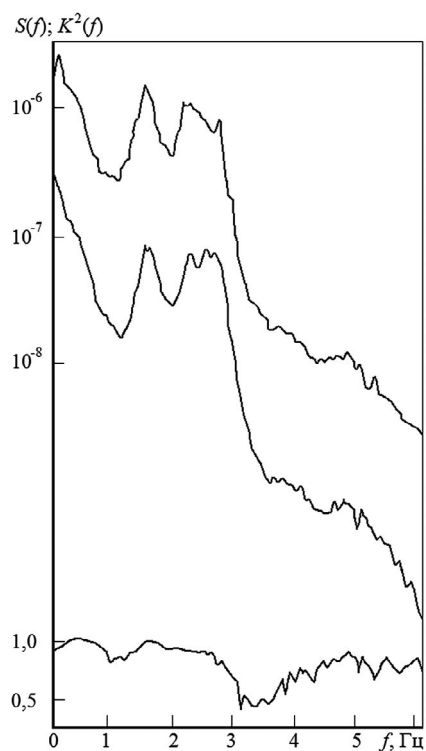


Рис. 4. Характер частотної структури АСГ і КСГ нейтронного шуму, зареєстрованого в АкЗ ВВЕР-440 на номінальному рівні його потужності (одно- та двовірний діагностичний сигнали сформовані виходами двох ДПЗ, відстань між якими становить 800 мм) [19]

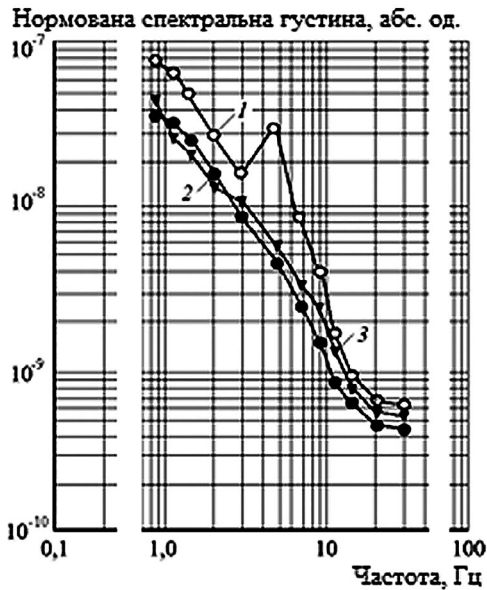


Рис. 5. Типові результати вимірювань АСГ нейтронного шуму в дослідницькому водо-водяному ЯР з появою механічного дефекту в його органі регулювання: 1 — при обірваній тязі одного керуючого стрижня; 2 — після ремонту; 3 — перед появою дефекту [11]

мента РУ. Зіставлення АСГ нейтронного шуму, зареєстрованої в цих вимірюваннях, зі структурою спектрів флуктуацій нейтронного потоку в режимі пухиркового кипіння в реакторі такого ж типу на рис. 1, в за даними роботи [11], а також на рис. 6, а для дисперсно-кільцевої структури плин у каналі водо-водяного дослідницького ЯР [11] свідчить про те, що спектральні діапазони вібраційних процесів в АкЗ і процесів, пов'язаних із генерацією пари в каналах ЯР (див. рис. 1, в і рис. 6, а) істотно відрізняються, причому спектральні компоненти, обумовлені фазовим переходом у теплоносії, є більше низькочастотними.

Наведені на рис. 6 і 7 за даними роботи [11] експериментальні результати, що включають спектрограми сигналів ДПЗ в експериментальному каналі водо-водяного дослідницького реактора МТР, а також осцилограми сигналів ДПЗ в умовах плин у цьому дослідницькому каналі основних типів парорідинних структур являють собою особливий інтерес, оскільки вперше отримані для області високих паровмістів. Спектрограма на рис. 6, а відповідає сигналу верхнього із групи ідентичних нейтронних детекторів однієї вимірювальної збірки КНВ. Показово, що ці вимірювання виконано у верхній частині парогенеруючого експериментального каналу, в якій досягаються паровмісти, що відповідають дисперсно-кільцевій структурі двофазного потоку.

Важливим є те, що наведені на рис. 7 осцилограми відображають сигнали ДПЗ, зареєстровані на виходах КНВ в умовах існування в реакторному каналі ВО ЯР різних типів парорідинних структур. Так, на рис. 7, б чітко виражені періоди снарядних структур, що рухаються в ТВЗ (вони добре корелюють з відомими характеристиками цього специфічного режиму плин двофазного потоку). Визначальні фізичні особливості цього та інших режимів плин наведено в монографії [2]. Але в роботі [11], попри наявний у ній представницький експериментальний матеріал, жодних підходів до об'єктивної кількісної класифікації сигналів ДПЗ, що були зареєстровані авторами цієї роботи в експериментальному каналі дослідницького ВО ЯР, не було запропоновано. Типовим для якісних описів зміни звичайно одного статистичного параметра (наприклад, дисперсії сигналу) з роботи [11] є, зокрема, такий: «...в пухирковому режимі плин дисперсія сигналу нейтронного шуму зменшується, причому при переході до снарядної структури вона зростає і має тенденцію до наступного зростання в дисперсно-кільцевому режимі плин теплоносія». Очевидно, що якісні описи такого характеру не можуть бути практично використані як основа для надійного розпізнавання реалізацій нейтронного шуму, що зареєстровані у ВО ЯР. А втім порівняння структури та частотних параметрів осцилограм сигналів внутрішньозонних нейтронних детекторів у режимах початку кипіння (див. рис. 7, г), а також конвективної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ (див. рис. 7, д), які були отримані в [11] за допомогою безінерційних ДПЗ комптонівського типу, з осцилограмами сигналів акустичного шуму в парогенеруючих каналах, що наведені в роботах [2, 4], свідчить про універсальний характер фізики генерації парової фази, що реєструється акустичними та нейтронними сенсорами. Ця універсальність свідчить не тільки про принципову можливість розпізнавання режиму початку кипіння в каналах ЯР за параметрами нейтронного шуму, але також і про відому єдність фізичних проявів процесу фазового переходу на поверхні ТВЕЛ у сигналах різних типів діагностичних систем, заснованих на різних принципах — акустичних і нейтронних.

Цей висновок підтверджують також дані роботи [11] щодо частотної структури АСГ і КСГ нейтронного шуму в дисперсно-кільцевому режимі плин, що представлені на рис. 6. Порівняння спектрального складу КСГ нейтронно-шумових сигналів для цієї структурної форми двофазного потоку (рис. 6, б) з

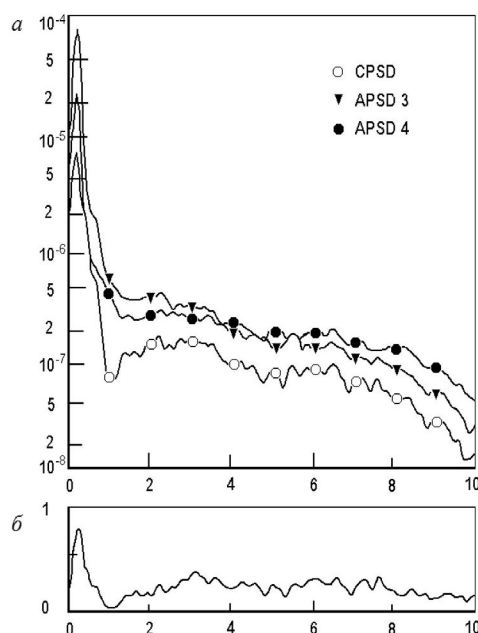


Рис. 6. Характер частотної структури: а) авто- (APSD) та взаємноспектральної (CPSD) густини сигналів ДПЗ № 3 ($z = 500$ мм) і № 4 ($z = 600$ мм) у киплячому каналі реактора МТР; б) когерентної спектральної густини двовимірного сигналу від ДПЗ № 3 і № 4 за даними [11]

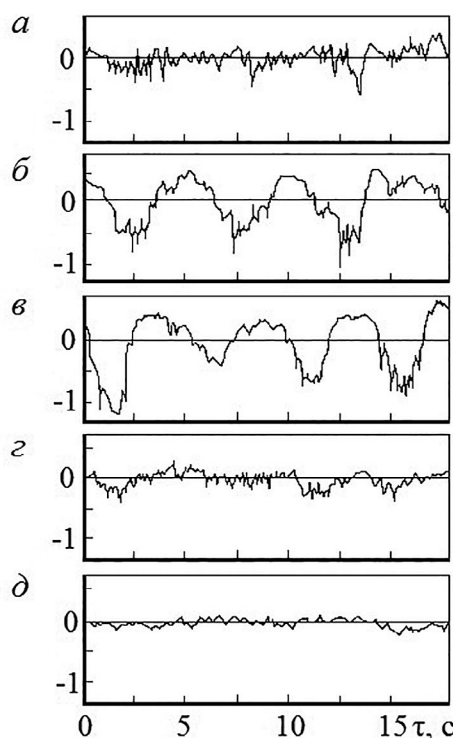


Рис. 7. Результати синхронної реєстрації сигналів ДПЗ, розташованих у киплячому каналі дослідницького водо-водяного реактора МТР з аксіальними (від входу) координатами Z : а) 600 мм; б) 500 мм; в) 400 мм; г) 300 мм; д) 100 мм за даними [11]

даними монографії [2] щодо АСГ акустичного шуму в області паровмістів, відповідних дисперсно-кільцевому режиму плинну, свідчить про те, що різке зниження (зрив функції) когерентності в КСГ двовимірних діагностичних сигналів слід очікувати саме в області інфранизких частот.

Підтверджують зазначений висновок щодо характерних змін частотної структури функції просторової когерентності двовимірних сигналів нейтронного шуму в киплячому каналі при збільшенні паровмісту двофазного потоку у процесі переходу від початку кипіння на поверхні ТВЕЛ до бульбашкового, слябного й дисперсно-кільцевого режимів плинну результати експериментів [18], представлені на рис. 3, в. Наведена на цій ілюстрації функція просторової когерентності нейтронного шуму відповідає конвективному режиму тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ і є обчисленою за результатами вимірювань двовимірного діагностичного сигналу, який сформований паровміст суміжних ДПЗ одного КНВ з нейтронних детекторів, розташованих на відстані $l = 0,4$ м у верхній частині каркасної труби експериментальної термометричної ТВЗ реактора ВВЕР-440. Спектральна структура КСГ нейтронного шуму, представлена на рис. 3, в, а також дані аналогічних вимірювань, виконаних у [19] для конвективного режиму тепловіддачі у ТВЗ ВВЕР-440 (див. рис. 4), свідчать про те, що частота зриву когерентності за відсутності кипіння на поверхні ТВЕЛ відповідає більш високочастотному, ніж для дисперсно-кільцевої структури (див. рис. 7, б), діапазону. Таким чином, представлений вище системний аналіз відомих експериментальних даних свідчить про наявність фізичного ефекту зниження частоти зриву когерентності в КСГ нейтронного шуму у процесі переходу теплогидравлічних режимів у ТВЗ ЯР до структурних форм двофазного потоку, що відзначаються підвищеними значеннями паровмісту.

Представлена на рис. 8 за даними роботи [16] типова АСГ нейтронного шуму, що була зареєстрована штатним ДПЗ реактора ВВЕР-1000 в режимі конвективної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ цього ЯР в умовах номінального рівня його теплової потужності, за своєю спектральною структурою є подібною до наведених вище спектрів сигналів ДПЗ в АкЗ менших реакторів. Детальний аналіз спектральної структури сигналів ДПЗ ВО ЯР наведено в роботах [4, 20].

З огляду на представлені вище експериментальні дані та результати їхнього узагальненого аналізу в [4, 20], насамперед, має бути відзначена

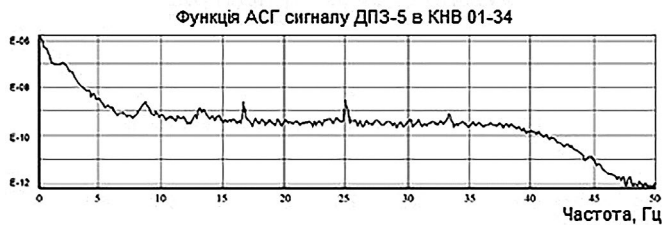


Рис. 8. Типова АСГ сигналу ДПЗ у режимі конвективної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ у ТВЗ ВВЕР-1000 на номінальному рівні потужності [16]

нижченаведена фізична особливість формування ознакового простору двовірних діагностичних сигналів із лінійних просторових структур ДПЗ у КНВ, а саме: а) різні комбінації пар ДПЗ у межах одного КНВ мають суттєво відмінну інформаційну цінність; б) не всі пари нейтронних сенсорів можуть бути використані для формування інформаційно значущих двовірних сигналів; в) лише інформативні (тобто фізично адекватні процесу генерації парової фази та формуванню відповідних типів двофазних структур уздовж аксіальних координат ТВЗ) пари ДПЗ із конкретних КНВ можуть розглядатися як діагностичні сенсори, сигнали яких мають бути покладені в основу формування представницьких статистичних масивів даних для обчислення КСГ основних класів теплогідрравлічних аномалій у ТВЗ ВО ЯР. Як таку типову малоінформативну пару комбінацій сенсорів РУ на рис. 9 за даними роботи [16] представлено КСГ двовірного діагностичного сигналу, сформованого виходами іонізаційної камери реактора ВВЕР-1000 та сенсора динамічного тиску, встановленого на напорі циркуляційного насоса ГЦН-195М. Показово, що спектральна структура КСГ цього двовірного сигналу практично не змінюється при виникненні в АкЗ початку генерації парової фази та інших видів теплогідрравлічних аномалій.

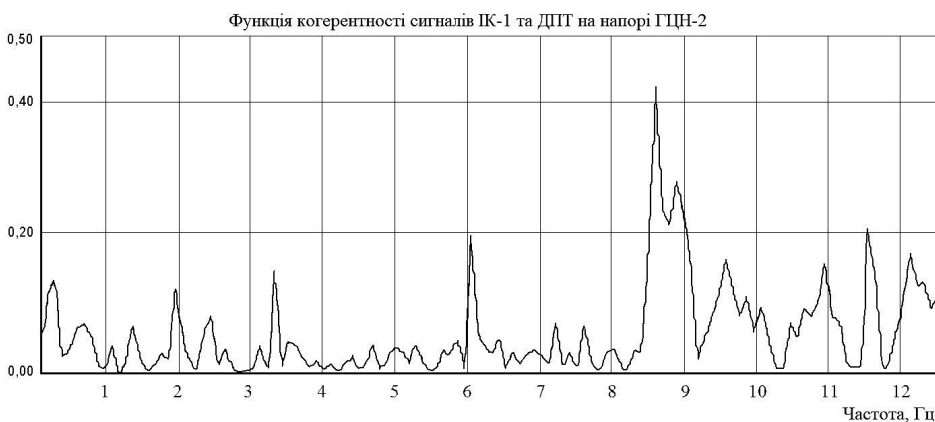


Рис. 9. Типова КСГ двовірного діагностичного сигналу, сформованого виходами іонізаційної камери реактора ВВЕР-1000 і сенсора динамічного тиску на напорі ГЦН (рівень потужності номінальний) [16]

За даними вищезазначеної роботи [16], на рис. 10 наведено реалізацію фазового спектра двовірного сигналу нейтронного шуму, що зареєстрований між парою нейтронних детекторів (ДПЗ № 1 та № 7 у ТВЗ № 09–22) реактора ВВЕР-1000 на номінальному рівні його теплової потужності. Показово, що збільшення теплового навантаження ТВЗ в умовах подальшого форсування теплової потужності реактора практично не змінило структуру фазового спектра, наведеного на рисунку. Відсутність такої зміни у фазовому спектрі двовірного діагностичного сигналу свідчить про низьку інформативність цього типу спектрального перетворення двовірного діагностичного сигналу або про його невідповідну вимірювальну базу для виявлення аномалій теплогідрравлічного характеру. Так, наприклад, під час вирішення завдань ідентифікації цих аномалій використана в роботі [16] вимірювальна база (тобто відрізок розташування суміжних нейтронних детекторів в КНВ), а саме — у кінцевих точках усього вимірювального каналу — проявила себе як зовелика для забезпечення достатньої роздільної спроможності такої двовірної просторової структури при виявленні двофазних парорідинних утворень у ТВЗ. У той же час, як свідчать дані роботи [19], наведені на рис. 4, зменшення базової відстані між нейтронними детекторами КНВ (від 1 200 мм на рис. 4, б до 400 мм на рис. 4, в) дало змогу надійно ідентифікувати область локалізації відповідного типу теплогідрравлічної аномалії при зменшенні довжини цієї міждетекторної бази.

У контексті аналізу сучасних підходів до ідентифікації теплогідрравлічних аномалій у ТВЗ реактора ВВЕР-1000 за параметрами нейтронного шуму видається за необхідне розглянути модель шумової діагностики АкЗ з роботи [16]. Розглянуте в ній вирішальне правило слід вважати типовим. Воно, як і інші подібні підходи, є детермінованим за своєю ма-

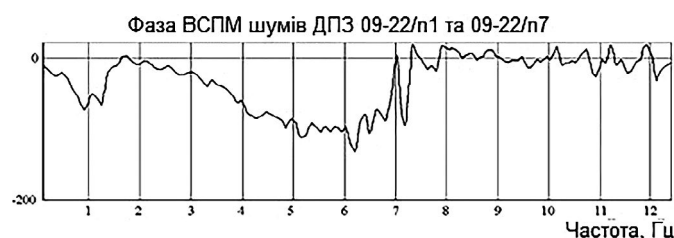


Рис. 10. Фазовий спектр двовимірного діагностичного сигналу, сформованого виходами ДПЗ № 1 і ДПЗ № 7 у ТВЗ № 09–22 реактора ВВЕР-1000 на номінальному рівні потужності за даними [16]

тематичною суттю, яка не може вважатися адекватною з огляду на статистичну природу діагностичних сигналів нейтронного шуму, що підлягають автоматичній ідентифікації. Визначальним є те, що саме такі, детерміновані за своєю суттю алгоритми, реалізовано на теперішній час у переважній більшості найбільш сучасних технічних засобів оперативної діагностики обладнання АЕС. Показово, що сутність підходу роботи [16] полягає в обчисленні для двовимірного сигналу нейтронного шуму, який сформовано сигналами ДПЗ штатного КНВ у ТВЗ «параметра регресії Q ». Останній є за своєю математичною суттю множинним коефіцієнтом кореляції R^2 . Відповідно до вирішуваного завдання виявлення процесу кипіння теплоносія в ТВЗ, у роботі [16] запропоновано контролювати ступінь лінійності та фазу сигналу у фіксованому спектральному діапазоні фазового спектра двовимірної статистичної послідовності, що надходить після цифрового перетворення з виходів ДПЗ.

На думку авторів [16], ступінь лінійності фазового спектра такого двовимірного діагностичного сигналу може бути мірою дисперсійно-дисипативних властивостей потоку теплоносія між двома суміжними нейтронними детекторами. У цьому зв'язку слід зазначити, що при аналізі умов бездисперсійного поширення широкополосного акустичного шуму від зовнішнього джерела на ділянці провідного середовища між двома акустичними сенсорами в теоретичних засадах прикладної акустики [2] показано, що зниження ступеня лінійності ділянки фазового спектра в певному його спектральному діапазоні зумовлено дисперсією широкополосного шуму на неоднорідностях середовища по шляху його поширення між цими акустичними сенсорами, виходи яких формують відповідний двовимірний сигнал. Стосовно до завдання виявлення пазиркової структури пароводяного потоку в ТВЗ водо-водяного ЯР подібний ефект зниження ступеня лінійності фазового спектра в спектральному діапазоні $\Delta f = 1 \dots 4$ Гц

має у своїй основі зміну енергетичних характеристик термалізованих нейтронів у процесі їхньої взаємодії з паровими об'ємами як фазовими неоднорідностями потоку теплоносія. При цьому множинний коефіцієнт кореляції обчислюється в [16] на основі таких параметрів статистичної вибірки, як значення $\hat{Y}_i$ випадкової змінної Y_i з математичним очікуванням $\bar{Y}$, які розраховуються на основі рівняння регресії, отриманого для цієї випадкової послідовності.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Отже, параметр R^2 , який використовується під час формування цього вирішального правила в [16], характеризує лише загальний розкид даних щодо їх математичного очікування $\bar{Y}$, причому більшому значенню R^2 відповідає і більша дисперсія даних. Наприклад, у діагностичній системі KARD, що розглянута в [16], спектральний діапазон ділянки фазового спектра (див. рис. 10), значення оцінок якого формують статистичну вибірку, відповідає частотній смузі $\Delta f = 1 \dots 4$ Гц. При оцінці ефективності розглянутого діагностичного алгоритму слід звернути увагу на тип вирішального правила, який запропоновано використовувати в [16]. При $R^2 = 0,9$ приймається рішення про наявність значного кипіння в ТВЗ, а у випадках $R^2 \leq 0,9$ вважається, що кипіння в каналі реактора є відсутнім. Таким чином, запропоноване в [16] вирішальне правило варто розглядати як правило детермінованого типу, оскільки воно фактично не дозволяє врахувати реальні ймовірнісні характеристики багатовимірного спектрального ознакового простору діагностичного сигналу, оскільки заміняє його граничними рівнями тільки одного статистичного параметра — множинного коефіцієнта кореляції R^2 . Слід зазначити, що спроба використання детермінованих вирішальних правил, що сформовані на основі зменшення числа використовуваних під час аналізу діагностичних ознак на основі заміни багатовимірного ознакового простору одним «узагальненим» параметром, є типовою і характерною для багатьох інших діагностичних систем, проаналізованих у монографіях [10, 20]. Показово, що автори цих достатньо сучасних розробок [16 та ін.] практично не враховують той факт, що наслідком зменшення мірності простору діагностичних ознак, що використовуються під час ідентифікації випадкових об'єктів, є різке зменшення надійності автоматичної класифікації цих об'єктів. Показово також, що набутий досвід дослідної експлуатації системи KARD, яка серед іншо-

го мала забезпечувати ідентифікацію початку кипіння в ТВЗ реактора ВВЕР-1000 на основі розглянутого вище вирішального правила [16], підтвердив неприйнятно низьку надійність такого підходу.

Представлені вище результати аналізу інформаційної значущості двомірних сигналів нейтронного шуму дали змогу зробити практичні висновки:

а) підходи до тріангуляційної діагностики областей локалізації теплогідравлічних аномалій в АкЗ ВВЕР мають передбачати використання діагностичних ознак, сформованих на основі параметрів функції КСГ;

б) статистичні масиви, що складають основу для обчислення параметрів функції КСГ, мають бути сформовані на основі реальних вимірювань двомірних нейтронношумових сигналів суміжних пар ДПЗ у кожному з КНВ АкЗ ВВЕР;

в) автоматичне формування діагностичних рішень щодо визначення приналежності обчислених параметрів функції КСГ відповідно до кожної з суміжних пар ДПЗ КНВ штатної СВРК ВВЕР може бути забезпечене на основі реалізації запропонованих у [4] алгоритмів комп'ютерної побудови в N -мірному просторі діагностичних ознак розділяючої гіперплощини, що дає змогу оперативно ідентифікувати невідомий діагностичний об'єкт;

г) результатом діагностики має бути автоматично сформоване рішення щодо наявності теплогідравлічної аномалії того чи іншого типу між відповідними парами сенсорів ДПЗ у кожному з КНВ системи СВРК ВВЕР.

Практична реалізація вищезазначеної діагностичної концепції зумовила необхідність виконання реакторних експериментів з комплексним вимірюванням температурних режимів ТВЕЛ ЯР ВВЕР-440 та синхронною реєстрацією одно- та двомірних діагностичних сигналів нейтронного шуму в АкЗ цього реактора. Зазначені результати наведено з роботи [4].

Результати комплексного дослідження теплових та нейтронно-фізичних параметрів реальної ТВЗ реактора ВВЕР-440

За результатами аналізу інформаційних особливостей спектральних параметрів нейтронного шуму в реакторах водо-водяного типу необхідно підкреслити:

1) нечіткий характер меж між окремими класами теплогідравлічних процесів, які реалізуються на поверхні тепловіддачі ТВЕЛ (такими, наприклад, є межі між режимами конвективної тепловіддачі та початком кипіння, а також іншими класами струк-

турних форм двофазного парорідинного потоку), обумовлений не тільки ймовірнісною природою процесу генерації парової фази при кипінні та, крім того, стохастичним характером гідродинаміки й теплообміну в ТВЗ, але також і суб'єктивним характером оцінки меж між теплогідравлічними режимами і неповнотою сучасних знань щодо них;

2) зміна частотної структури сигналів внутрішньозонних електронно-емісійних детекторів потоку нейтронів, що реєструється при переході відповідної ділянки ТВЗ реактора ВВЕР від конвективної тепловіддачі до кипіння, є обумовленою локальною зміною термалізаційних властивостей уповільнювача у тій частині поверхні ТВЗ, на якій почалася генерація парової фази;

3) вплив режимних параметрів процесу теплообміну, особливо тиску, масової швидкості, недогріву теплоносія на спектральні характеристики нейтронного шуму в АкЗ реактора ВВЕР в умовах генерації парової фази на поверхні тепловіддачі ТВЕЛ проявляє себе істотно менше, ніж вплив цих параметрів на структуру АСГ акустичного шуму процесу кипіння;

4) на відміну від режимних параметрів процесу теплообміну істотно більший вплив на спектральну структуру сигналів нейтронного шуму в реакторах водо-водяного типу має місце розташування детектора нейтронного потоку в об'ємі АкЗ;

5) механічна вібрація внутрішньокорпусних елементів реактора ВВЕР обумовлює трансформацію спектральної структури АСГ сигналів внутрішньозонних детекторів нейтронного потоку типу ДПЗ у тих частотних діапазонах цих спектрів, які істотно відрізняються від ділянок локалізації спектральних компонентів, обумовлених процесом генерації парової фази на поверхні тепловіддачі ТВЕЛ;

6) послідовне зменшення частоти різкого зниження (зриву) когерентності у структурі КСГ двомірного сигналу нейтронного шуму, який сформований відповідними парами виходів електронно-емісійних детекторів потоку нейтронів, розташованих у конструктиві КНВ з різними аксіальними координатами по висоті контрольованої ТВЗ, обумовлено переходом теплогідравлічних режимів цього реакторного каналу до структурних форм двофазного парорідинного потоку з високими рівнями паровмісту;

7) формування окремих спектральних діапазонів АСГ нейтронного шуму, що реєструється в АкЗ реактора ВВЕР, пов'язано з конкретними видами нейтронно-фізичних процесів, що реалізуються в реакторах цього типу, а саме:

а) частотний діапазон $\Delta f = 7\text{--}60$ Гц обумовлений, головним чином, процесами термалізації нейтронів, що відбуваються в уповільнювачі;

б) спектральна смуга $\Delta f = 0,05\text{--}1,0$ Гц може розглядатися як інформативна щодо протікання ТГП в АкЗ ВО ЯР.

8) у жодному з відомих досліджень, що були виконані за останні роки в напрямі нейтронношумової діагностики РУ, реальна термометрія ТВЗ безпосередньо в АкЗ ВО ЯР не виконувалась (експериментальні складнощі виконання таких вимірювань очевидні).

З огляду на вищезазначене, доцільним є розгляд результатів натурних експериментів з роботи [4], особливо в тій їхній частині, що стосується оцінки характеру взаємозв'язку параметрів нейтронного шуму в АкЗ реакторів ВВЕР безпосередньо з процесом генерації парової фази на поверхні тепловіддачі ТВЕЛ. На рис. 11, а представлено схему розміщення родієвих ДПЗ в експериментальній термометричній ТВЗ реактора ВВЕР-440, яка використовувалась у програмі міжнародного експерименту на АЕС «Райнсберг» (Німеччина). У цих експериментах та обробці їхніх результатів, що виконувалась із використанням алгоритмів з роботи [4], було передбачено синхронну реєстрацію температури поверхонь тепловіддачі ТВЕЛ разом з вимірюваннями флуктуацій нейтронного потоку поздовжньо розподіленою структурою із семи ДПЗ у складі КНВ.

Відповідно до даних роботи [4] на рис. 12 наведено результати вимірювань температурних режимів поверхні ТВЕЛ по висоті експериментальної ТВЗ реактора ВВЕР-440 в режимах конвективної тепловіддачі, а також початку генерації парової фази та розвиненого пухиркового кипіння в деяких характерних експериментах.

У свою чергу на рис. 13 наведено результати синхронної реєстрації АСГ нейтронного шуму в експериментальній термометричній ТВЗ відповідно до експериментів А, Б, В, температурні режими яких позначені на рис. 12.

Відповідно до цих одномірних вимірювань результати обчислення АСГ нейтронного шуму, що отримані в експериментальному КНВ (див. рис. 11) між суміжними парами ДПЗ і формують відповідні двомірні діагностичні сигнали, представлено на рис. 14.

Дані фізичного аналізу та результати експериментальних досліджень інформаційної значущості параметрів нейтронного шуму в АкЗ водо-водяного ЯР, що були виконані на АЕС «Райнсберг», дозволяють відзначити:

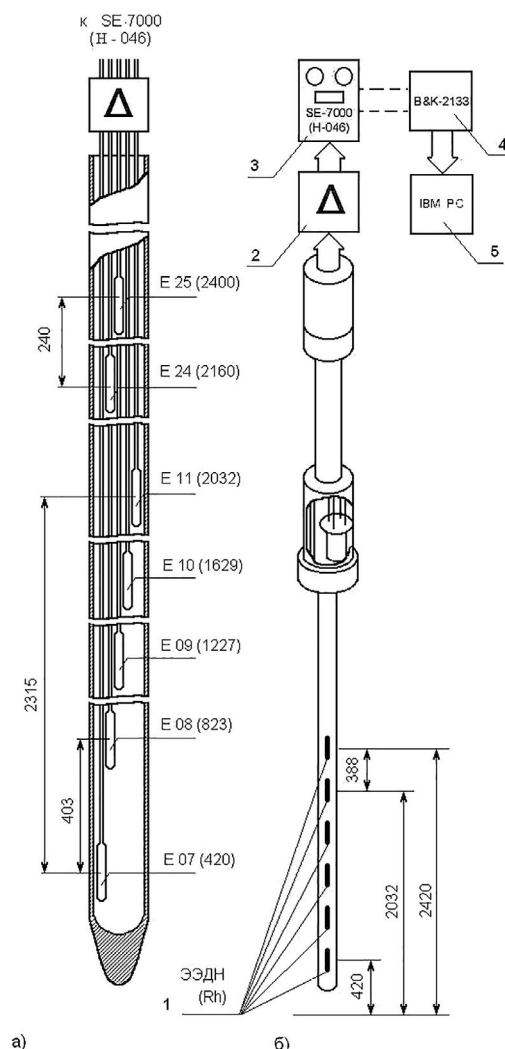


Рис. 11. Принципові схеми: а) схема розміщення родієвих ДПЗ у центральній каркасній трубі експериментальної ТВЗ; б) схема реєстрації нейтронного шуму. 1 — родієві ДПЗ; 2 — вимірювальний комплекс МИК розробки РНЦ «Курчатовський інститут»; 3 — багатоканальний магнітограф SE-7000 або H-046; 4 — цифровий спектроаналізатор Bruel&Kjaer, тип 2133; 5 — комп'ютер

1) флуктуації нейтронного потоку в АкЗ реактора ВВЕР є зумовленими не тільки стохастичною природою нейтронно-фізичних процесів, вібраціями його внутрішньокорпусних елементів та іншими фізичними чинниками, але є також безпосередньо пов'язаними з коливаннями термалізаційних властивостей уповільнювача внаслідок можливого переходу до процесу кипіння теплоносія на поверхні ТВЕЛ у нештатних режимах експлуатації РУ цього типу;

2) зв'язок між окремими інформаційно значущими спектральними діапазонами АСГ та КСГ нейтронного шуму на виході ДПЗ реактора ВВЕР і конкретними фізичними чинниками, що зумов-

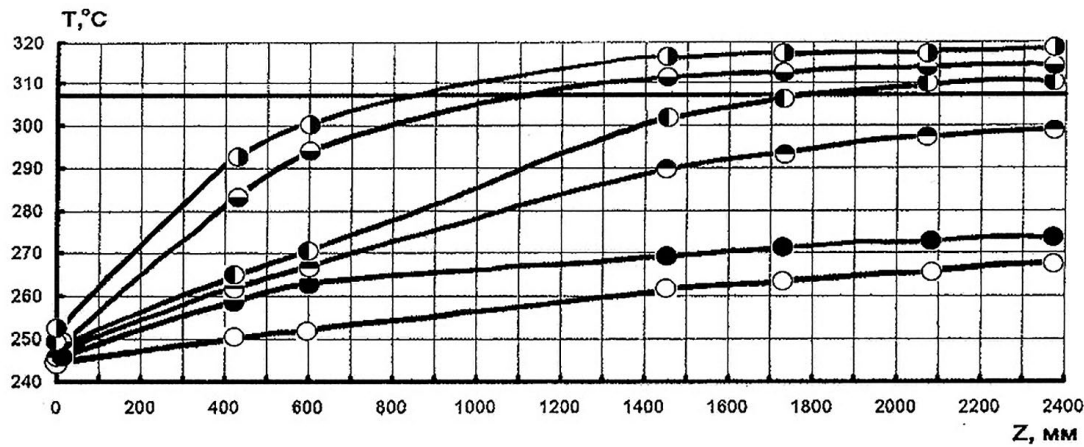


Рис. 12. Результати вимірювань температурних режимів поверхні ТВЕЛ по висоті експериментальної ТВЗ у режимах конвективної тепловіддачі, початку кипіння та розвинуеного пухиркового кипіння в наступних типових експериментах:

- 1) експеримент А: $\bullet$ – $T_{\text{ст}}$; $\circ$ – $T_{\text{ж}}$; $T_{\text{вх}} = 246,2^\circ\text{C}$, $T_{\text{вих}} = 265,7^\circ\text{C}$; $\Delta T_{\text{нед}}^{\text{вих}} = 41,4^\circ\text{C}$; $\rho W = 2741 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$; $N_{\text{ТВЗ}} = 2,36 \text{ МВт}$.
Режими тепловіддачі по висоті ТВЗ між парами ДПЗ: конвективний, кипіння відсутнє між ДПЗ Е07 і Е25 по всій висоті АкЗ;
- 2) експеримент Б: $\bullet$ – $T_{\text{ст}}$; $\bullet$ – $T_{\text{ж}}$; $T_{\text{вх}} = 248,0^\circ\text{C}$, $T_{\text{вих}} = 294,3^\circ\text{C}$; $\Delta T_{\text{нед}}^{\text{вих}} = 9,8^\circ\text{C}$; $\rho W = 1067 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$; $N_{\text{ТВЗ}} = 2,28 \text{ МВт}$.
Режими тепловіддачі по висоті ТВЗ між ДПЗ Е07–Е08 — конвективний; на ділянці ТВЗ між ДПЗ Е08–Е09 — початок кипіння; на ділянці ТВЗ між ДПЗ Е09–Е10, Е10–Е11, Е11–Е25 — розвинуене кипіння;
- 3) експеримент В: $\bullet$ – $T_{\text{ст}}$; $\bullet$ – $T_{\text{ж}}$; $T_{\text{вх}} = 247,3^\circ\text{C}$, $T_{\text{вих}} = 306,2^\circ\text{C}$; $\Delta T_{\text{нед}}^{\text{вих}} = 0,0^\circ\text{C}$; $\rho W = 768,5 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$; $N_{\text{ТВЗ}} = 2,15 \text{ МВт}$.
Режими тепловіддачі на ділянці ТВЗ між ДПЗ Е07–Е08 — конвективний; на ділянці ТВЗ між ДПЗ Е08–Е09 — початок кипіння; на ділянці ТВЗ між ДПЗ Е09–Е10, Е10–Е11, Е11–Е25 — розвинуене кипіння. Режимні параметри в цих експериментах: $P = 9,62 \text{ МПа}$, температура насичення $T_s = 307,1^\circ\text{C}$

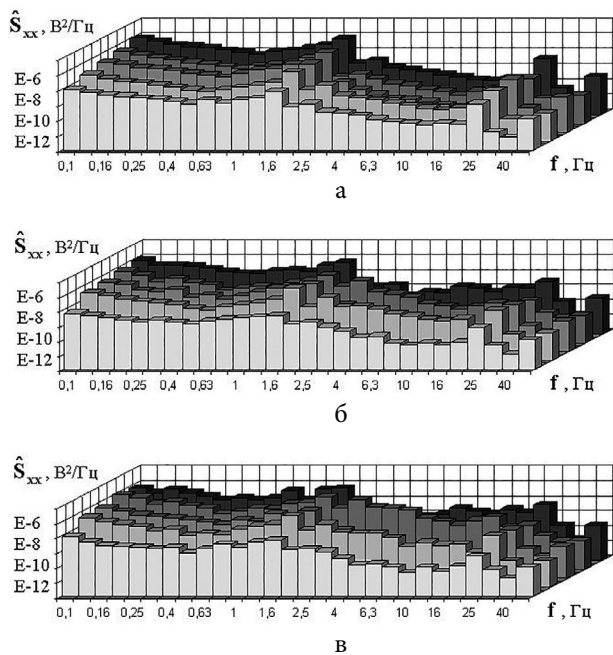


Рис. 13. Результати синхронної реєстрації АСГ нейтронного шуму в експериментальній ТВЗ у режимах конвективної тепловіддачі, початку кипіння теплоносія та розвинуеного пухиркового кипіння на поверхні ТВЕЛ відповідно до експериментів А, Б, В на рис. 12

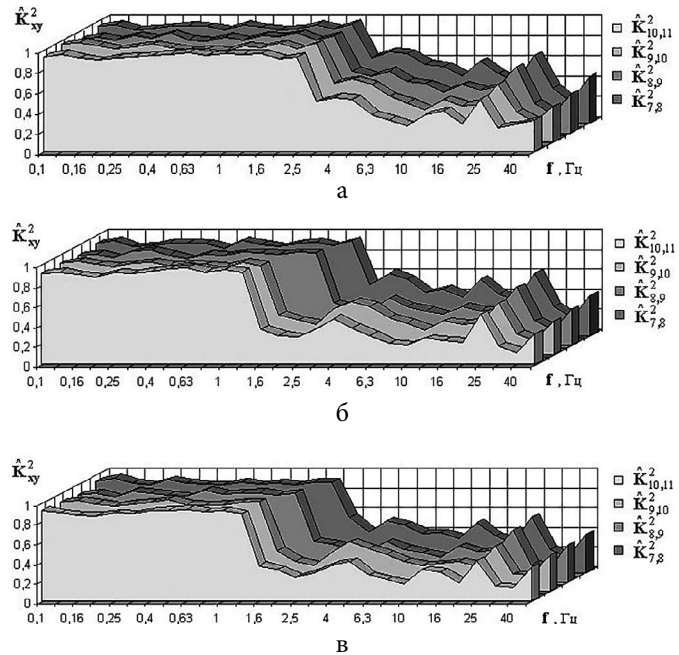


Рис. 14. Результати обчислення КСГ нейтронного шуму в експериментальній ТВЗ між суміжними парами ДПЗ каналу нейтронних вимірювань у режимах конвективної тепловіддачі, початку кипіння теплоносія та розвинуеного пухиркового кипіння на поверхні ТВЕЛ відповідно до експериментів А, Б, В на рис. 12

люють формування цих діапазонів, має ймовірнісний характер;

3) відповідно до результатів, виконаних у роботі комплексних тепло- та нейтронно-фізичних досліджень, що демонструють характер та особливості взаємозв'язку температурних режимів поверхні тепловіддачі ТВЕЛ та відповідних ТГП у ТВЗ реактора ВВЕР-440 на рис. 12–14, представлено дані:

а) вимірювань температури ТВЕЛ за висотою ТВЗ реактора ВВЕР-440 у штатному, аномальному та передаварійному режимах (експерименти А, Б, В);

б) синхронної (відповідно до температурних кривих на рис. 12) реєстрації АСГ одномірних сигналів нейтронного шуму в режимах конвективної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, початку кипіння та пазиркової структури потоку в ТВЗ (див. рис. 13);

в) результатів обчислення КСГ двомірних сигналів нейтронного шуму між суміжними парами ДПЗ вимірювального каналу відповідно до вищезазначених режимів АкЗ ЯР в експериментах А, Б, В (див. рис. 14);

4) визначальною структурною особливістю АСГ нейтронного шуму, що реєструється в АкЗ реакторів ВВЕР в умовах відсутності кипіння теплоносія на поверхні ТВЕЛ є низькочастотна (досліджувався спектральний діапазон $f = 0,1 \dots 63,0$ Гц) випадкова $1/f$ — структура цих спектрів, що має характерні ознаки фліккер-шуму (див. рис. 13). Початок кипіння теплоносія в ТВЗ супроводжується пропорційним збільшенням інтенсивності спектральної густини складових АСГ нейтронного шуму на величину $\approx 20\%$ у полосі частот $f = 1,6 \dots 40$ Гц;

5) спектральний діапазон нейтронного шуму в АкЗ реактора ВВЕР, що відповідає частотній полосі $f = 10 \dots 40$ Гц, визначальною мірою зумовлюється процесами термалізації нейтронів. У той же час інфранизькі спектральні складові в частотній полосі від $f = 0,05$ Гц до декількох герц містять діагностичну інформацію щодо виникнення аномальних та передаварійних ТГП на поверхні ТВЕЛ;

6) ідентифікація областей локалізації аномальних та передаварійних ТГП у каналах реактора ВВЕР має бути реалізована на основі використання спектральних параметрів КСГ двомірного діагностичного сигналу нейтронного шуму, що має бути сформований відповідними суміжними парами виходів ДПЗ, розташованих уздовж аксіальної координати контрольованої ТВЗ (див. рис. 14);

7) послідовний перехід частоти різкого зменшення (зриву) рівня функції просторової когерентно-

сті у структурі КСГ двомірного сигналу нейтронного шуму до нижньої частини інфранизького частотного діапазону цього спектра є фізично пов'язаним із формуванням режимів плинну двофазного парорідинного потоку теплоносія зі збільшеними рівнями паровмісту. Так, зокрема, перехід режиму тепловіддачі в ТВЗ ВВЕР від турбулентної конвекції на поверхні ТВЕЛ до пазиркової структури потоку призводить до зменшення частоти зазначеного зриву когерентності від околиць частоти $f_{зр} \approx 2,5$ Гц відповідно до $f_{зр} \approx 1,6$ Гц (див. рис. 14, б, в);

8) вплив режимних параметрів процесу теплообміну (тиску, масової швидкості, недогріву теплоносія) на спектральну структуру АСГ та КСГ нейтронного шуму в АкЗ реактора ВВЕР в умовах генерації парової фази в його ТВЗ не є визначальним.

Висновки

1. У процесі експлуатації реакторів ВВЕР, що відповідно до проектних вимог у штатних експлуатаційних режимах мають забезпечувати в їхніх АкЗ лише конвективний режим тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, можливим є непрогнозоване виникнення в ТВЗ низки потенційно небезпечних теплогідравлічних аномалій, ознакою яких є латентне виникнення в процесі експлуатації ЯР нештатних режимів генерації парової фази.

2. Об'єктом оперативної діагностики теплогідравлічних аномалій у реакторах ВВЕР з докритичними параметрами є нерегламентні режими кипіння теплоносія в ТВЗ починаючи з активації перших центрів пароутворення на поверхні ТВЕЛ.

3. Формування пазиркової структури на поверхні ТВЕЛ становить потенційну загрозу герметичності їх через можливість виникнення множинних наскрізних пошкоджень поверхні тепловіддачі завдяки появі циклічних термічних напруг, що утворюються в матеріалі оболонки внаслідок температурних коливань, які є результатом циклічного випаровування мікрошару теплоносія, сформованого в основі кожного з активованих парових центрів.

4. Виникнення перших псевдопарових утворень в АкЗ перспективних реакторів ВВЕР із НКП теплоносія слід розглядати як об'єкт діагностики і фізичну передумову для подальшого переходу цього початкового аномального режиму псевдокипіння в ТВЗ до його аварійного псевдоплівкового різновиду, що проявляє себе як режим погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ.

5. Зміна частотної структури сигналів ДПЗ докритичного реактора ВВЕР, що реєструється під час переходу відповідної ділянки ТВЗ від конвективної тепловіддачі до процесу генерації парової фази має у своїй основі зумовлене фазовим переходом локальне збурення термалізаційних властивостей уповільнювача, яке обумовлює зміну спектра енергії нейтронів, що дифундують у цьому об'ємі АкЗ.

6. Нейтронні детектори типу ДПЗ, що розташовані в об'ємі АкЗ, дозволяють виявити важливі особливості структури спектрів флуктуацій нейтронного потоку, які при застосуванні позазонних іонізаційних камер не можуть бути виявлені.

7. Флуктуації нейтронного потоку в АкЗ реакторів ВВЕР зумовлені не тільки стохастичною природою нейтронно-фізичних процесів, а також вібраціями їхніх внутрішньокорпусних елементів, але є також пов'язаними з коливаннями термалізаційних властивостей уповільнювача, зокрема через виникнення аномальних режимів генерації парової фази.

8. Характерною структурною особливістю АСГ нейтронного шуму, що реєструється на виходах ДПЗ в умовах відсутності кипіння теплоносія на поверхні ТВЕЛ, є низькочастотна випадкова $1/f$ структура цих спектрів, що має ознаки типового флікер-шуму.

9. Спектральний діапазон нейтронного шуму в АкЗ реактора ВВЕР, що відповідає частотній полосі $f = 10 \dots 40$ Гц, визначальною мірою зумовлюється процесами термалізації нейтронів, причому інфранизькі спектральні складові від $f = 0,05$ до декількох герц містять діагностичну інформацію щодо теплогідрравлічних аномалій.

10. Ідентифікація областей локалізації теплогідрравлічних аномалій по висоті ТВЗ реакторів ВВЕР принципово може бути реалізована на основі параметрів КСГ двомірного сигналу нейтронного шуму, що сформований суміжними парами виходів ДПЗ, що розташовані в одному КНВ.

11. Послідовний перехід частоти зриву рівня функції просторової когерентності у структурі КСГ до нижньої частини інфранизького спектрального діапазону є фізично пов'язаним з виникненням у ТВЗ парорідинних структур з підвищеним рівнем паровміст.

Список використаної літератури

1. Самойлов О. Б. Безопасность ядерных энергетических установок / О. Б. Самойлов, Г. Б. Усынин, А. М. Бахметьев. — Москва : Энергоатомиздат, 1989. — 279 с.

2. Теплофизика безопасности атомных электростанций: монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко [и др.]. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. — 484 с.
3. Теплофизика поврежденных реакторных установок: монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко [и др.]. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2013. — 528 с.
4. Шараевський І. Г. Розпізнавання передаварійних теплогідрравлічних процесів у водоохолоджуваних ядерних енергетичних реакторах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / І. Г. Шараевський. — Київ : ІПБ АЕС НАН України, 2010. — 48 с.
5. Світові тенденції розвитку конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском / І. Г. Шараевський, Н. М. Фіалко, Л. Б. Зімін [та ін.]. // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 2 (17). — С. 3–15.
6. Головні напрями російських розробок перспективних конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском / І. Г. Шараевський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський [та ін.]. // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 3 (18). — С. 34–41.
7. Abdelmessih A. H. An experimental investigation on incipient boiling oscillation of Freon-11 in forced convection / A. H. Abdelmessih, S. T. Yin // Proceedings of the Two-Phase Flow and Heat Transfer Symposium — Workshop (Fort Landerdale, Fl.) — 1976. — P. 203–204.
8. Рассохин Н. Г. Особенности воздействия теплоносителя с высокой температурой на теплопередающую поверхность из алюминиевых сплавов при различных видах теплообмена / Н. Г. Рассохин, Г. Н. Градусов, М. Г. Гумилева // Тр. МЭИ. — 1975. — Вып. 257. — С. 81–87.
9. Кашинский В. И. Влияние отложения продуктов коррозии на температурный режим труб при развитом кипении / В. И. Кашинский, Е. И. Невструева, И. М. Романовский // Кризисы теплообмена и околокритическая область. — Ленинград : Наука, 1977. — С. 189–196.
10. Проблеми аварійної динаміки теплогідрравлічних процесів у перспективних реакторах із надкритичними параметрами легководного теплоносія / А. В. Носовський, І. Г. Шараевський, Н. М. Фіалко [та ін.]. // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — № 2 (21). — С. 3–16.
11. Kozma R. Identification of flow patterns by neutron noi. Analysis during actual coolant boiling in thin rectangular channels / R. Kozma, N. van Dam, I. E. Hoogenboom // Nucl. Technology. — 1992 — Vol. 100 — P. 97–109.
12. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. — Москва : Машиностроение, 1978. — 239 с.
13. Распознавание образов. Состояние и перспективы / К. Верхаген, Р. Джейк, Ф. Грун [и др.]; пер. с англ. под

- ред. И. Б. Гуревича — Москва : Радио и связь, 1985. — 103 с.
14. Комплексная система оперативной технической диагностики энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000/НПО «Хартрон», КБ «Хартрон-АРКОС». Технический проект. — Харьков, 1996. — 269 с.
 15. Система контроля, управления и диагностики (СКУД) реакторной установки с реактором типа В-320. Техническая спецификация. — Москва : РЦН «Курчатовский институт». Институт ядерных реакторов, 1995. — 95 с.
 16. Отчет по результатам первых месяцев эксплуатации системы реакторной шумовой диагностики (СШРД) «KARD». — Калининская АЭС, г. Удомля, 1992. — 37 с.
 17. Шульц И. Новые развития в области технической диагностики для АЭС с ВВЭР на основе современных ЭВМ типа PC / И. Шульц. — Siemens AG, Bereich Energiezengung (KWU/S42), 1997. — 26 с.
 18. Rauschdiagnostische Untersuchungen zum Kuhlmittelsieden in Druckwasserreaktoren / G. Blumentritt, P. Liewers, U. Rindelhardt, M. Werner // Kernergie. — 1990. — No. 1. — P. 260–274.
 19. Prokop K. Zkusnosti z vyvoje, projktovani a puuziti diagnostickehe systemu v obdobi spousteni a v provozu JE / K. Prokop, M. Novak // Energetica. — 1981. — Vol. 31, No. 10. — P. 429–434.
 20. Теплофизика ресурса ядерных энергоустановок: монография / А. В. Носовский, И. Г. Шараевский, Н. М. Филалко [и др.]. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2017. — 624 с.

**I. G. Sharaevsky, T. S. Vlasenko, L. B. Zimin,
A. V. Nosovskyi, N. M. Fialko, G. I. Sharaevsky**

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

Study of WWER Reactors Neutronic Noise Spectral Images in Irregular Thermohydraulic Regimes of Core Zones

The information on the peculiarities of the manifestations of potentially dangerous thermohydraulic anomalies, that occur unpredictably during the operation of the WWER reactor core, is generalized. Considerable attention is paid to the threat of uncontrolled occurrence of latent pre-emergency and emergency operating states in fuel assemblies during the generation of the vapor phase on the surface of fuel elements, including the heat transfer

crisis with subsequent boiling of the coolant. It is noted that under these conditions, heat transfer, which should occur exclusively in the convective mode, is also characterized by the uncontrolled occurrence of the boiling process, from the activation of the first centers of vaporization to the formation of a developed bubble structure of the coolant. The limited possibilities of modern technical means of monitoring the technical condition of WWER, which do not provide detection of these anomalies and pre-emergency heat transfer regimes, are considered. Given the data on neutron flux fluctuations, it is shown that the noise components at the output of standard electron emission neutron flux meters carry important diagnostic information on thermohydraulic processes in the volume of the core, which is currently lost. With this in mind, it is concluded that it is necessary to immediately develop a methodology for the operational identification of random spectral realizations of neutron noise, which is registered at the outputs of neutron detectors of existing in-reactor control systems. The nature of the necessary reliable data on the spectral structure of the main types of diagnostic images (signatures or patterns) of neutron noise, which is registered at the output of standard neutron flux detectors in accordance with the main types of thermohydraulic anomalies, is determined. The analysis of known data and performed with the participation of authors of reactor experiments on the basis of which it is proved that the spectral structure of auto- and coherent signal density at the output of standard neutron flux detectors contains comprehensive diagnostic information on the type and location of vapor-liquid structures of WWER reactor core. With this in mind, the information characteristics of individual spectral ranges of neutron noise are analyzed and conclusions are made about their direct correspondence to the characteristic thermohydraulic processes as objects of diagnostics.

Keywords: WWER, core, neutron noise, spectral characteristics of signals, thermohydraulic anomalies, diagnostics.

References

1. Samoilov O. B., Usynin G. B., Bakhmet'ev A. M. (1989). *Bezopasnost' jadernykh energeticheskikh ustanovok* [Safety of nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 279 p. (in Rus.)
2. Klyuchnikov A. A., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevsky G. I. (2010). *Teplofizika bezopasnosti atomnykh elektrostantsiy* [Thermal physics of nuclear power plants safety]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 484 p. (in Rus.)

3. Klyuchnikov A. A., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevskaya N. I. (2013). *Teplofizika povrezhdenij reaktornykh ustanovok* [Thermophysics of NPP damages]. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 528 p. (in Rus.)
4. Sharevsky I. G. (2010) *Rozpiznavannia peredavariynykh teplogydravlychyykh procesiv u vodookholodzhuvanykh jadernykh energenychnykh reaktorakh* [Recognition of pre-emergency thermohydraulic processes in water-cooled nuclear power reactors] (PhD thesis). Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 48 p. (in Ukr.)
5. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., 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. doi.org/10.31717/2311-8253.20.2.1. (in Ukr.)
6. 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. doi.org/10.31717/2311-8253.20.3.4. (in Ukr.)
7. Abdelmessih A. H., Yin S. T. (1976). An experimental investigation on incipient boiling oscillation of Freon-11 in forced convection. *Proceedings of the Two-Phase Flow and Heat Transfer Symposium — Workshop (Fort Lauderdale, Fl.)*, pp. 203–204.
8. Rassokhin N. G., Gradusov G. N., Gumileva M. G. (1975). [Features of influence of the heat carrier with high temperature on a heat-transfer surface from aluminum alloys at various types of heat exchange]. *Proc. MEI*, vol. 257, pp. 81–87. (in Rus.)
9. Kashinskyi V. I., Nevstrueva E. I., Romanovskyi I. M. (1977). [Influence of deposition of corrosion products on the temperature regime of pipes at the developed boiling]. In: *Crizisy kipeniya i okolocriticheskaya oblast'* [Heat transfer crises and near-critical ares]. Leningrad: Nauka, pp. 189–196. (in Rus.)
10. Sharaevsky I. G., Vlasenko T. S., Zimin L. B., Nosovskyi A. V., Fialko N. M., 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. doi.org/10.31717/2311-8253.21.2.1. (in Ukr.)
11. Kozma R., van Dam N., Hoogenboom I. E. (1992). Identification of flow patterns by neutron noi. Analysis during actual coolant boiling in thin rectangular channels. *Nucl. Technology*, vol. 100, pp. 97–109.
12. Birger I. A. (1978). *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie, 239 p. (in Rus.)
13. Verkhagen K., Jeik R., Grun F., Josten J., Verbek P.; Curevich I. B. (ed.) (1985). *Raspoznavanie obrazov. Sostojanie i perspektivy* [Pattern recognition. State and prospects.]. Translated from English. Moscow: Radio i svjaz', 103 p. (in Rus.)
14. Integrated system for operational technical diagnostics of a NPP power unit with a VVER-1000 reactor. Technical Project. Kharkiv: JSC "Khartron", "Khartron-ARKOS", 1996, 269 p. (in Rus.)
15. *Monitoring, control and diagnostic system (MCDS) of a reactor plant with a V-320 reactor*. Data sheet. — Moscow: NRC "Kurchatov Institute", Institute of Nuclear Reactors, 1995, 95 p. (in Rus.)
16. *Report on the results of the first months of operation of the reactor noise diagnostics system*. Udomlya: Kalinin NPP, 1992, 37 p. (in Rus.)
17. Shulz I. (1997). *Novye razvitiya v oblasti tekhnicheskoi diagnostiki dlia AES s VVER na osnove sovremennykh EVM tipa PC* [New developments in the field of technical diagnostics for NPPs with VVER based on modern computers of the RS type]. Siemens AG — Bereich Energiezengung (KWU/S42), 26 p. (in Rus.)
18. Blumentritt G., Liewers P., Rindelhardt U., Werner M. (1990). Rauschdiagnostische Untersuchungen zum Kuhlmittelsieden in Druckwasserreaktoren. *Kernergie*, no. 1, pp. 260–274.
19. Prokop K., Novak M. (1981). Zkuscnosti z vyvoje, projktovani a puuziti diagnostickehe systemu v obdobi spousteni a v provozu JE. *Energetica*, vol. 31, no. 10, pp. 429–434. (in Cze)
20. Nosovskyi A. V., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevsky G. I. (2017). *Teplofizika resursa jadernykh energoustanovok* [Thermal physics of NPP resource]. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 624 p. (in Rus.)

Надійшла 11.11.2021

Received 11.11.2021

Д. І. Хвалін

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

Основні вимоги до сучасних систем діагностики потужних турбогенераторів

Ключові слова:

потужний турбогенератор,
атомна електростанція,
ушкодження,
діагностика,
контроль,
безпека,
надійність,
ефективність

Проведено системний аналіз надійності турбогенераторів енергоблоків атомних електростанцій та визначено основні елементи й вузли, які найчастіше ушкоджуються. З'ясовано, що майже половина ушкоджень припадає на статор і ротор, третина з яких — на осердя статора та дефекти стержнів обмотки. Розглянуто сучасні методи діагностики технічного стану елементів статора і ротора потужних генераторів, а також наведено їхні переваги та недоліки. Все це дозволило сформулювати основні принципи побудови системи діагностики потужних турбогенераторів енергоблоків атомних електростанцій, які базуються на даних неперервного контролю найбільш важливих їхніх параметрів та ідентифікації дефектів і відхилень, що здебільшого виникають під час експлуатації, а також унеможливають подальшу роботу обладнання.

Висока надійність роботи турбогенераторів (ТГ) є однією з умов, яка забезпечує безперервне вироблення електроенергії на електричних станціях. Зміна технічного стану генератора під час експлуатації зумовлена взаємодією різних робочих і режимних факторів, що у свою чергу може призвести до ушкодження його елементів і вузлів унаслідок появи дефектів. З аналізу досвіду експлуатації потужних ТГ можна констатувати таке.

Значна кількість ушкоджень обумовлена дефектами ізоляції обмоток статора (ОС) і ротора, які виникають унаслідок її старіння, зволоження, а також у результаті механічного впливу [1]. Відмови в роботі генератора, які спричинені ушкодженням ОС, виникають у два рази частіше, а відмови внаслідок пошкодження активної сталі статора — у десять разів рідше, ніж ушкодження обмотки ротора. Водночас ушкодження ОС відбуваються завдяки пробоям ізоляції. Ділянки з найбільшою вірогідністю пробоя з'являються за рахунок дефектів виготовлення та монтажу, а надалі збільшуються у процесі експлуатації електричної машини.

Руйнування ізоляції у пазах статора спостерігається з причини вібрації активної сталі, яка зумовлена низькою якістю пресування [2]. Недостатня якість закріплення лобових частин обмоток призводить до їхньої деформації та появи тріщин в ізоляції. Крім цього, у разі коротких замикань, несинхронних увімкнень та вібрації лобові частини ОС знаходяться під впливом додаткових динамічних взаємодій. Переміщення обмотки за умов послаблення кріплення зумовлює стирання ізоляції та втомні ушкодження міді.

Переважно причиною ушкодження активної сталі осердя статора є послаблення його пресування [3]. Під час роботи ТГ зусилля від магнітного тяжіння й обертового моменту можуть призводити до розхищення його активної сталі, контактної корозії та послаблення кріплення сталі. Факторами послаблення пресування активної сталі є самовільне розкручування гайок кріплення стяжних призм до натискної плити, деформація натискних пальців і руйнування лакового покриття сегментів.

Велика кількість ушкоджень припадає на бандажний вузол ротора, де розвиваються втомні тріщи-

© Д. І. Хвалін, 2022

ни та корозія, а однією з головних причин ушкодження обмотки ротора генератора є її зміщення за умов зміни температури та, як наслідок, поява замикання витків і перекриття каналів охолодження [4].

У літературних джерелах наведено такі статистичні дані щодо найтипівіших дефектів основних вузлів ТГ, які спостерігалися у процесі їхньої експлуатації на атомних електростанціях (АЕС) і стали причиною відмови у роботі [5–12]:

- ушкодження масляних ущільнень;
- послаблення кріплення ОС у пазах, а також її лобових частин;
- ушкодження внутрішніх елементів системи охолодження ОС та газоохолоджувачів;
- технологічні дефекти ізоляції стержнів ОС, обрив елементарних провідників у стержні;
- послаблення пресування пакета сталі магнітопроводу статора;
- руйнування ізоляції листів активної сталі у зубцях крайніх пакетів статора;
- розтріскування сегментів активної сталі та її викришування;
- обрив болтів кріплення зливного колектору;
- тріщини в паяних з'єднаннях напірного та зливного колекторів;
- дефекти контактних кілець, щіткового апарата.

Ці ушкодження та дефекти мають велику небезпеку, оскільки є причиною катастрофічних відмов у роботі ТГ з максимальним значенням збитку та недовиробітку електроенергії [13].

На рис. 1 у відсотковому співвідношенні приведено загальну статистику ушкоджень основних елементів і вузлів ТГ енергоблоків АЕС [14].

Наведена статистика показує, що майже половина всіх ушкоджень ТГ припадає на ротор і статор

(приблизно 40 %), зокрема, 14 % — на ротор, 23 % — на статор. У статорі переважно пошкоджуються осердя, виводи ОС, стержні з'єднувальних шин, системи охолодження та кріплення. До ушкоджень ротора відносяться дефекти котушки обмотки, контактних і бандажних кілець.

Діагностика ушкоджень потужних електричних машин протягом останніх 35 років отримала значний дослідницький інтерес [7, 15–20]. Доцільність застосування тих чи інших методів контролю та діагностики технічного стану ТГ визначається низкою факторів, а саме: вимогами, які висуваються до результатів діагностування, умовами, в яких проводиться діагностування, режимом роботи, рівнем автоматизованості діагностичного обладнання тощо. Кожен з методів дозволяє виявити ушкодження на різних стадіях їхнього розвитку та може бути втілений у певній сфері використання. Серед відомих методів діагностики технічного стану елементів статора та ротора під час експлуатації ТГ на АЕС необхідно відзначити такі [21–30].

Метод тепловізорного контролю. Оптичні методи вимірювання температури на базі реєстрації інфрачервоного випромінювання широко використовуються під час оцінки технічного стану різного електротехнічного устаткування, у тому числі вузлів і систем обертових машин. Застосування термографічних методів має зручність також під час контролю теплового режиму потужних ТГ, а висока чутливість тепловізорних засобів вимірювання дозволяє використовувати їх для контролю технічного стану системи охолодження.

В основу методу тепловізорного контролю покладений принцип визначення найбільше вірогідного значення температури поверхні об'єкта чи його

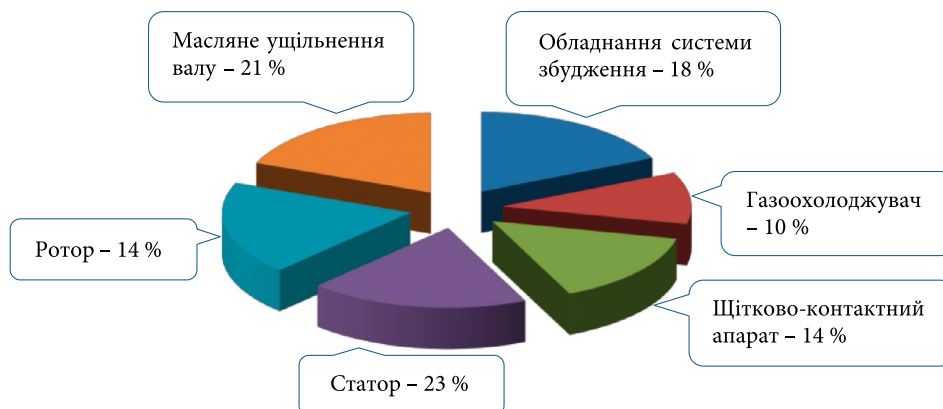


Рис. 1. Загальна статистика пошкоджень турбогенераторів атомних станцій

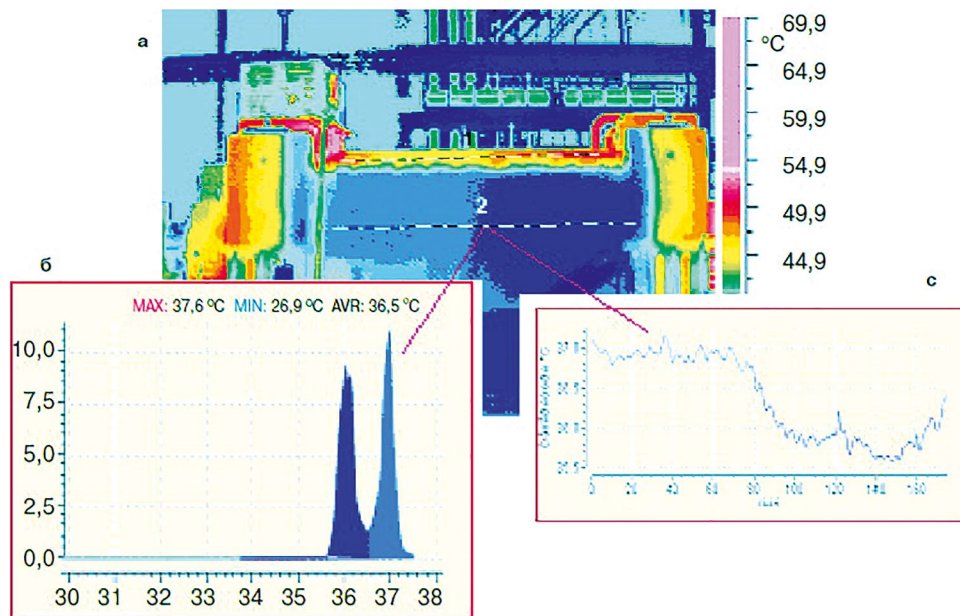


Рис. 2. Термограма бокової поверхні корпусу турбогенератора

фрагмента, що враховує статистичні властивості випромінювальної поверхні. Метод дозволяє врахувати вплив шумових параметрів оптичних приймачів випромінювання, попередніх підсилювачів сигналу електронного тракту радіометричних або пірометричних систем. Особливо важливе значення цей метод має в обробці й аналізі температурного поля для задач неруйнівного контролю складних просторово-розподілених об'єктів.

Як приклад застосування теплового неруйнівного контролю і моніторингу електротехнічного устаткування енергетичних установок безпосередньо під час експлуатації з використанням методів аналізу термографічних даних, на рис. 2 показано процедуру проведення поверхневого теплового аналізу корпусу турбогенератора типу ТВВ-220.

Обробка термограми поверхні ТГ описаним вище методом надає інформацію, що в камері холодного газу є дві приблизно рівні за площею зони з різними температурами газу. Профіль температури в камері холодного газу спільно з даними гістограми дозволяє зробити висновок щодо порушення в роботі системи охолодження гарячого водню теплообмінниками.

Метод вібраційної діагностики базується на аналізі зміни рівня вібрації за наявності ушкодження елементів конструкції ТГ. Переваги методу такі. По-перше, велика чутливість: оскільки величина збурення сили віброзбудження, яка викликана наявністю ушкодження, пропорційна квадрату індукції у повітряному проміжку, то стає можливим виявити

це ушкодження на ранній стадії розвитку. По-друге, можливість визначення вібрації, що виникає у вузлах далеко від датчика: оскільки викликані ушкодженням механічні коливання безперешкодно розповсюджуються через елементи конструкції генератора, то це дозволяє за допомогою встановлених датчиків з легкістю фіксувати вібрації на зовнішній поверхні осердя.

Ємнісний метод, в основі якого вимірювання неелектричних величин за допомогою ємнісних вимірювачів, які можуть працювати в умовах інтенсивних електромагнітних полів. Цей метод є одним з перспективних засобів вимірювання параметрів механічних дефектів у потужних ТГ.

Створення сучасної системи контролю та діагностування генераторів полягає в переході від детермінованої бази даних ознак до бази знань, яка використовує методи *нечіткої логіки* та надає можливість запобігання більшій кількості можливих небезпечних ситуацій, а в разі виникнення позаштатних режимів дозволяє обробити інформацію коректно. Для впровадження методів нечіткої логіки необхідно перейти від детермінованої бази цих ситуацій до простору нечіткої безлічі двійкових діагностичних ознак. Заради цього необхідно провести логічну декомпозицію системи, у результаті якої отримують множини ситуацій, що перетинаються. Декомпозиція дозволяє побудувати причинно-наслідкові залежності, які враховують перетин підмножин з коефіцієнтами достовірності можливих ситуацій, що описують простір

станів у випадку тієї чи іншої декомпозиції. Ситуація описується у вигляді «дерев», вершини яких — частини ситуацій, пов'язані з датчиками контролю реального стану об'єкта. Множини ситуацій представлені у вигляді графа їхньої підлеглості. У цьому випадку експертна система породжує певну послідовність локальних завдань, які реалізують глобальне завдання системи. За певної зміни умов функціонування об'єкта відбувається зміна міри значущості (пріоритетів) окремих локальних завдань під час формування рішення глобальної задачі, яка у свою чергу породжує зміну черговості їхнього рішення у процесі розв'язку глобальної задачі. Локальні завдання, які входять до складу вказаних систем, повинні припускати можливість їхнього рішення у різному порядку. Як модель таких завдань можливий функціонал, який вирішується відносно будь-якої підмножини своїх аргументів. Таким чином, представлена система діагностики на основі методу нечіткої логіки дозволяє зменшити зону пошуку на початковому етапі, надає можливість обґрунтованого вибору його початку та забезпечує зв'язок у процесі пошуку причини між окремими множинами можливих ситуацій.

Аналіз методів діагностики генераторів свідчить, що використання технічних рішень на основі мікроелектроніки, робототехніки та волоконної оптики дозволяє отримати значно повнішу інформацію щодо технічного стану ТГ. До найбільш ефективних методів діагностики можна віднести такі:

контроль генератора за допомогою введеної у повітряний проміжок *телекерованої вимірювальної апаратури* (щільність заклинання стержнів ОС, якість пресування окремих пакетів сталі осердя, стан міжлистової ізоляції осердя), огляд важкодоступної поверхні вузлів за допомогою ендоскопів, які мають високу роздільну здатність і можливість проникнення у вузькі проміжки вздовж усієї довжини активної сталі статора та ротора;

ультразвуковий контроль щільності крайніх пакетів сталі статора;

мікроспектральний аналіз механічних домішок, які містяться в охолоджувальному водні та зливах масла; використання *електронно-оптичних дефектоскопів* під час проведення високовольтних випробувань ізоляції ОС для спостереження за ступенем коронування;

визначення місцевого перегріву з продуктів *піролізу* ізоляції в охолодному газі.

Водночас на окрему увагу заслуговують такі методи діагностики.

Діагностика на основі нейронних мереж. Використання математичного апарату нейронних мереж забезпечує підвищення точності процесу діагностики шляхом застосування наявних знань щодо роботи аналогічних агрегатів. На додаток, результати вимірювання вібрації, як і будь-які інші фізичні вимірювання, схильні до деякої випадковості, у той час як апарат нейронних мереж належить до статистичних математичних методів, що дозволяє ставити «діагноз» за умов значних випадкових складових оброблювального сигналу. Перевагами застосування цієї технології є велика точність визначення дефекту та високий рівень автоматизації процесу. До недоліків необхідно віднести складність реалізації та навчання нейронної мережі, а також низький ступінь уніфікації (для кожного нового вузла необхідно створювати нову мережу та навчати її).

Електромагнітна діагностика. Оскільки поява дефекту в електричній машині супроводжується, як правило, значним підвищенням амплітуди електромагнітних параметрів у повітряному проміжку, то результати їхнього аналізу є основою достовірної діагностики. Хоча ці зміни відбуваються безпосередньо в зоні дефекту, вони можуть спостерігатися засобами діагностики на віддаленні від цієї зони, оскільки вільно розповсюджуються у конструктивному об'ємі машини. Перевагою такої діагностики є можливість її проведення без розбирання та зупини машини, у тому числі за умов експлуатації. Але під час виконання діагностування необхідно враховувати той факт, що максимальну деформацію магнітного поля, а, отже, і максимальну чутливість діагностичної ознаки можна отримати лише у разі неперервної реєстрації параметрів контролю.

Температурна діагностика. Особливе місце в оцінюванні технічного стану ТГ має температура обмоток, яка є основою як для його температурної діагностики, так і захисту. Водночас функції температурної діагностики та температурного захисту може виконувати одна загальна система або дві незалежні.

Джерела похибки визначення температури такі: за умов теплового перевантаження, яке зростає повільно, похибка обумовлюється вибором точки встановлення термодетектора і його похибкою вимірювання температури у цій точці;

за умов теплового перевантаження, яке зростає швидко, до вищевказаної додається похибка, обумовлена зміною форми температурного поля залежно від часу та кінцевою величиною теплоємності термодетектора.

У першому випадку це призводить до залежності опорів теплопровідності від часу, у другому — до залежності опорів теплопровідності від швидкості зміни температури. Похибка, обумовлена кінцевою величиною теплоємності термодетектора, зумовлює відставання зростання температури датчика від зростання температури ОС генератора. За таких умов ТГ ушкоджується раніше, ніж спрацьовує захист.

Одночасно про необхідність температурної діагностики ТГ під час його роботи свідчить наявність того факту, що реальні параметри експлуатації відрізняються від номінальних за параметрами довкілля (насамперед відхилення навколишньої температури від заданої величини як у напрямок підвищення, так і напрямом зменшення), енергопостачання (наприклад, робота на довгі або високої напруги лінії електропередачі, що обумовлює експлуатацію з підвищеним коефіцієнтом потужності) та режимів роботи (недозбудження, часті зупини та пуски). Крім цього, тепловий стан ТГ залежить від впливу змін, які виникли в його елементах (наприклад, засмічення вентиляційних каналів) і призводять, в основному, до збільшення нагріву.

Необхідно підкреслити, все частіше зазначається, що більшість окремих методів діагностики має специфічні недоліки, тому у більшості практичних випадків потрібен комплексний метод.

Як показує досвід експлуатації, найефективніший спосіб унеможливлення виникнення аварій має базуватися на засобах моніторингу режимних параметрів і діагностування стану обладнання: виявлення зміни параметрів дозволяє своєчасно вивести його в ремонт, не допустивши пошкодження та подальшої аварії. Для цього необхідно визначити оптимальну за витратами й інженерними рішеннями технологію та конфігурацію обслуговування. У світі існує декілька основних сервісних стратегій [31]: RCM — обслуговування з підтримки надійності; TBM — обслуговування за часом; CBM — обслуговування за станом; CM — коригуюче обслуговування. Наприклад, CBM-обслуговування визначається технічним станом обладнання, а для цього необхідні кошти на забезпечення моніторингу. Відповідно зменшується ймовірність пошкодження та витрати на сервісне обслуговування. Від моніторингу за станом можна відмовитися, але він потрібен для обладнання з низьким ступенем надійності, який підвищується за рахунок ремонтів, що у свою чергу збільшує витрати коштів. Але оскільки аварійні зупини зумовлюють більші

збитки, то вкладання додаткових коштів для оцінювання поточного стану обладнання, слідкування за його змінами та розробка прогнозу на майбутнє є розумним рішенням. На додаток, використання емпіричних даних за минулі роки дозволить зробити аналіз точнішим і достовірнішим.

Під час CBM-обслуговування застосовується велика кількість приладів, за показами яких встановлюється діагноз обладнання, іншими словами, оцінюється стан і приймається рішення щодо необхідності проведення відповідного сервісу. Така робота складна, бо потребує:

використання приладів, покази яких формують інформацію про зношеність обладнання;

базових знань, які надають можливість обійти можливий ризик аварії;

певну стратегію з визначення необхідності проведення обслуговування чи його перенесення через відсутність високої ймовірності ризику аварії;

стратегії з відновлення початкової надійності.

Для забезпечення ефективного виконання такого завдання необхідно розвивати ADS — автоматичну діагностичну систему, яка допомагає прийняти рішення за наявності великої кількості доступних діагностичних приладів.

Оскільки економіка промисловості зазнала певних змін з причини приватизації енергетичної промисловості, можна побачити збільшення акценту на важливість надійної роботи електроенергетичного обладнання та устаткування протягом усього «життєвого циклу», незалежно від їхньої первинної вартості. Крім цього, наявність сучасної електроніки та програмного забезпечення у потужній апаратурі, комп'ютерах і цифрових сигнальних процесорах спрощує та розширює здатність спостереження й аналізу фізичних механізмів і, що важливо, в області візуалізації результатів комплексної діагностики.

Потужні генератори енергоблоків АЕС відрізняються високими електромагнітними, тепловими й механічними навантаженнями, тому наслідки змінних режимів роботи для таких агрегатів досить важкі. І, відповідно, відмови пов'язані з тривалим часом відновлення та великими витратами. Наприклад, позапланове відключення енергоблоку № 3 Рівненської АЕС у 2016 році через пошкодження ТГ типу ТВВ-1000-2УЗ завдало збитків тільки через недовиробіток електроенергії понад 50 млн USD (при ціні 0,02 USD за 1 кВт-год), що перевищує вартість самого генератора. А з урахуванням витрат на ремонтно-відновлювальні роботи цю цифру необхідно под-

воювати. Зрозуміло, що контроль і діагностування технічного стану таких генераторів необхідно проводити безперервно.

На базі проведеного аналізу та досліджень [32, 33] основні вимоги до системи діагностики ТГ енергоблоків АЕС можна сформулювати так:

1. Система діагностики має бути багатофункціональною, вирішувати завдання неперервного контролю стану ТГ, а також завдання автоматичного та автоматизованого захисту з пріоритетом на останній вид захисту. Оскільки ця система діагностики повинна розв'язувати одночасно сотні діагностичних процедур з урахуванням того, що не кожна процедура однозначно з вірогідністю 1 визначає який-небудь дефект, то система діагностики має бути інтегрованою та комп'ютеризованою.

2. Система діагностики повинна вирішувати як мінімум чотири основні завдання, такі як:

оперативна інформаційна підтримка експлуатації (експрес-діагностика та допускний контроль);
вибір оптимальної стратегії відносно експлуатації та технічного обслуговування, у тому числі за наявності дефектів, які розвиваються (прогноз технічного стану та діагностики);
ремонт на основі деталізованої діагностики об'єкта з використанням математичних моделей;
візуальний моніторинг за рахунок спеціальних пристроїв контролю.

3. Для забезпечення гарантованої надійності експлуатації ТГ система повинна дозволяти проводити комплексну діагностику параметрів різної фізичної природи.

4. Необхідно пам'ятати про таке поняття як містечтво мінімалізму діагностики, яке полягає у тому, щоби добути правильну інформацію з машини, дозволяючи водночас з мінімуму аналізу надати чітке виявлення режиму зароджуваної відмови. У свою чергу, режими відмов показують, як ушкодження можуть бути виявлені на ранніх стадіях шляхом діагностики відповідних параметрів.

5. Джерелом інформації системи є дані неперервного контролю з первинних датчиків, установлених на ТГ, а також інформація, яка отримана в результаті оглядів і внесена у комп'ютер. Датчики повинні відповідати технічним вимогам для забезпечення безперервної та надійної експлуатації генератора, а їхня схема установки визначається з урахуванням вживаних способів діагностування, причому для кожної конструкції ТГ реперні точки установки деяких датчиків коригуються.

6. Для реалізації системи діагностики необхідні попередні випробування ТГ у всьому діапазоні очікуваного навантаження (активного та реактивного), температури холодоагенту, тиску водню й інших режимних параметрів. Дослідження поведінки агрегату в різних режимах роботи дозволить частково розділити параметри, які діагностуються, від взаємного їхнього впливу, а також надати еталонні значення фізичних характеристик і сформулювати інформаційну базу системи діагностики. Заради одержання відповідних даних потрібно накопити й обробити первинні дані від датчиків, розміщених у найбільш інформативних точках. Записування даних з усіх датчиків необхідно проводити одночасно (синхронно), а результати надавати у вигляді звіту з відповідними графіками, таблицями та висновками.

7. Інтерпретація результатів повинна надавати інформацію стосовно причиновості, а сама система бути спрямованою на корінні причини відмов. Причиново-наслідковий зв'язок має бути простеженим через потенційні послідовності відмов, можливо, шляхом використання причиново-наслідкових діаграм. Вірогідність складової відмови машини можна описати за допомогою функції густини вірогідності для цієї складової. Отримані функціональні криві небезпеки для кожної складової вузла ТГ можна об'єднати з метою отримання передбачуваної кривої життя для цього вузла, а потім ще раз об'єднати заради одержання кривої життя генератора. З функції сукупної небезпеки можна отримати модель для всього ТГ.

8. Діагностична система повинна адаптуватися до конкретного турбоагрегату, оскільки кожен ТГ характеризується своїми індивідуальними особливостями, внесеними у процесі його вдосконалення та ремонтів, і тому є досить унікальною конструкцією. Водночас надавати інформацію щодо аномальної поведінки агрегату можна тільки порівняно з нормально функціонуючим агрегатом такого ж типу. Це порівняння повинно здійснюватися протягом тривалого відрізка часу заради того, щоби не тільки оцінити стійкі відмінності параметрів діагностики, але й динаміку наростання цих відмінностей у часі. Порівняльний аналіз результатів первинної та вторинної багатопланової обробки експериментальних даних для «нормального» та «хворого» агрегатів дозволить виявити сукупність стійких відмінностей параметрів сигналів і створити для конкретного типу машини базу знань еталонних значень діагностичних параметрів для умовно бездефектної машини та базу даних залежності цих параметрів від ступеня розвит-

ку дефектів. За швидкістю наростання відмінностей можна прогнозувати залишковий ресурс агрегату, а також планувати профілактичні роботи за реальної необхідності. Після формального опису відмінностей параметрів, що діагностуються, створюються алгоритми для автоматичного виявлення аномалій та розробляються відповідні прикладні програми з метою їхнього використання як стандартних. У майбутньому на основі досвіду експлуатації можуть бути введені оцінки ступеня відхилення від норми. Локалізація джерел аномалій дозволить заздалегідь планувати поставку необхідних комплектуючих і матеріалів для виконання наступного ремонту, а також планово-запобіжних ремонтів, що надасть істотну економію за рахунок скорочення часу простою. Тобто система діагностики може бути пов'язана не тільки з процесом раннього виявлення ушкоджень, велика ефективність може бути досягнута за рахунок використання інформації з діагностики для планування технічного обслуговування, що дозволяє робити заплановані відключення та продовжити «життєвий цикл» ТГ. Однак додаткові переваги можуть бути реалізовані тільки в тому випадку, коли затрати на «життєвий цикл» генератора можуть бути зменшені шляхом застосування діагностики його стану, що у свою чергу потребує оцінювання поточних витрат, пов'язаних зі зміною експлуатації ТГ протягом всього власного «життєвого циклу». Враховуючи це, власник може працювати, підтримувати, оновлювати та розпоряджатися цим активом за допомогою інформації, наданої на основі цих процесів.

9. Важливим є приведення контрольованих параметрів до одного режиму (наприклад, номінального). Це виконується за рахунок побудови регресійної залежності, яка дозволяє отримати необхідні для діагностування розрахункові параметри.

10. Розширення діагностики досягається завдяки введенню характерних для різних видів нерегулярності діагностичних ознак на частотах, відмінних від частоти обертання та, відповідно, вищих складових, кратних частоті обертання.

11. Діагностична система повинна удосконалюватися з урахуванням досвіду її експлуатації на різних АЕС.

Витрати на діагностику залежать від значення процесу, в якому працює ТГ. Цифри завжди варіюються, але ніколи не менше 1 % від вартості системи. Більш типовий (і, мабуть, реалістичний) показник склав би 5 %; водночас спеціальні вимоги для процесів високого рівня, наприклад, ядерної промисловості, можуть «спровокувати» значення вище ніж 10 % [20].

Висновки

Впровадження в електроенергетику України сучасних систем моніторингу та діагностики є важливою й актуальною науково-технічною проблемою, спрямованою на підвищення надійності, ефективності роботи та навантажувальної здатності потужних генераторів енергоблоків атомних станцій, а також збереження та продовження їхнього експлуатаційного ресурсу. Економічний ефект від впровадження забезпечується підвищенням надійності експлуатації електроенергетичного обладнання, зниженням часу простою з причини аварійних відключень генераторів, зменшенням позапланового недовиробітку електроенергії, зниженням часу та витрат на ремонтно-відновлювальні роботи, кількості витратних запасних деталей і матеріалів, а також економічних втрат з причини непланових простоїв енергоблоків атомних станцій.

Список використаної літератури

1. Кучинский К. А. Влияние нарушения циркуляции дистиллята на термомеханические напряжения в изоляции обмотки статора турбогенератора мощностью 800 МВт / К. А. Кучинский // *Технічна електродинаміка*. — 2014. — № 1. — С. 75–80.
2. Кузьмин В. В. Электромеханические процессы в шихтованных магнитопроводах крупных электрических машин — новый подход к описанию явлений и разработке мероприятий по предотвращению появления дефектов / В. В. Кузьмин, А. Л. Лившиц, Т. В. Шпатенко, В. С. Шпатенко // *Гідроенергетика України*. — 2010. — № 4. — С. 27–31.
3. Титко О. І. Аналіз впливу кількості зруйнованих шпильок статора турбогенератора на механічні характеристики стяжних призм / О. І. Титко, В. А. Мистецький // *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. — 2015. — № 40. — С. 85–90.
4. Аврух В. Ю. О значении монолитности соединения бандажных колец с бочкой ротора турбогенераторов и контроля за его состоянием / В. Ю. Аврух // *Электрические станции*. — 2008. — № 11. — С. 54–59.
5. Основные причины отказов турбогенераторов и пути их предупреждения: [учебно-методическое пособие] / О. С. Голоднова — Москва : ИПК-госслужбы, 2005. — 92 с.
6. Васьковський Ю. М. Математичне моделювання електрофізичних процесів в ушкодженій з'єднувальній шині обмотки ротора турбогенератора / Ю. М. Вась-

- ковський, О. І. Титко // Технічна електродинаміка. — 2010. — № 4. — С. 33–38.
7. Диагностика турбогенераторов / И. А. Глебов, Я. Б. Данилевич. — Ленинград : Наука, 1989. — 119 с.
8. Грубой А. П. Проблемы охлаждения турбогенераторов большой и средней мощности / А. П. Грубой, П. Г. Гакал, А. В. Третьяк // Авиационно-космическая техника и технология. — 2011. — № 7. — С. 199–201.
9. Дефекты и неисправности генераторов / Ю. Н. Самородов. — Москва : НТФ «Энергопрогресс», 2005. — 100 с.
10. Риски повреждения турбогенераторов / Ю. Н. Самородов. — Москва : НТФ «Энергопрогресс», 2011. — 80 с.
11. Tavner P. Core faults in large generators / P. Tavner, A. Anderson // Proceedings of IEEE Power Applications. — 2005. — Vol. 152. — No. 6. — P. 1427–1439.
12. Yaghobi H. Analysis of magnetic flux linkage distribution in salient-pole synchronous generator with different kinds of inter-turn winding faults / H. Yaghobi, K. Ansari, H.-R. Mashhadi // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. — 2011. — Vol. 7. — No. 4. — P. 260–272.
13. Хвалін Д. І. Ефективність нового екранування крайніх пакетів осердя статора потужного турбогенератора / Д. І. Хвалін // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — № 2 (21). — С. 28–38.
14. Розвиток наукових засад та розробка засобів підвищення показників безвідмовності потужних турбо- і гідроенергетиків» (Звіт № ДР 0214U005180). — Київ : ІЕД НАН України, 2018. — 245 с.
15. Аксенов Ю. П. Комплексная диагностика турбогенераторов / Ю. П. Аксенов, И. В. Ярошенко // ЭЛЕКТРО. — 2006. — № 2. — С. 21–24.
16. Мазуренко О. О. Діагностика і управління розвитком теплових дефектів діючого турбогенератора / О. О. Мазуренко, В. В. Самсонов // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2014. — № 3. — С. 157–169.
17. Поляков В. И. Диагностика технического состояния каналов водяного охлаждения и креплений стержней обмотки мощных турбогенераторов для продления срока их службы / В. И. Поляков // Электрические станции. 2001. — № 10. — С. 34–39.
18. Biet M. Rotor faults diagnosis in synchronous generators using feature selection and nearest neighbors rule / M. Biet, A. Bijeire // IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drivers Conf. — 2011. — P. 300–306.
19. Neti P. Stator inter-turn fault detection of synchronous machines using field current and rotor search-coil voltage signature analysis / P. Neti, S. Nandi // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2009. — Vol. 45. — No. 3. — P. 911–920.
20. Condition monitoring of rotating electrical machines / P. Tavner, L. Ran, J. Penman, H. Sedding. — London, United Kingdom : The Institution of Engineering and Technology, 2008. — 282 p.
21. Завидей В. И. Оптические измерения температур по собственному излучению при контроле элементов электрических машин и устройств / В. И. Завидей // ЭЛЕКТРО. — 2008. — № 2. — С. 28–30.
22. Кузнецов Д. В. Применение методов виброконтроля для оценки состояния упругой подвески сердечника статора турбогенератора / Д. В. Кузнецов, М. И. Шандыбин // Электрические станции. — 2007. — № 10. — С. 57–65.
23. Qing G.-H. Vibration analysis of large turbogenerator stator system / G.-H. Qing, Y.-D. Hu // International Conference on Power System Technology. — 2002. — No. 4. — P. 2168–2172.
24. Левицький А. С. Контроль ступеня розпушення крайніх пакетів зубцевої зони осердя статора турбогенератора з застосуванням ємнісного сенсора / А. С. Левицький, А. І. Новік, Г. М. Федоренко // Технічна електродинаміка. — 2013. — № 6. — С. 88–93.
25. Костерев М. В. Нечітко-статистичний підхід до оцінювання експлуатаційної та режимної надійності об'єктів підсистем електроенергетичної системи / М. В. Костерев, Є. І. Бардик, В. В. Літвінов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — 2013. — № 1(14). — С. 122–128. — Серія: Електротехніка і енергетика.
26. Tavner P. Review of condition monitoring of rotating electrical machines / P. Tavner // IET Elect. Power Appl. — 2002. — Vol. 2. — No. 4. — P. 215–247.
27. Han Y. Using improved self-organizing map for partial discharge diagnosis of large turbogenerators / Y. Han, Y.-H. Song // IEEE Transactions, Energy Conversion. — 2003. — Vol. 18. — P. 392–399.
28. Zhang S. Fault diagnosis system for rotary machines based on fuzzy neural network / S. Zhang, T. Asakura, X. Xu, B. Xu // IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronic. — 2003. — Vol. 1. — P. 199–204.
29. Sunder R. Zustandsorientierte Instandhaltung von Dampfturbosätzen, Gasturbinenanlagen und Pumpen durch frequenzselektive Verfahren im Online-Einsatz / R. Sunder, A. Kolbasseff // Symposium zur schwingungsdiagnostischen Überwachung von Kraftwerksturbosätzen (Potsdam, 22–24.03.2006). — Potsdam : Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Garching, 2006. — S. 30.

30. Шевченко В. В. Тепловое состояние турбогенераторов малой и средней мощности с полным воздушным охлаждением / В. В. Шевченко, А. Н. Минко, Е. М. Фомина // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. — 2013. — № 3. — С. 173–176.
31. Виговський О. В. Вплив вологості та чистоти водню на надійність потужних електричних машин / О. В. Виговський, Д. І. Хвалін, В. А. Мистецький // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2017. — Вип. 29. — С. 14–21.
32. Розвиток наукових засад та розробка інтегральних методів і технічних засобів діагностики технічного стану генеруючого обладнання, вузлів та режимів експлуатації головних циркуляційних насосів енергоблоків АЕС (Звіт № ДР 0115U002982). — Київ : ІПБ АЕС НАН України, 2019. — 393 с.
33. Підвищення надійності та ефективності експлуатації турбогенераторів електричних станцій / Д. І. Хвалін. — Бостон, США : Primedia eLaunch LLC, 2021. — 152 с.

D. I. Khvalin

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

The Basic Requirements for Modern Diagnostic Systems of Powerful Turbogenerators

A turbogenerators design complication and the use of new auxiliary systems for the cooling intensification with increasing power unit lead to the decrease of their reliability. Therefore, the system and methods of control and diagnostics of generators main component parts to compensate this decrease of turbogenerators reliability were developed. In the paper, a system analysis for the reliability of nuclear power stations turbogenerators was carried out, and the main damaging elements and components, that were determined. It was found that almost half of the damages are stator and rotor, a third of which — stator core and winding bars defects. Modern diagnostic methods of technical condition for stator and rotor elements of powerful generators as well as their advantages and drawback are considered. All this allowed us to formulate the basic principles of diagnostic system construction for nuclear power stations powerful turbogenerators, which are based on the continuous control of the data on their most important parameters and defects, and deviations identification occurring in the most of operation cases

as well as preventing further work of equipment. The economic effect owing to the introduction of monitoring and diagnostic modern systems is ensured by increasing the reliability of electric power equipment operation, reduction downtime due to emergency shutdowns of generators, decrease unplanned electricity underproduction, reducing in time and cost of repair and restoration work, the number of consumable spare parts and materials, as well as economic losses due to unplanned downtime of nuclear power plant unit.

Keywords: powerful turbogenerator, nuclear power plant, damage, diagnostics, control, safety, reliability, efficiency.

References

1. Kuchynskyi K. A. (2014). Influence of distillate circulation failure on thermomechanical stresses in the stator winding insulation of a turbogenerator with power 800 MW. *Tekhnichna Elektrodynamika* [Technical electrodynamics], no. 1, pp. 75–80. (in Rus.)
2. Kuzmin V. V., Livshits A. L., Shpatenko T. V., Shpatenko V. S. (2010). [Electromechanical processes in laminated magneto-conductors of large electrical machines — a new approach to the effects description and the measures development for prevention of defects appearance]. *Hydroenerhetyka Ukrainy* [Hydropower of Ukraine], no. 4, pp. 27–31. (in Rus.)
3. Titko O. I., Mystetskyi V. A. (2015). [The analysis for effect of destroyed pins quantity of a turbogenerator stator on the mechanical characteristics of coupling prisms]. *The Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, vol. 40, pp. 85–90. (in Ukr.)
4. Avrukh V. Yu. (2008). [On the importance for solidity connection of bandage rings with turbogenerators rotor barrel and controls of its condition]. *Elektricheskiye stantsii* [Power stations], vol. 11, pp. 54–59. (in Rus.)
5. Holodnova O. S. (2005). *Osnovnyye prichiny otkazov turbogeneratorov i puti ikh preduprezhdeniya* [The main reasons of turbogenerators failures and ways for their prevention]. Moscow: IPK- gossluzhby, 92 p. (in Rus.)
6. Vaskovskyi Yu. M., Titko O. I. (2010). [Mathematical simulation of electrophysical processes in damaged bus connective of a turbogenerator rotor winding]. *Tekhnichna Elektrodynamika* [Technical electrodynamics], no. 4, pp. 33–38. (in Ukr.)
7. Hlebov I. A., Danilevich Ya. B. (1989). *Diagnostika turbogeneratorov* [Diagnostics of turbogenerators]. Leningrad: Nauka, 119 p. (in Rus.)

8. Gruboy A. P., Gakal P. H., Tretyak A. V. (2011). [Cooling problems for turbogenerators of large and medium power]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace Engineering and Technology], vol. 7, pp. 199–201. (in Rus.)
9. Samorodov Yu. N. (2005). *Defekty i neispravnosti generatorov* [Defects and faults of generators]. Moscow: NTF "Energoprogress", 100 p. (in Rus.)
10. Samorodov Yu. N. (2011). *Risks of damage to turbogenerators* [Risks of turbogenerators damage]. Moscow: NTF "Energoprogress", 80 p. (in Rus.)
11. Tavner P., Anderson A. (2005). Core faults in large generators. *Proceedings of IEEE Power Applications*, vol. 152, no. 6, pp. 1427–1439.
12. Yaghobi H., Ansari K., Mashhadi H.-R. (2011). Analysis of magnetic flux linkage distribution in salient-pole synchronous generator with different kinds of inter-turn winding faults. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 260–272.
13. Khvalin D. I. (2021). A new shielding efficiency of stator core end packets of a powerful turbogenerator. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 21, no. 2, pp. 28–38. (in Ukr.)
14. *Development of scientific bases and elaboration of means for increase the faultless indicators of powerful turbo-and hydrogenerators*. Report DR0214U005180. Kyiv: The Institute of Electrodynamics, NAS of Ukraine, 2018, 245 p. (in Ukr.)
15. Aksenov Yu. P., Yaroshenko I. V. (2006). [The complex diagnostics of turbogenerators]. *ELEKTRO*, no. 2, pp. 21–24. (in Rus.)
16. Mazurenko O. O., Samsonov V. V. (2014). [Diagnosis and heat defects development control of a working turbogenerator]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharkovskoykh tekhnologiy* [Scientific works of National University of Food Technologies], no. 3, pp. 157–169. (in Ukr.)
17. Polyakov V. I. (2001). [The technical condition diagnostics of water cooling channels and winding bars fastenings of powerful turbogenerators to extend their operation term]. *Elektricheskiye stantsii* [Power stations], vol. 10, pp. 34–39. (in Rus.)
18. Biet M., Bijeire A. (2011). Rotor faults diagnosis in synchronous generators using feature selection and nearest neighbors rule. *IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drivers Conf.*, pp. 300–306.
19. Neti P., Nandi S. (2009). Stator inter-turn fault detection of synchronous machines using field current and rotor search-coil voltage signature analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 3, pp. 911–920.
20. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. (2008). *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 282 p.
21. Zavidey V. I. (2008). Temperatures optical measurements by own radiation when controlling elements of electrical machines and devices. *ELEKTRO*, no. 2, pp. 28–30. (in Rus.)
22. Kuznetsov D. V., Shandybin M. I. (2007). Vibrocontrol methods application for assessment of the elastic hanger condition of a turbogenerator stator core. *Elektricheskiye stantsii* [Power stations], vol. 10, pp. 57–65. (in Rus.)
23. Qing G.-H., Hu Y.-D. (2002). Vibration analysis of large turbogenerator stator system. *International Conference on Power System Technology*, no. 4, pp. 2168–2172.
24. Levytskyi A. S., Novik A. I., Fedorenko G. M. (2013). The exfoliation degree control for tooth zone end packets of a turbogenerator stator core with the use of capacitive sensor. *Tekhnichna Elektrodynamika* [Technical electrodynamics], vol. 6, pp. 88–93. (in Ukr.)
25. Kosteriev M. V., Bardyk E. I., Litvinov V. V. (2013). [Difficult-statistical approach to assess the operation and condition reliability for subsystems objects of electric power system]. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnogo universytetu* [Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: Electrical Engineering and Power Engineering], vol. 14, no. 1, pp. 122–128. (in Ukr.)
26. Tavner P. (2002). Review of condition monitoring of rotating electrical machines. *IET Elect. Power Appl.*, vol. 2, no. 4, pp. 215–247.
27. Han Y., Song Y.-H. (2003). Using improved self-organizing map for partial discharge diagnosis of large turbogenerators. *IEEE Transactions, Energy Conversion*, vol. 18, pp. 392–399.
28. Zhang S., Asakura T., Xu X., Xu B. (2003). Fault diagnosis system for rotary machines based on fuzzy neural network. *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronic*, vol. 1, pp. 199–204.
29. Sunder R., Kolbasseff A. (2006). Zustandsorientierte Instandhaltung von Dampfturbosätzen, Gasturbinenanlagen und Pumpen durch frequenzselektive Verfahren im Online-Einsatz. *Symposium zur schwingungsdiagnostischen Überwachung von Kraftwerksturbosätzen (Potsdam: Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, Garching, 22–24.03.2006)*, s. 30. (in Ger.)
30. Shevchenko V. V., Minko A. N., Fomina Ye. M. (2013). [Heat condition of small and medium power turbogenerators with full air cooling]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitryanykh syl* [Scientific

- Works of Kharkiv National Air Force University], vol. 3, pp. 173–176. (in Rus.)
31. Vygovskiy O. V., Khvalin D. I., Mystetskyi V. A. (2017). [Influence of moisture and purity hydrogen on the reliability of powerful electrical machines]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 29, pp. 14–21. (in Ukr.)
32. *Development of scientific bases and elaboration of integral methods and technical means for technical condition diagnostics of generating equipment, units and operation rates of main circulation pumps NPP power units*. Report SR0115U002982. Kyiv: Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 2019, 393 p. (in Ukr.)
33. Khvalin D. I. (2021). *Pidvyshchennia nadiynosti ta efektyvnosti ekspluatatsiyi turboheneratoriv elektrychnykh stantsiy* [Increase of the reliability and operation efficiency of turbogenerators power plants]. Boston, United States of America: Primedia eLaunch LLC, 152 p. (in Ukr.)

Надійшла 03.02.2022

Received 03.02.2022

О. А. Кучмагра, Г. І. Одинокін

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

Інформаційно-вимірювальний канал із двокамерним блоком детектування параметрів нейтронного потоку

Ключові слова:

інформаційно-вимірювальний канал,
параметри нейтронних потоків,
двокамерний блок детектування,
інтервали часу між імпульсами

У статті представлено опис інформаційно-вимірювального каналу параметрів нейтронних потоків із двокамерним блоком детектування, який розроблено з застосуванням сучасної електроніки. Як детектори нейтронів використовуються камери поділу. Інформаційно-вимірювальний канал на основі такого блока детектування дозволяє фіксувати малі (починаючи з 10 нс) інтервали часу між імпульсами, які утворилися під час реєстрації нейтронів у блоці детектування. Отримана інформація зберігається на жорсткому диску комп'ютера. Для аналізу цієї інформації можуть бути використані сучасні стандартні програми Excel, SciLab і пакет програм для обробки довгих рядів даних IDL, які дають змогу проводити статистичний аналіз та аналіз на наявність корельованих та випадкових нейтронів від ядерних матеріалів, що діляться.

Вступ

Системи контролю стану паливовмісних матеріалів (ПВМ) в об'єкті «Укриття» (ОУ) [1] належать до систем, які використовують пасивні методи неруйнівного аналізу стану ядерних матеріалів [2]. Такі вимірювання є неруйнівними в тому сенсі, що вони не змінюють ні фізичний, ні хімічний стан ядерних матеріалів, що діляться (ЯМД), або ПВМ.

Нейтронне поле в приміщеннях ОУ можна поділити на чотири умовні групи:

- 1) нейтрони спонтанного поділу ЯМД;
- 2) нейтрони вимушеного поділу ЯМД;
- 3) нейтрони, відбиті від конструкцій у приміщеннях, де знаходяться ЯМД;
- 4) нейтрони (α , n) реакції на легких ядрах (у скупченнях ПВМ ОУ знаходиться багато радіоактивних α -випромінювачів).

Ця класифікація подібна до класифікації джерел нейтронів радіоактивних матеріалів, наведеної у [2].

Електричні імпульси з блоку детектування (БД) можна розглядати або як розподіл подій у часі, або як розподіл часових інтервалів між подіями, залежно від методики обробки отриманих даних [2]. У будь-якому випадку розподіл є результатом деякої комбінації подій, викликаних зареєстрованими нейтронами від вищеперерахованих чотирьох груп. За умов ділення ЯМД, як спонтанного так і вимушеного, зазвичай утворюються декілька миттєвих нейтронів, які корельовані або збігаються за часом, у той час як нейтрони (α , n) реакції і зовнішнього фону випадково розподілені в часі або не корельовані. Миттєві нейтрони випромінюються за час $\sim 10^{-14}$ с [3]. Їх об'єднує й те, що розподіл часових інтервалів між імпульсами від випромінених спонтанних та вимушених миттєвих нейтронів не відповідає пуассонівському розподілу. Миттєві нейтрони становлять значну частку з усіх випромінених нейтронів із ЯМД. Тому є певна ймовірність, що на детектор нейтронів потраплять декілька нейтронів майже одно-

© О. А. Кучмагра, Г. І. Одинокін, 2022

часно. Для того, щоб їх розділити в часі й зафіксувати як окремі імпульси, треба мати малий роздільний час роботи детектора та електронних вузлів вимірювального нейтронного каналу. У [2, рис. 16.2] наводиться графік розподілу інтервалів від зареєстрованих корельованих та випадкових нейтронів. Бачимо, що ефект наявності миттєвих нейтронів лежить в області мінімальних часових інтервалів між імпульсами від зареєстрованих нейтронів.

Миттєві нейтрони вимушеного поділу випромінюються в 4л простір, зазнають змін в енергії за рахунок як непружного, так і пружного зіткнень з атомами навколишнього середовища та «сповільнювача» навколо детектора. У кінцевому підсумку якась їх частина досягає детектора нейтронів. Підсумовуючись із нейтронами спонтанного поділу, нейтронами від (α, n) реакції та нейтронами, які відбиті від будівельних конструкцій, вони реєструються як деяке «перевищення» до відносно постійного рівня присутньої щільності потоку нейтронів. Слід зазначити, що бета-розпад ^{241}Pu , який призводить до утворення та накопичення ^{241}Am (альфа-активний елемент) у навколишньому середовищі, зумовлюють постійне, у цей час, зростання швидкості рахунку імпульсів на виході нейтронного інформаційно-вимірювального каналу (ІВК) за рахунок (α, n) реакції на легких ядрах (максимум накопичення ^{241}Am у ПВМ ОУ відбудеться приблизно через 76 років після аварії на Чорнобильській АЕС). На сьогодні відбувається дуже повільне зростання нейтронного випромінювання, яке залежить від початкової концентрації нуклідів та за певних умов і на реальних поточних відрізках часу може бути практично непомітним [4]. З іншого боку, нейтронне поле від спонтанного поділу, (α, n) реакції і відбиті нейтрони від будівельних конструкцій на ОУ відносно стабільні за відсутності зсуву конструкцій і намівання/вимивання скупчень рідких радіоактивних речовин. Останній процес без надходження води в новий конфайнмент ОУ ймовірно слід вважати відсутнім. Тому за підвищення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів (K_{ef}) у ЯМД ПВМ і, відповідно, збільшення кількості миттєвих нейтронів вимушеного поділу, слід очікувати збільшення кількості мінімальних значень часових інтервалів між імпульсами.

До питання про реєстрацію нейтронів

Основним завданням роботи системи контролю ядерної безпеки (СКЯБ) та експертної системи «Фініш» є контроль стану ПВМ ОУ, який однозначно

пов'язаний з ефективним коефіцієнтом розмноження нейтронів (K_{ef}). З метою контролю K_{ef} потрібно фіксувати зміну інтенсивності випромінювання миттєвих (корельованих) нейтронів від ПВМ як результат зміни стану ЯМД. Це вимагає проведення реєстрації часових інтервалів між імпульсами від детектора нейтронів у широкому діапазоні інтервалів між ними з можливістю фіксації наносекундних інтервалів. Якщо маса ЯМД не змінюється, то рівень (кількість) миттєвих випромінених нейтронів спонтанного поділу від ЯМД залишається порівняно незмінним. Зміни у статистиці інтервалів реєстрації нейтронних подій або в статистиці відліків стосуються тільки кількості миттєвих нейтронів вимушеного поділу. Якщо з якихось причин K_{ef} зростає, то зростає й кількість миттєвих нейтронів.

Якщо БД містить один детектор нейтронного випромінювання, то мінімальний інтервал часу між імпульсами визначається часом протікання фізичного процесу збору заряду в середині детектора, часом накопичення заряду в попередньому зарядочутливому підсилювачі, постійними інтегруванням та диференціюванням формувачів у наступних електронних вузлах вимірювального каналу.

Технічні апаратні реалізації ІВК параметрів нейтронних потоків з метою реєстрації випромінених миттєвих нейтронів наведено в [5, 6]. У [7] представлена апаратура реєстрації, яка здатна фіксувати часові інтервали між імпульсами від 40 нс. Процес накопичення та аналіз даних проводиться вторинною апаратурою. У таких технічних засобах у разі зміни методики аналізу даних потрібно вносити зміни й у вторинну вимірювальну апаратуру.

ІВК, який розроблено в Інституті проблем безпеки АЕС у Відділенні діагностично-вимірювальних систем, дозволяє фіксувати інтервали часу між імпульсами на виході БД [8]. У склад БД входять дві камери поділу. Прототип такої вимірювальної апаратури описано в [9].

Особливість розробленого ІВК в тому, що він здатен запам'ятовувати хронологічну послідовність (часові ряди) інтервалів часу між імпульсами з двокамерного детектора нейтронів із часовою роздільною здатністю в 10 нс. Це дає можливість проводити незалежну обробку накопичених даних різними методами статистичного і кореляційного аналізу. Основна перевага такого підходу до вимірювання параметрів нейтронного потоку в тому, що аналіз інтервалів часу між подіями або пошук кореляцій переноситься з етапу проведення вимірювань на етап

обробки даних, що значно спрощує та здешевлює експеримент, оскільки вимірювання проводяться однією й тією ж достатньо простою електронною апаратурою.

За традиційного ж підходу в разі зміни методики обробки даних потрібно змінювати вторинну ядерно-фізичну апаратуру.

Склад та опис технічних засобів

На рис. 1 наведена спрощена конструкція двокамерного блока детектування нейтронного випромінювання (БД-2), який входить до ІВК. У його складі УБ-01 — радіаційно стійкий перепідсилювач, детектор нейтронів — камера поділу КНТ-31.

Для зменшення залежності чутливості камери поділу від спектрального складу потоку нейтронів і ефективнішої реєстрації проміжних і швидких нейтронів, камери поміщені в «сповільнювач» нейтронів (стакан з поліетилену високого тиску).

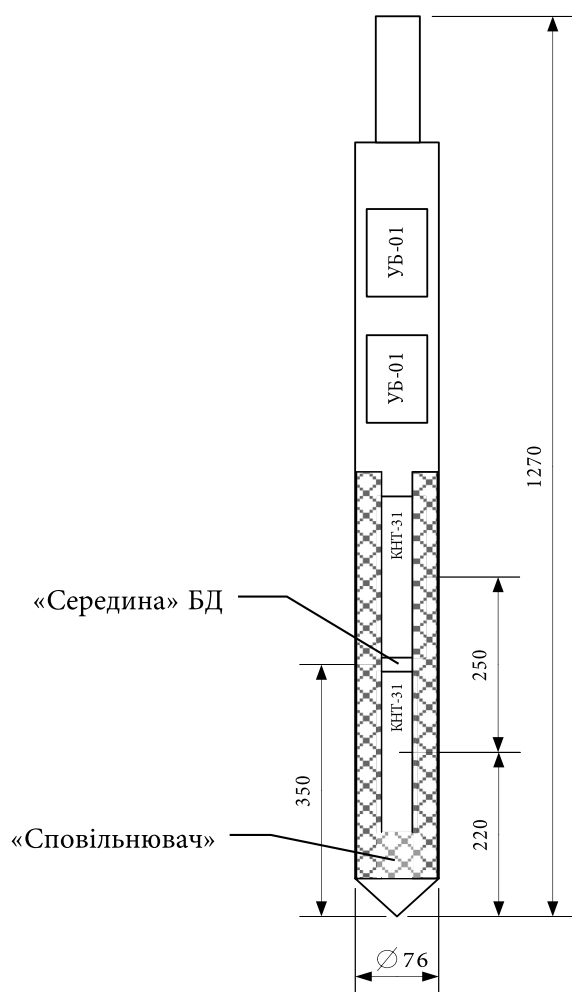


Рис. 1. Креслення загального вигляду блока детектування БД-2

Апаратурна складова ІВК (вимірювальна частина) надає первинну інформацію для подальшої статистичної обробки і за функціональним призначенням є нейтронним інформаційно-вимірювальним каналом, який має два незалежних канали (рис. 2).

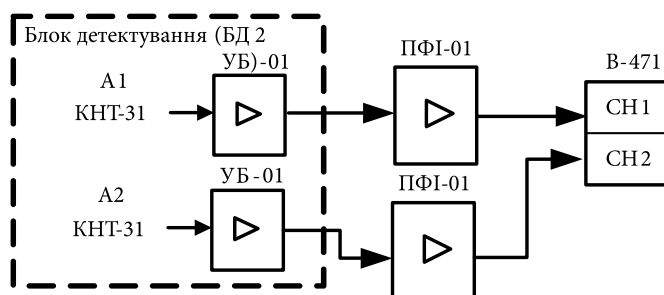


Рис. 2. Спрощена структура ІВК з первинною частиною інформаційно-вимірювальної апаратури

Первинна частина ІВК складається з блока детектування нейтронного потоку БД 2, двох формувачів-підсилювачів сигналу з кабельної лінії зв'язку ПФІ-01, реєстратора-вимірювача інтервалів часу між імпульсами В-471, до складу якого входять два однакових електронних вузла реєстрації — СН-1 та СН-2. За конструкцією ІВК — це двокамерний нейтронний радіометр. В-471 підключається до персонального комп'ютера через USB-порт. На комп'ютері встановлено спеціальне програмне забезпечення, за допомогою якого проводяться керування процесом вимірювання та обробка даних за розробленими методиками й алгоритмами.

В-471 дозволяє фіксувати інтервали часу від 10 нс до 1 000 с між імпульсними сигналами позитивної або негативної полярності амплітудою від 0,5 В до 50 В і тривалістю не менше 10 нс.

В-471 виконано в малогабаритному пластмасовому корпусі. На передній панелі розташовані роз'єми для входних сигналів та роз'єм виходу калібровача з відповідними індикаторними світлодіодами, а також індикатор живлення. На задній панелі розташовані роз'єми входу і виходу синхронізації, роз'єми для підключення кабеля блока живлення. Зовнішній вигляд В-471 показаний на рис. 3.

Функції включення і виключення живлення В-471 покладено на програмне забезпечення: після запуску програми відбувається включення живлення В-471, після завершення роботи програми живлення вимикається. Робота В-471 основана на лічильно-імпульсному принципі, що полягає в підрахунку кількості імпульсів робочої частоти протягом вимірю-



Рис. 3. Вимірювач інтервалів часу В-471. Вигляд з боку передньої і задньої панелей

ваного інтервалу часу. За допомогою програмного забезпечення виконується установка режимів роботи вимірювача, калібрування, запуск вимірювання, відображення і збереження результатів вимірювань.

Основні технічні характеристики вимірювача інтервалів часу В-471:

кількість вимірювальних каналів — 2;
діапазон вимірювання інтервалів часу, с — від 10^{-8} до 10^3 ;

амплітуда вимірюваних входних сигналів, В — від 0,5 до 50;

діапазон установки рівня дискримінації входних імпульсних сигналів:

при коефіцієнті ослаблення
вбудованого атенюатора 1:1, В — ± 4 ;

при коефіцієнті ослаблення вбудованого атенюатора 1:10, В — ± 40 .

Межі абсолютної похибки установки рівня дискримінації, В:

при коефіцієнті ослаблення вбудованого атенюатора 1:1, В — $\pm 0,1$;

при коефіцієнті ослаблення вбудованого атенюатора 1:10, В — ± 1 ;

вхідний опір вимірювальних каналів, МОм — $1 \pm 0,05$;

вхідна ємність вимірювальних каналів, пФ — не більше 25;

межі відносної похибки установки дійсного значення частоти вбудованого опорного генератора щодо номінального значення 10 МГц — $\pm 1 \cdot 10^{-7}$;

межі відносної зміни частоти вбудованого опорного генератора при зміні температури на 1°C в діапазоні робочих температур — не більше $\pm 5 \cdot 10^{-8}$;

час встановлення робочого режиму, год — не більше 1;

напруга живлення від мережі змінного струму, В — 220 ± 22 ;

споживана потужність, В · А — не більше 20;

габаритні розміри, мм — не більше $195 \times 115 \times 45$;

вага, кг — не більше 1,5.

На рис. 4 представлено результати натурних вимірювань із нейтронними джерелами, в яких присутні миттєві нейтрони — у сховищі відпрацьованого ядерного палива (СВЯП) на Чорнобильській АЕС. Натурні вимірювання проходили в липні 2017 р. Тривалість вимірювань 25 хвилин. На гістограмах, після комп'ютерної обробки інформації з електронних вузлів СН-1 та СН-2 добре видно, що в кожному окремому каналі вимірювання мінімальний зафік-

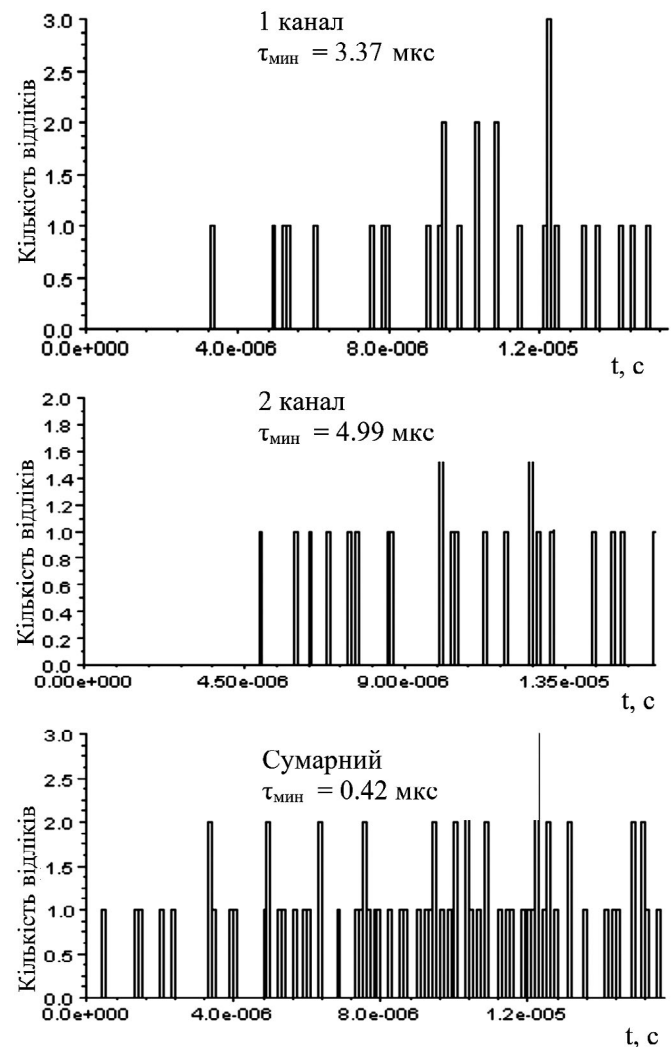


Рис. 4. Гістограми часових інтервалів між нейтронними імпульсами на виході ІБК з двокамерним блоком детектування

сований інтервал складає приблизно 3,4–5 мкс. При підсумовуванні імпульсів на виході В-471 (представлення зареєстрованих часових інтервалів на одній часовій осі від електронних вузлів СН-1, СН-2) зафіксований мінімальний інтервал часу між імпульсами відповідає приблизно 400 нс.

Можна припустити, що інтервали реєстрації менш ніж 400 нс не фіксувались, тому що тривалість вимірювань досить невелика і наявність миттєвих нейтронів мала. За збільшення тривалості та при вимірюванні параметрів нейтронних потоків з джерел з більшими значеннями K_{ef} можна очікувати, що будуть зафіксовані менші часові інтервали.

Висновки

1. Розроблений ІВК параметрів нейтронного потоку з двокамерним блоком детектування дозволяє реєструвати часові інтервали між нейтронними імпульсами значно менші (починаючи з 10 нс) порівняно з одноканальними нейтронними радіометрами.

2. Наявність часових інтервалів у наносекундному діапазоні значень з достатньою вірогідністю можна класифікувати як імпульси реєстрації миттєвих нейтронів ділення, а зміна їхньої кількості може позначати зміну ефективного коефіцієнта розмноження ЯМД.

3. Запропонована конфігурація ІВК є перспективною і може бути розширена за кількістю камер ділення та електронних вузлів реєстрації нейтронів для більш точної діагностики і прогнозування стану ЯДМ ОУ.

Список використаної літератури

1. Высотский Е. Д. Особенности контроля ядерной безопасности объекта «Укрытие» в период сооружения нового безопасного конфайнмента / Е. Д. Высотский, А. И. Довыдьков, В. А. Краснов, В. Н. Щербин // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2011. — Вип. 17. — С. 91–97.
2. Райлли Д. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. Справочник / Д. Райлли, Н. Энслин, Х. Смит, С. Крайнер // Отчет Комиссии США по ядерному регулированию NUREG/CR-5550. Перевод с английского. — ВНИИА, 2007. — 703 с.
3. Фролов В. В. Ядерно-физические методы контроля делящихся материалов / В. В. Фролов. — Москва : Энероатомиздат, 1989. — 185 с.
4. Бегичев С. Н. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС / С. Н. Бегичев, А. А. Боровой, Е. В. Бурлаков

и др. // Препринт ИАЭ-5268/3. — Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова, 1990. — 16 с.

5. Degweker S. B. An improved technique for passiv neutron assay through the use of extendable dead time and higher moments analysis // S. B. Degweker, M. Srinivasan, C. G. Panchal // Nuclear Power and Safety. — 1990. — Vol. 18 (3). — P. 38–46.

6. Degweker S. B. Effect of deadtime on the statistics of time correlated pulses — Application to the passiv neutron assay problem / S. B. Degweker // Annals of Nuclear Energy. — 1989. — Vol. 16, No. 8. — P. 409–416.

7. Fulvio A. Di. Passiv assay of plutonium metal plates using a fast-neutron multiplicity counter / A. Di. Fulvio, T. H. Shian, T. Gordan, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physic. — 2017. — Vol. 855. — P. 92–101.

8. Розробка та вдосконалення методів нейтронної діагностики для визначення параметрів безпеки ядерних установок : (Звіт про науково-дослідну роботу (проміжний) / ІПБ АЕС НАН України. — № ДР 0117U002305, інв. № 4024. — Чорнобиль. 2016. — 76 с.

9. Degweker S. B. Development and testing of neutron pulse time stamping data acquisition system for neutron experiment / S. B. Degweker, Y. Alim, R. Kumar, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physic. Research Section. — 2015. — Vol. 770. — P. 8–13.

O. A. Kuchmagra, G. I. Odynokin

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

Two-Chamber Unit for Detecting Parameters in the Neutron Flux

The detection unit contains two neutron detectors — fission chambers KNT-31 or KNT 31-1, in which the radiator sensitive to neutron radiation is ^{235}U (concentration of ^{235}U in the radiator is more than 90%). The detection unit also includes two radiation-resistant preamplifiers (primary electronic equipment), which are connected to the cable transmission line to the secondary equipment, which captures the moment of pulses from the reaction of neutrons with the fission chamber radiator and save information about the time of these pulses. Further processing of the intervals between neutron events (intervals between pulses) can be done according to individual methods of the experimenter. The presence of a data processing unit

type B-471 significantly expands the capabilities of the experimenter on the conclusions of statistical analysis of data and forecasting the development of emergencies in fuel-containing materials of the Shelter object.

The presence of time intervals in the nanosecond range of values with sufficient probability can be classified as pulses of registration of instantaneous fission neutrons, and a change in their number may indicate a change in the effective multiplication factor of fuel containing materials.

The analysis of the statistical properties of the flow of neutron event recording intervals by the electronic equipment makes it possible to predict the occurrence of a self-sustaining chain reaction. This is the main task of the Shelter object nuclear safety system. The proposed configuration of the CPI is promising and can be expanded by the number of fission chambers and electronic neutron detection units for more accurate diagnosis and prediction of the state of fissile nuclear materials.

Keywords: information-measuring channel, neutron flux parameters, two-chamber block detection, time intervals between pulses.

References

1. Vysotskyi Ye. D., Dovydkov A. I., Krasnov V. A., Shcherbin V. N. (2011). [Features of nuclear safety control of the Shelter object during the construction of a new safe confinement]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 17, pp. 91–97. (in Rus.)
2. Reilly D., Ensslin N., Smith H., Krainer S. (2007). Passive non-destructive analysis of nuclear materials. In: *Report of the US Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-5550*. VNIIA, 703 p. (in Rus.)
3. Frolov V. V. (1989). *Yaderno-fizicheskiye metody kontrolya delyashchikhsya materialov* [Nuclear physics methods for controlling fissile materials]. Moscow: Energoatomizdat, 185 p. (in Rus.)
4. Begichev S. N., Begichev S. N., Borovoy A. A., Burlakov E. V., et al. (1990). *Topливо reaktora 4-go bloka CHAES* [Fuel of the reactor of the 4th block of the Chornobyl NPP]. Preprint IAE-5268/3. I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, 16 p. (in Rus.)
5. Degweker S. B., Srinivasan M., Panchal C. G. (1990). An improved technique for passiv neutron assay through the use of extendable dead time and higher moments analysis. *Nuclear Power and Safety*, vol. 18, no. 3, pp. 38–46.
6. Degweker S. B. (1989). Effect of deadtime on the statistics of time correlated pulses — Application to the passiv neutron assay problem. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 16, no. 8, pp. 409–416.
7. Fulvio A. Di., Shian T. H., Gordan T., et al. (2017). Passiv assay of plutonium metal plates using a fast-neutron multiplicity counter. *Nuclear Instruments and Methods in Physic*, vol. 855, pp. 92–101.
8. *Development and improvement of neutron diagnostic methods for determining the safety parameters of nuclear installations*. Report on research work (intermediate). State registration number 0117U002305, inv. no. 4024. Chornobyl, 2016, 76 p. (in Rus.)
9. Degweker S. B., Alim Y., Kumar R., et al. (2015). Development and testing of neutron pulse time stamping data acquisition system for neutron experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physic. Research Section*, vol. 770, pp. 8–13.

Надійшла 17.02.2022

Received 17.02.2022

В. В. Деренговський, І. С. Скітер

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

Трирівнева модель оцінки потенційних сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему на основі глобального факторально-індикаторного критерію

Ключові слова:

аналіз сценаріїв,
об'єкт «Укриття»,
складна система структурного типу,
факторально-індикаторна модель,
корегування рівня узгодженості,
глобальний критерій цінностей

У роботі викладено дослідження, пов'язані з аналізом сценаріїв перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему. Визначено параметри оцінки сценаріїв та вимоги до їхнього представлення. Розроблено алгоритм побудови моделі оцінки сценаріїв на основі факторально-індикаторних наборів. Запропоновано модель підвищення рівня узгодженості попарних порівнянь альтернатив під час визначення глобального критерію цінності сценаріїв. Створено трирівневу модель оцінки сценаріїв. Запропоновано корекцію методу аналізу ієрархій з метою формування узгоджених матриць попарних порівнянь індикаторів у окремих факторах та загальної узгодженої матриці порівнянь факторів. Розроблена модель дає змогу проводити визначення глобальних цінностей сценаріїв на основі факторально-індикаторних оцінок. Використання запропонованої методики дозволяє впорядкувати, алгоритмізувати і коригувати процедуру експертного оцінювання якісно та кількісно різнорідних факторів та підвищити якість отримуваних результатів для формування процесу прийняття рішень перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему.

Вступ

Створення нового безпечного конфайнмента (НБК) є другим етапом перетворення об'єкта «Укриття» (ОУ) на екологічно безпечну систему. Основні наукові проблеми, пов'язані з реалізацією цього глобального завдання, охоплюють: завдання з моніторингу рівня ядерної та радіаційної безпеки; контроль і прогноз стану ядерних матеріалів; поводження з радіоактивними матеріалами; розробку та впровадження технологій демонтажу конструкцій та вилучення ядерних матеріалів; оцінку екологічного стану територій та вплив на них кожного зі зкупчень паливовмісних матеріалів (ПВМ) тощо.

За визначенням [1], НБК — це споруда, яка включає в себе комплекс технологічного обладнання для

вилучення ядерних матеріалів, поводження з радіоактивними відходами (РАВ) та інші системи, призначена для діяльності з перетворення ОУ на екологічно безпечну систему для забезпечення безпеки персоналу, населення та довкілля.

Основними функціями НБК є: забезпечення нерозповсюдження РАВ поза межами НБК; технологічне забезпечення — розміщення і функціонування систем та елементів, забезпечення нормальної експлуатації НБК тощо; фізичний захист ядерних та радіоактивних матеріалів, забезпечення системи гарантій Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ).

Вказані функції свідчать про те, що НБК є багатофункціональним об'єктом, експлуатація якого потребує врахування численних систем, підсистем,

© В. В. Деренговський, І. С. Скітер, 2022

елементів, зв'язків між ними. Причому це стосується як наявних, так і тих, які будуть створені в процесі експлуатації НБК.

Тому реалізація поставлених завдань створення та експлуатації НБК потребує, крім технічних та технологічних ресурсів, системного підходу до оцінки станів НБК, їхнього функціонування, поведінки, динаміки. Використання сучасного апарату імітаційного моделювання, математичних методів прийняття рішень дасть змогу оптимізувати наявні людські та фінансові ресурси, час, дозові навантаження на персонал та населення, радіаційний вплив на навколишнє природне середовище та формувати оптимальні управлінські рішення під час аналізу сценаріїв з перетворення ОУ на екологічно безпечну систему.

Слід, однак, зазначити, що процес перетворення ОУ на екологічно безпечну систему є багатоетапним і передбачає такі етапи:

- зменшення ризиків впливу іонізуючого випромінювання;

- створення додаткових захисних бар'єрів, зокрема таких, що забезпечуватимуть належні умови для виконання робіт на наступному етапі;

- вилучення з ОУ ПВМ, високоактивних та довгоіснуючих РАВ, переведення їх у безпечний стан, проміжне контрольоване зберігання та захоронення у глибинних сховищах (стабільних геологічних формаціях) у разі, якщо до початку їхнього вилучення (орієнтовно 30–50 років) не запропоновано альтернативного шляху забезпечення безпеки зберігання матеріалів у ОУ.

Введення в експлуатацію НБК є тільки другим етапом реалізації цього завдання [2]. Нині розпочалися роботи з реалізації третього етапу, і вибір сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему є початком його реалізації.

Незважаючи на завершення будівництва та введення в експлуатацію НБК, скупчення ПВМ, що утворилися внаслідок запроектої аварії на четвертому енергоблоці, і надалі залишаються головним джерелом небезпеки ОУ. Причому потенційна небезпека ПВМ з часом може зростати внаслідок спонтанного руйнування поверхні лавоподібних ПВМ з утворенням високоактивного пилу. Утворення такого пилу в ОУ несе певні загрози, що можуть призвести до зниження рівня безпеки НБК під час періоду його експлуатації.

Незважаючи на тривалий термін експлуатації НБК, який складає 100 років, наявність трансуранових елементів у складі ПВМ буде обумовлювати

загрозу для довкілля ще багато тисяч років. Це свідчить про те, що проблема вибору сценаріїв подальшого перетворення ОУ на екологічно безпечну систему зберігає свою актуальність [3] і після введення в експлуатацію НБК та потребує проведення спеціальних наукових досліджень. Серед завдань аналізу потенційних сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему після введення в експлуатацію НБК є: визначення та аналіз факторів, що впливають на вибір сценаріїв перетворення ОУ;

- розробка методики порівняльного аналізу сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему;

- порівняльний аналіз сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему та вибір найкращого для реалізації.

Об'єкт дослідження представляє собою складну систему структурного типу, яка описується масивами факторів — технічних, технологічних, соціальних, економічних тощо, які в свою чергу формуються під впливом індикаторів, характерних тільки для них. Крім того, набори факторів та їхніх індикаторів можуть мати як параметричні характеристики, так і бути оціненими якісно за допомогою експертів. Тому ефективне вирішення завдань порівняльного аналізу сценаріїв також потребує системного підходу та створення алгоритмів і моделей для підтримки прийняття рішень на основі множини якісно та кількісно різнорідних факторів та їхніх індикаторів. Це дасть змогу особам, які приймають рішення (ОПР), усунути проблему оцінювання не лише окремого сценарію перетворення ОУ на екологічно безпечну систему, але й альтернатив на основі визначених факторів та їхніх індикаторів.

Стан проблеми та аналіз літературних даних

Проблема перетворення ОУ на екологічно безпечну систему на різних етапах детально описана у працях [4–15]. Зокрема, у монографії [7], яка оснований на висновках і результатах робіт, що проводилися протягом 30 років після аварії на ЧАЕС і пов'язані з вивченням стану ОУ та його перетворення на екологічно безпечну систему, представлено причини аварії на ЧАЕС, і особлива увага приділяється питанням перетворення ОУ на екологічно безпечну систему та теперішньому стану справ у цій проблемі. У роботі [9] розроблено загальну послідовність проведення робіт та принципові технологічні рішення з урахуванням технічних особливостей дистанційно керованих агре-

гатів та системи основних кранів НБК для вилучення ПВМ і супутніх РАВ з верхніх відміток ОУ. У роботі [13] за допомогою методу аналізу «доз — витрат — вигоди» проаналізовано стан проблеми доцільності дезактивації радіоактивно забруднених об'єктів, що утворилися під час аварії на ЧАЕС, що будуть утворюватися під час діяльності з перетворення ОУ на екологічно безпечну систему, а також діяльності зі зняття з експлуатації ЧАЕС. У роботі [15] представлено концептуальні рішення щодо «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій ОУ.

Питання побудови математичних моделей і методів планування та прийняття рішень у складних системах в умовах невизначеності в Україні висвітлюються в працях провідних українських науковців [16–19] та ін. У роботі [20] представлено вдосконалений метод багатокритеріального аналізу об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями в умовах невизначеності шляхом вибору оптимального варіанта втручання в стан екологічної безпеки цих об'єктів. У роботі [21] вивчається багаторівнева факторна модель з глобальними і локальними індикаторами, характерними до кожного окремого об'єкта дослідження. Глобальні і локальні фактори моделі оцінюються окремо, без аналізу взаємного впливу. Розподіл між ними здійснюється на основі канонічного кореляційного аналізу, що не зовсім прийнятно до об'єктів чи, як у нашому випадку, сценаріїв, які мають параметричні та непараметричні оцінки факторів, індикаторів. У роботі [22] дається оцінка впливу експертних знань на побудову моделей у системах з якісно неоднорідними факторами; представлено метод для обліку неточних даних і різного досвіду експертів на основі нечітких систем виведення (fuzzy inference systems, FIS). У роботі [23] розглянуто підходи до формування процесу прийняття рішень за наявності конфліктуючих критеріїв та в умовах зростання тенденції до росту масиву даних у системі, яка характеризується.

Поряд із наявністю публікацій з тематики аналізу складних систем з якісно неоднорідними факторами огляд пропонованих моделей є неоднозначним, має певні обмеження і значною мірою обмежений параметричними даними. Крім того, вплив експертних знань на оцінку станів систем є занадто суб'єктивним, більшість методологій припускають, що взаємозв'язки між змінними є лінійними і можуть бути оцінені кореляційними методами.

Саме тому, на наш погляд, необхідно розглядати об'єкт дослідження саме як систему факторів, у межах кожного з яких існує система індикаторів, які

його визначають і, відповідно, формують якість та вагу відповідного фактору. Це означає, що система формуючих індикаторів також набуває актуальності не лише як показник оцінки альтернативи, але й як оціночний показник ефективності управління в цілому [24]. Розглядаючи об'єкт дослідження, слід зазначити, що серед масиву факторів і критеріїв та індикаторів, які їх формують, можна виділити як якісні, так і кількісні показники. Якщо перші можна застосувати для оцінки будь-якого рішення, то використання критеріїв другої групи потребує суворої формалізації процесу вибору. Прагнення до значного узагальнення і неврахування якісних критеріїв, індикаторів, факторів, які описують сценарії перетворення ОУ на екологічно безпечну систему, може призводити до спрощення для ОПР ситуації і в подальшому негативно відіб'ється на кінцевому результаті за рахунок потенційного неврахування окремих складників. Доцільність ухвалення ефективних управлінських рішень залежить від обґрунтованого вибору критеріїв, які формують фактори оцінки сценаріїв, їх «ваги» та значущості в наборі тощо. Тож постає питання визначення показників подібного оцінювання та ранжування масиву факторів за рівнем їхньої значущості в моделях прийняття рішень щодо оцінки сценаріїв.

Об'єкт дослідження — ОУ — представляє собою складну систему структурного типу, яка поєднує в собі різні технологічні, технічні, економічні та інші фактори, які впливають на оцінку її стану. Крім того, набори індикаторів, характерних для вказаних факторів, можуть бути представлені якісно та кількісно, належати до різних факторів чи бути унікальними. Саме це вносить невизначеність у процеси оцінювання. У разі постановки завдань оцінювання сценаріїв, які базуються на факторах та індикаторах щодо поводження з ПВМ, значною мірою виявляється вплив зовнішнього середовища, внутрішніх технічних та технологічних умов, запитів та вимог ОПР тощо. Оцінка сценаріїв за таких умов та стану системи може бути проведена за допомогою алгоритму, який може проводити ранжування факторів з урахуванням їхньої внутрішньої структури (відповідного набору індикаторів). Чисельною мірою оцінки сценарію може виступати інтегральний (глобальний системний) критерій, визначений на основі повного структурного аналізу факторів. При цьому також повинні бути враховані несистемні параметри оцінки — зовнішні та внутрішні чинники, переваги ОПР тощо.

Виходячи з вищеописаного, метою дослідження є створення алгоритму аналізу сценаріїв та на його

основі моделі оцінки факторів потенційних сценаріїв за допомогою визначення глобального факторально-індикаторного критерію, створення методики підвищення рівня узгодженості матриці попарних порівнянь сценаріїв з урахуванням факторально-індикаторної структури.

Алгоритм ранжування факторів та процесу побудови багатопарної моделі оцінки сценаріїв

Аналізуючи потенційні сценарії перетворення ОУ на екологічно безпечну систему слід зазначити, що їхня оцінка проводиться як за кількісними, так і за якісними критеріями. Крім того, залучення до аналізу експертів та проведення ними експертних оцінок факторів призводить до збільшення невизначеності в процесі формування управлінських рішень. Усунення цього недоліку може бути реалізоване за рахунок формалізації процедур представлення факторів та їхніх індикаторів, чисельних оцінок попарних порівнянь тощо, «оцифруванням» під час порівняння якісних критеріїв. Основними проблемами при цьому є, по-перше, включення в факторально-індикаторні набори якісних критеріїв та додаткові процедури з їхньої параметризації; по-друге, під час формування критеріїв необхідно враховувати те, що оптимальність цільової функції не може бути досягнута, наприклад, за рахунок «заміщення» параметрів — збільшення/зменшення одного фактора чи індикатора за рахунок зменшення/збільшення іншого; ОПР повинна мати достатній рівень кваліфікації для трактування отриманих результатів та формування на їхній основі оптимальних управлінських рішень [25].

Аналіз сценаріїв перетворення ОУ на системному рівні передбачає оперування набором факторів оцінювання. Особливістю формування масиву даних для комплексного оцінювання та порівняння сценаріїв є те, що обрані для аналізу фактори містять у собі на другому рівні декомпозиції набір індикаторів, які значною мірою визначають вагомість факторів та їхню значущість. Таким чином, загальний опис системи «оцінка сценаріїв» може бути формально представлений, як і у [24], у вигляді кортежу виду:

$$S = \langle F, R(F), I, R(I) \rangle, \quad (1)$$

де $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^{1m}\}$ — множина критеріїв оцінки станів системи, факторів оцінки сценарію; $f^i = \{I^1, \dots, I^j, \dots, I^k\}$ — i -й фактор, представлений за допомогою набору індикаторів $I^j \in I$;

$R_{(F)}, R_{(I)}$ — функціональні перетворювачі для множини факторів та їхніх індикаторів відповідно.

Оцінку рівня значущості факторів, сформованих своїми наборами індикаторів у межах окремого сценарію, доцільно проводити за допомогою методики аналізу ієрархій (МАІ), запропонованої Т. Сааті [26]. Використання МАІ в такому випадку дасть змогу проводити експертні оцінки (порівняння) не тільки узагальнених факторів, але й їхньої внутрішньої структури. Цим самим буде досягнуто виконання основних принципів теорії систем — ієрархії, збереження і причинно-наслідкових обмежень [25].

Вхідними умовами до використання методики є множини факторів для $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^m\}$ та масиви індикаторів для кожного із факторів: $f^i : I^j = i_1^j, \dots, i_k^j$. Тоді завдання визначення цінностей сценаріїв буде модифіковано до визначення ваг факторів, які визначені характерними саме для них наборами індикаторів. Тоді окремий сценарій буде представлений глобальним чи інтегральним критерієм цінності w_{glob}^j , визначеним на основі ваг індикаторів та ваг факторів.

Процес комплексного аналізу сценаріїв з урахуванням факторів та індикаторів, які їх формують, представлений на рис. 1.

Модель визначення глобальних цінностей сценаріїв є поетапним процесом визначення на кожному рівні ваг факторів та з урахуванням їхньої внутрішньої структури — ваг наборів індикаторів у межах окремого сценарію.

На першому етапі — *першому рівні моделі* — формуються масиви факторів $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^m\}$. Формування масивів факторів та індикаторів проводиться двома групами користувачів — інженером зі знань (експертом, експертами) та ОПР. При цьому можливе первинне якісне оцінювання значущості факторів та оцінювання сценаріїв.

На другому етапі — *другому рівні моделі* — визначаються критеріальні набори, які характеризують окремі фактори відповідними їм індикаторами $f^i : I^j = i_1^j, \dots, i_k^j$. При цьому в межах кожного окремого фактора набір індикаторів має якісно однорідні показники, які формуються на основі груп факторів. Залежно від характеристики групи (технологічна, технічна, економічна та інші) фактор може характеризуватися як параметричними наборами індикаторів, які мають результати вимірювань, так і непараметричними індикаторами, визначеними якісно, лінгвістично, на основі експертних оцінок тощо. У межах кожного факторального набору $f^i : I^j = i_1^j, \dots, i_k^j$

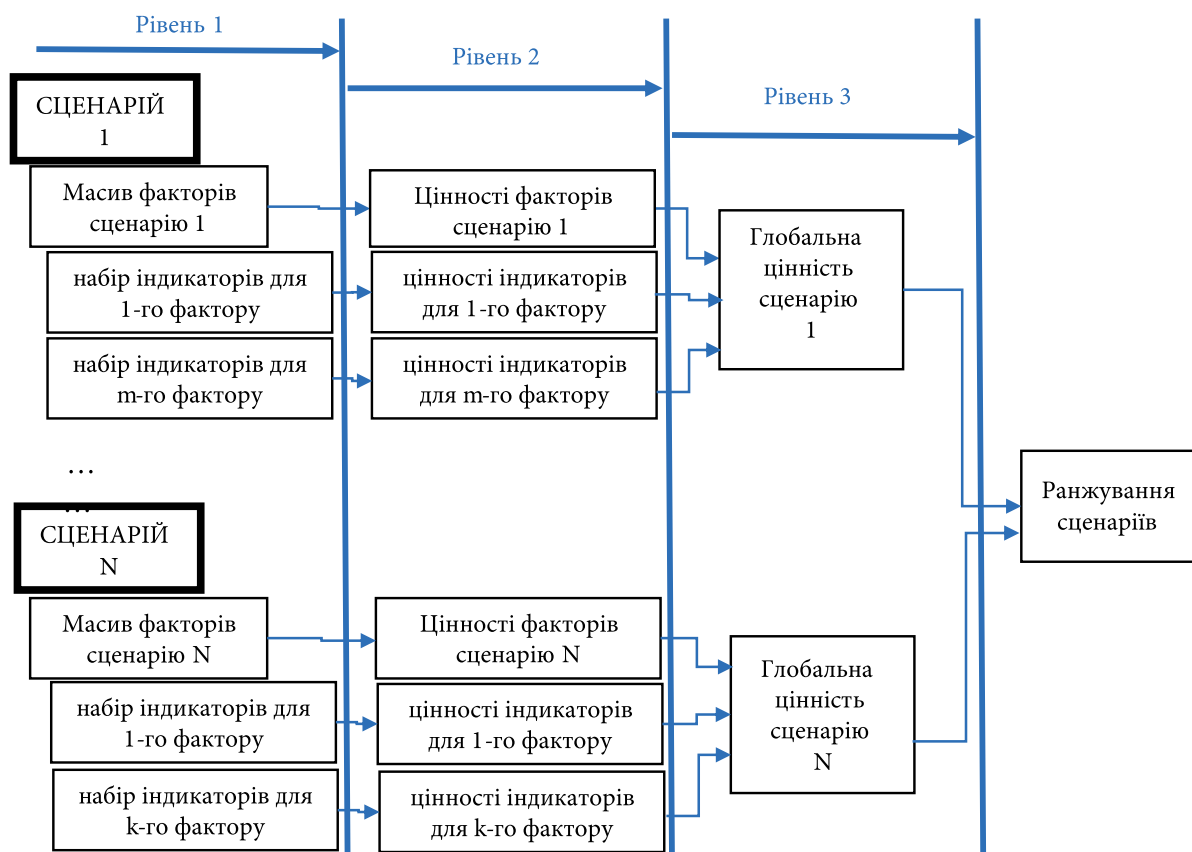


Рис. 1. Процес визначення цінностей сценаріїв на основі факторально-індикаторного оцінювання

необхідно визначити вектор відносних цінностей для індикаторів, які його формують $\{\omega_1^i, \dots, \omega_k^i\}$. На основі методики Сааті [26] проводиться попарне порівняння індикаторів. Для кожного фактора f^i з набору $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^m\}$ формується матриця попарних порівнянь $A^F = (a_{ij}^F)$ індикаторів $f^i : I^j = i_1^j, \dots, i_k^j$, на основі якої визначається їхній вектор відносних цінностей — чисельних мір впливу на елементи наступних рівнів ієрархії. Реалізація другого рівня моделі дає можливість проводити чисельне ранжування індикаторів за їх вагами та значущостями в факторальних наборах; якість оцінки факторів і порівняння сценаріїв підвищується.

На третьому етапі — *третьому рівні моделі* — проводиться аналогічна процедура, але вже на вищому рівні узагальнення — визначення ваг $\{\Omega^1, \dots, \Omega^m\}$ факторів $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^m\}$ та їх чисельне порівняння. При цьому побудова матриці попарних порівнянь факторів характеризується якісною і кількісною різноманітністю факторальних наборів $F = \{f^1, \dots, f^i, \dots, f^m\}$, параметри яких можуть змінюватися залежно від сценарію та його характеристик. Тому на цьому етапі доцільно залучати для формування матриці $A^F = (a_{ij}^F)$ кваліфікованих експертів чи інженера зі знань з відповідною кваліфікаційною направленістю.

Таким чином, після реалізації третього рівня моделі отримуємо вектор комплексних показників $W = W(\Omega, \omega)$, який включає в себе оцінки факторів на основі визначення їхніх ваг $\{\Omega^1, \dots, \Omega^m\}$ та оцінки індикаторів, які їх формують $\omega_1^i, \dots, \omega_k^i$:

$$[\Omega^1(\omega_1^1, \dots, \omega_l^1), \Omega^2(\omega_1^2, \dots, \omega_l^2), \dots, \Omega^m(\omega_1^m, \dots, \omega_z^m)], \quad (2)$$

де k, l, z — кількість індикаторів, які формують відповідний фактор, причому можливий варіант коли $k \neq l \neq \dots \neq z$.

На останньому етапі проводиться визначення глобальних показників ваг (цінностей) сценаріїв $W = \Omega, \omega$ з урахуванням ваг факторів Ω та внутрішньої структури на основі визначення ваг відповідних індикаторів ω . У роботі [27] визначення глобальних критеріїв на основі уточнення ваг їхньої внутрішньої структури проводиться за допомогою адитивної згортки виду

$$W_{(X_j)} = \sum_{i=1}^m \Omega^i \omega_{i(X_j)}^j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3)$$

де $X_j \in X$ — масив альтернатив вибору, $\omega_{i(X_j)}^j$ — ваги критеріїв, які формують альтернативи, Ω^i — ваги альтернатив, оцінені за методикою Сааті.

Методика оцінювання глобального критерію у згаданих роботах, як правило, проводиться в завданнях багатокритеріальної оптимізації, за умови, коли об'єкти дослідження описуються стандартизованими та однойменними критеріями.

Підвищення рівня узгодженості попарних порівнянь у моделі визначення глобальних цінностей сценаріїв

Характерною особливістю оцінки сценаріїв є саме їхня різнокритеріальність — оцінка ваг факторів, які описують сценарій, проводиться власними наборами індикаторів, які формуються в межах кожного фактора окремо — $f^i : I^j = i_1^j, \dots, i_k^j$. Тому для визначення глобального критерію використання МАІ потребує коректного попарного порівняння альтернатив на різних рівнях оцінювання — на рівні індикаторів та на рівні факторів.

Використання попарних порівнянь у МАІ дає змогу проводити коректне визначення ваг показників та проводити їхнє ранжування тільки за умови, коли індекс узгодженості (consistency index, CI) не перевищує 10 % [27]. У випадку аналізу індикаторів та факторів, які мають чисельні характеристики (технічні параметри, експериментальні дані, грошові оцінки тощо), проблема узгодженості попарних порівнянь дещо знижується. Коли проводиться оцінка та попарне порівняння непараметричних, якісних показників та комбінацій параметричних і непараметричних факторів чи індикаторів, то проблема узгодженості значною мірою залежить від експертних оцінок. У таких випадках може статись, що отримані вектори відносних цінностей альтернатив чи вектори ваг (як індикаторів у факторах, так і самих факторів) можуть мати значну міру неузгодженості в порівнянні з ідеальним випадком.

У роботі [28] міру неузгодженості/узгодженості попарних порівнянь пропонується оцінювати за допомогою співставлення ідеального випадку — абсолютно узгодженої матриці, для якої виконується умова $\frac{a_{ij}}{a_{kj}} = \text{const}$ для всіх j , та реального випадку — матриці, отриманої на основі експертного оцінювання, для якої $\frac{a_{ij}}{a_{kj}} \neq \text{const}$.

Рядки матриці попарних порівнянь $A^F = (a_{ij}^F)$ можна трактувати, як вектори $a_i = (a_{i1}, \dots, a_{in})$. Тоді для абсолютно узгодженої матриці вони повинні бути колінеарними $a_i \parallel a_j$, і косинус кута між векторами $\cos \angle a_i a_j = 1$. Тоді поряд із традиційним індексом узгодженості CI матриці попарних порівнянь мож-

на ввести додаткову міру узгодженості, якою може виступати значення $\cos \angle a_i a_j$. У такому випадку його величина буде вказувати на те, якою є залежність між елементами матриці. Чим неузгодженішими є попарні порівняння, тим більшим буде величина кута між векторами рядків матриці. Міра неузгодженості — косинус кута між векторами — визначається як

$$\cos \alpha = \frac{\overline{a_i} \cdot \overline{a_j}}{|\overline{a_i}| \times |\overline{a_j}|} \quad \text{або} \quad \cos = \frac{\overline{a_i} \cdot \overline{a_j}}{\sqrt{a_i \cdot a_j \cdot a_j \cdot a_i}}, \quad (4)$$

де $\langle \overline{a_i} \overline{a_j} \rangle$ — скалярний добуток векторів.

Для матриці попарних порівнянь $A^F = (a_{ij}^F)$ рівень узгодженості CI на основі залежності між елементами матриці — косинус кута між векторами — можна представити як [12]

$$CI_i^F \equiv \cos \pm = \frac{\sum_{k=1}^n a_{ik} a_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n a_{ik}^2 \sum_{k=1}^n a_{jk}^2}}. \quad (5)$$

Тоді при побудові матриць попарних порівнянь альтернатив для масиву сценаріїв для кожної пари векторів можна отримати матриці мір узгодженості попарних порівнянь:

$$CI^F = \begin{pmatrix} 1 & \dots & ci_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ci_{n1} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Чисельні значення параметрів матриці (6) $0 \leq CI_{ij} \equiv |\cos \pm| \leq 1$ дають змогу оцінити рівні узгодженості парних порівнянь конкретних елементів і є індикатором для необхідності їх корегування задля досягнення коректного припустимого рівня ($CI \leq 10\%$). Це дає змогу підвищити рівень експертного оцінювання і, таким чином, зменшити рівень невизначеності під час порівняння сценаріїв на основі факторально-індикаторного підходу.

Реалізація пропонованої методики корегування попарних порівнянь доцільна також і на другому та третьому рівнях моделі — на факторальних наборах $\{\Omega^1, \dots, \Omega^m\}$ та на рівні формування глобальних критеріїв — узагальнений вектор ваг $W = \Omega, \omega$ виду (2).

Ієрархічність виразу (2) полягає в тому, що оцінювання відносних цінностей факторів $\{\Omega^1, \dots, \Omega^m\}$ проводиться на основі векторів відносних цінностей індикаторів $\{\omega_1^i, \dots, \omega_k^i\}$. Тобто формування глобального критерію оцінки сценарію буде проводитись на основі факторального набору, а його ранжування повинно проводитись з урахуванням векторів ваг

індикаторів. Для формування глобального критерію цінностей окремого сценарію з урахуванням його структури пропонується ввести коригуючий коефіцієнт виду

$$\Phi(\cos a) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j=1}^n a_{ij}. \quad (7)$$

Його суть полягає в можливості проводити чисельну оцінку міри подібності відносних цінностей факторів та індикаторів. Тоді глобальний скорегований критерій відносних цінностей сценаріїв на основі та визначення ваг факторів та ваг індикаторів, що їх формують, буде мати вигляд

$$W_{(F/I)} = \sum_{i=1}^n \Omega^i \omega_{i(F/I)}^j \Phi(\cos a)_{(F/I)}. \quad (8)$$

Пропонована методика оцінки скорегованого глобального критерію цінностей сценаріїв на основі структурного підходу дасть змогу зменшити рівень невизначеності експертного оцінювання різноимених факторів, алгоритмізувати процес комплексного оцінювання сценаріїв та підвищити якість формування процесу прийняття рішень.

Висновки

Вибір напрямів переведення ОУ в екологічно безпечний стан визначається проектом зняття об'єкта з експлуатації відповідно до наявних технічних та фінансових ресурсів. Кінцевим станом ОУ в технічному вимірі буде переведення залишених у ньому радіоактивних матеріалів до умов, що відповідають нормам, правилам і стандартам з безпеки під час поводження з РАВ (у тому числі радіаційний моніторинг, регламентне обслуговування законсервованого об'єкта тощо) або їхнє передання на зберігання до спеціалізованих підприємств. В екологічному вимірі головна відмінність сучасного стану ОУ як екологічної підсистеми від екологічно безпечного стану як кінцевого полягає в гарантуванні безпеки, тобто у виключенні загрози. Гарантування безпеки є можливим тільки після переведення ПВМ, які залишаються в ОУ, у контрольований стан. Досягнення такого стану можливе різними шляхами. Для вирішення питання вибору найкращого варіанта й була виконана ця робота.

У результаті проведеного дослідження розроблено алгоритм та запропоновано модель оцінки сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему на основі глобального факторально-індикаторного

критерію з урахуванням особливостей формування факторів їхніми індикаторами.

Розроблена модель оцінки сценаріїв представляє собою декомпозицію завдання визначення ваги факторів з урахуванням їхньої внутрішньої структури — наборів індикаторів. Виконано завдання дослідження, що дає змогу стверджувати:

- 1) створена трирівнева модель оцінки сценаріїв дозволяє проводити процес прийняття рішень на кожному етапі залежно від вимог ОПР до рівня якості;
- 2) запропонована корекція методу аналізу ієрархій має на меті формування узгоджених матриць попарних порівнянь індикаторів у окремих факторах $A^F = (a_{ij}^F)$ та загальної узгодженої матриці порівнянь факторів;
- 3) розроблена модель дає змогу визначати глобальні цінності сценаріїв на основі факторально-індикаторних оцінок.

Використання пропонованої методики дозволяє впорядкувати, алгоритмізувати і коригувати процедуру експертного оцінювання різноимених факторів та підвищити якість отримуваних результатів на формування процесу прийняття рішень під час оцінки сценаріїв перетворення ОУ на екологічно безпечну систему.

Список використаної літератури

1. Закон України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» // Відомості Верховної Ради України. — 1999. — № 4. — Ст. 33.
2. Про загальнодержавну програму зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему: Закон України № 886-VI від 15.01.2009 // Відомості Верховної Ради України. — 2009. — № 24. — Ст. 300. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/886-17#Text>.
3. Постанова Президії НАН України № 141 від 16.05.2018 р.
4. Перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему: актуальність рекомендованого курсу дій / С. Ф. Сверчков, Д. А. Стельмах, Л. Є. Шумилова // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2017. — Вип. 29. — С. 62–68.
5. Новый безопасный конфайнмент Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации) : монография / П. Г. Круковский, М. А. Метель, Д. И. Скляренко и др.; под ред. П. Г. Круковского, В. А. Краснова, В. П. Су-

- лимова. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2019. — 300 с.
6. Высотский Е. Д. Экспертная оценка текущего уровня подкритичности скоплений топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» после установки нового безопасного конфайнмента / Е. Д. Высотский, К. А. Сущенко, Р. Л. Годун // Ядерная энергетика та довкілля. — 2020. — Вип. 1 (16). — С. 49–56. — doi.org/10.31717/2311-8253.20.1.6.
7. Об'єкт «Укриття»: 30 років після аварії : монографія / В. О. Краснов, А. В. Носовський, В. М. Рудько, В. М. Щербін; НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС. — Чорнобиль : Ін-т проблем безпеки АЕС, 2016. — 512 с.
8. Батій В. Г. Критерії щодо перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему / В. Г. Батій, В. В. Єгоров, В. М. Рудько, В. М. Щербін // Проблеми безпеки атомних станцій і Чорнобиля. — 2015. — Вип. 24. — С. 85–91.
9. Балан О. В. Принципові технологічні рішення з вилучення паливовмісних матеріалів із верхніх відміток об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, В. Г. Батій, С. І. Глебкін та ін. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2015. — Вип. 25. — С. 83–93.
10. Балан О. В. Особливості вилучення паливовмісних матеріалів із нижніх позначок об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, В. Г. Батій, С. С. Підберезний, В. М. Рудько // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2018. — Вип. 31. — С. 76–84.
11. Батій В. Г. Майбутнє об'єкта «Укриття» після створення Арки / В. Г. Батій, С. А. Паскевич, В. М. Рудько та ін. // Проблеми Чорнобильської зони відчуження. — 2016. — Вип. 15–16. — С. 4–13.
12. Батій В. Г. Комп'ютерне моделювання при експлуатації та перетворенні об'єкта «Укриття» / В. Г. Батій, С. С. Підберезний, В. М. Рудько, В. М. Щербін // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2016. — Вип. 27. — С. 67–79.
13. Деренговський В. В. Результати порівняльного аналізу «доз — витрат — вигоди» для двох варіантів «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта Укриття» / В. В. Деренговський, В. М. Рудько, В. О. Говоров // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2015. — Вип. 25. — С. 94–101.
14. Балан О. В. Концептуальні рішення щодо демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» / О. В. Балан, С. А. Паскевич, М. В. Пашинов // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2019. — Вип. 32. — С. 15–21.
15. Рудько В. М. Концептуальні рішення щодо «раннього» демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» / В. М. Рудько, А. М. Бамбура, П. О. Корчагін, В. О. Говоров // Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECО 18) : збірник матеріалів III Міжнародної конференції (25–27 квітня 2018 року, м. Славутич). — Чернігів : ЧНТУ, 2018. — С. 301–309.
16. Згуровський М. З. Принятие решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами : монография / М. З. Згуровський, А. А. Павлов. — Киев : Наук. думка. — 2014. — 573 с.
17. Штанькевич О. С. Багатокритеріальний вибір в умовах неповноти та поганої узгодженості експертних оцінок. // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2012». — Вип. 2. Том 1. — Одесса, 2012. — С. 50–59.
18. Павлов А. А. Использование модифицированного метода анализа иерархий при принятии решений в иерархическом планировании / А. А. Павлов, Т. Н. Лисецкий // Інформаційні управляючі системи та технології (ІУСТ-ОДЕСА 2012) : тези доповідей. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (17–18 жовтня 2012 р.). — Одеса-Суми : Друкарський дім «Папірус», 2012. — С. 130.
19. Машков О. А. Прийняття управлінських рішень у складних організаційних системах з погляду системного підходу (частина 1) (вступ) / О. А. Машков, В. Р. Косенко // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. — Київ : ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2010. — Вип. 55. — С. 131–148.
20. Деренговський В. В. Удосконалений метод багатокритеріального аналізу екологічної безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01 / Валерій Володимирович Деренговський; Ін-т проблем безпеки АЕС НАН України. — Чорнобиль, 2019. — 168 с.
21. In Choi. A multilevel factor model: Identification, asymptotic theory and applications / In Choi, Dukpa Kim, Yun Jung Kim, Noh-Sun Kwark // Journal of Applied Econometrics. — 2018. — Vol. 33, No. 3. — P. 1–19. — doi.org/10.1002/jae.2611.
22. Daniel J. A fuzzy multi-layer assessment method for EFQM / Jay Daniel, Mohsen Naderpour, Chinteng Lin // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. — 2018. — Vol. 27, No. 6. — P. 1252–1262. — doi.org/10.1109/TFUZZ.2018.2874019.
23. Tzeng G.-H. New concepts and trends of hybrid multiple

- criteria decision making / G.-H. Tzeng, K.-Y. Shen. — Boca Raton : CRC Press, 2017. — 362 p.
24. Скітер І. С. Розробка моделі та модифікація методу аналізу ієрархій для оцінки рівня енергоефективності / І. С. Скітер, Д. В. Маргасов, Е. Ю. Сахно // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. — № 5 (2). — С. 26–32.
 25. Skiter I. Development of the matrix material selection algorithm for immobilization of transurane elements using the modified method of analysis of hierarchies / I. Skiter, E. Vtornikova // Nuclear and Radiation Safety. — 2018. — No. 2. — P. 36–42.
 26. Саати Т. Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. Пер. с англ. / Т. Л. Саати; науч. ред. А. В. Андрейченков. — Москва : Издательство ЛКИ, 2008. — 360 с.
 27. Saaty T. Mathematics of the brain: generalization from eigen vectors to eigen functions / T. Saaty // J Psychol Cognition. — 2017. — Vol. 2. — P. 113–122.
 28. Куренных А. Е. О повышении индекса согласованности матрицы парных сравнений в системах поддержки принятия решений / А. Е. Куренных, В. П. Осипов, А. И. Посадский, В. А. Судаков // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. — 2018. — № 196. — 16 с.

V. V. Derenhovskiy, I. S. Skiter

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

Three-Level Model Assessment of Potential Scenarios of the Shelter Object Transformation into an Ecologically Safe System Based on Global Factor

The paper presents research related to the analysis of scenarios for the transformation of the Shelter object into an ecologically safe system. Despite the long lifetime of the New Safe Confinement (NSC), which is 100 years, the presence of transuranic elements in fuel-containing materials (FCM) will pose a threat to the environment for many thousands of years. This indicates that the problem of choosing scenarios for further transformation of the Shelter object into an ecologically safe system remains relevant even after the commissioning of the NSC and requires special research. Among the tasks of analysis of potential scenarios for the transformation of the SO into an ecologically safe system after the commissioning of the NSC are:

identification and analysis of factors influencing the choice of scenarios for the transformation of the SO;

development of a methodology for comparative analysis of scenarios for the transformation of the SO into an ecologically safe system;

comparative analysis of scenarios for the transformation of the SO into an ecologically safe system and the choice of the best one for implementation.

The parameters of scenario evaluation and requirements for their submission are defined. An algorithm for building a model for estimating scenarios based on factorial-indicator sets has been developed. A model for increasing the level of consistency of pairwise comparisons of alternatives in determining the global criterion of the value of scenarios is proposed. A three-level scenario assessment model has been created. The correction of the method of analysis of hierarchies for the purpose of formation of the coordinated matrices of pairwise comparisons of indicators in separate factors and the general coordinated matrix of factors comparisons is proposed. The developed model makes it possible to determine the global values of scenarios on the basis of factor-indicator estimates. The use of the proposed methodology allows us to streamline, algorithmize and adjust the procedure of expert evaluation of qualitatively and quantitatively heterogeneous factors and improve the quality of the results to form a decision-making process to transform the SO into an ecologically safe system.

Keywords: scenario analysis, Shelter object, complex structural type system, factor-indicator model, level of consistency adjustment, global value criterion.

References

1. Law of Ukraine “On General Principles of Further Operation and Decommissioning of the Chornobyl NPP and Transformation of the Destroyed Fourth Power Unit of this NPP into an Environmentally Safe System”. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], 1999, no. 4, art. 33. (in Ukr.)
2. Law of Ukraine “On the national program of decommissioning of the Chornobyl NPP and transformation of the Shelter object into an ecologically safe system”, no. 886-VI dated 15.01.2009. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], 2009, no. 24, art. 300. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/886-17#Text>. (in Ukr.)
3. Resolution of the Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine no. 141 dated 16.05.2018.

4. Svierchov S. F., Stelmakh D. A., Shumilova L. Ye. (2017). [Transformation of the Shelter object into an ecologically safe system: relevance of the recommended course of action]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 29, pp. 62–68. (in Ukr.)
5. Krukovsky P. G., Metel M. A., Sklyarenko D. I. (2019). *Novyi bezopasnyi konfaynment Chernobyl'skoy AES (raschetno-eksperimental'nyi analiz pri proyektirovanii i ekspluatatsii)* [New Safe Confinement of the Chernobyl NPP (calculation and experimental analysis in design and operation)]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 300 p. (in Rus.)
6. Vysotskyi Ye. D., Sushchenko K. O., Godun R. L. (2020). Expert assessment of the current criticality level of clusters of fuel-containing materials after the New Safe Confinement installing. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 16, no. 1, pp. 49–56. doi.org/10.31717/2311-8253.20.1.6. (in Rus.)
7. Krasnov V. O., Nosovskyi A. V., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2016). *Obiekt "Ukryttya": 30 rokiv pislia avariyi* [Shelter object: 30 years after the accident]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 512 p. (in Ukr.)
8. Batiy V. G., Yehorov V. V., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2015). [Criteria for the Shelter object transformation into an ecologically safe system]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 24, pp. 85–91. (in Ukr.)
9. Balan O. V., Batiy V. G., Glebkin S. I., Lagunencko O. S., Pidberezny S. S., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2015). [Fundamental technological solutions for the removal of fuel-containing materials from the upper marks of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 25, pp. 83–93. (in Ukr.)
10. Balan O. V., Batiy V. G., Pidbereznyi S. S., Rudko V. M. (2018). [Features of removal of fuel-containing materials from the lower marks of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 31, pp. 76–84. (in Ukr.)
11. Batiy V. G., Paskevych S. A., Rudko V. M., et al. (2016). [The future of Shelter object after the Arch is installed]. *Problems of the Chornobyl Exclusion Zone*, no. 15–16, pp. 4–13. (in Ukr.)
12. Batiy V. G., Pidbereznyi S. S., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2016). [Computer simulation during operation and transformation of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 27, pp. 67–79. (in Ukr.)
13. Derengovskyi V. V., Rudko V. M., Govorov V. A. (2015). [Results of the comparative analysis of “doses — costs — benefits” for two options for “early” dismantling of unstable structures of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 25, pp. 94–101. (in Ukr.)
14. Balan O. V., Paskevych S. A., Pashynov M. V., Pidbereznyi S. S., Rudko V. M. (2019). [Conceptual solutions for dismantling unstable structures of the Shelter object]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 32, pp. 15–21. (in Ukr.)
15. Rudko V. M., Bambura A. M., Korchagin P. A., Govorov V. O. (2018). [Conceptual solutions for “early” dismantling of unstable structures of the Shelter object]. *Proceedings of the III International Conference “Problems of decommissioning of nuclear power facilities and environmental restoration” (INUDEC 18) (April 25–27, 2018, Slavutych)*. Chornobyl: ChNTU, 2018, pp. 301–309. (in Ukr.)
16. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. (2014). *Prinyatiye resheniy v setevykh sistemakh s ogranichennymi resursami* [Decision making in network systems with limited resources]. Kyiv: Naukova Dumka, 573 p. (in Rus.)
17. Shtankevych O. S. (2012). [Multi-criteria choice in conditions of incompleteness and poor consistency of expert assessments]. *Collection of scientific works SWorld. Proceedings of the International Scientific-Practical Conference “Prospective innovations in science, education, production and transport 2012” (Odesa, 2012)*, vol. 2, no. 1, pp. 50–59. (in Ukr.)
18. Pavlov A. A., Lisetsky T. N. (2012). [The use of a modified method of analysis of hierarchies in decision-making in hierarchical planning]. *Proceedings of the All-Ukrainian scientific-practical conference Information control systems and technologies (IUST-Odesa 2012) (October 17–18, 2012)*. Odesa-Sumy: Papyrus Printing House LLC, p. 130. (in Rus.)
19. Mashkov O. A., Kosenko V. R. (2010). [Adoption of management decisions in complex organizational systems in terms of system approach (part 1) (introduction)]. *Collection of scientific works of the Institute of Modeling Problems in Energy named after G. Ye. Pukhov of the NAS of Ukraine*, vol. 55, pp. 131–148. (in Ukr.)
20. Derengovskyi V. V. (2019). *Udoskonalenyi metod bagatokriterialnogo analizu ekologichnoi bezpeky ob'ektiv iz radiatsiino-yadernykh tekhnologiy* [The improved method of multicriteria analysis of environmental safety of objects with radiation and nuclear technologies] (PhD Dissertation). Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 24 p. (in Ukr.)
21. In Choi, Dukpa Kim, Yun Jung Kim, Noh-Sun Kwark (2018). A multilevel factor model: Identification, asymptotic theory and applications. *Journal of Applied Econometrics*, vol. 33, no. 3, pp. 1–19. doi.org/10.1002/jae.2611.
22. Daniel J., Naderpour M., Lin C.-T. (2018). A fuzzy multi-layer assessment method for EFQM. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 27, no. 6, pp. 1252–1262. doi.org/10.1109/TFUZZ.2018.2874019.

23. Tzeng G.-H., Shen K.-Y. (2017). *New concepts and trends of hybrid multiple criteria decision making*. Boca Raton: CRC Press, 362 p.
24. Skeeter I. S., Margasov D. V., Sakhno E. Yu. (2015). Development of a model and modification of the method of hierarchy analysis to assess the level of energy efficiency. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 26–32.
25. Skiter I., Vtornikova E. (2018). Development of the matrix material selection algorithm for immobilization of transurane elements using the modified method of analysis of hierarchies. *Nuclear and Radiation Safety*, no. 2, pp. 36–42.
26. Saaty T. L.; Andreichenkov A. V. (sc. ed.) (2008). *Prinyatiye resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: analiticheskiye seti* [Dependence and feedback decision making: analytical networks]. Moscow: LKI Publishing House, 360 p. (in Russ.)
27. Saaty T. (2017). Mathematics of the brain: generalization from Eigen vectors to eigen functions. *J Psychol Cognition*, vol. 2, pp. 113–122.
28. Kurennykh A. E., Osipov V. P., Posadskyi A. I., Sudakov V. A. (2018). On increasing the consistency index of the matrix of pairwise comparisons in decision support systems. *Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*, vol. 196, 16 p.

Надійшла 17.03.2022

Received 17.03.2022

A. M. Novikov

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

Comparative Assessment of the Dynamics of the Average Annual Deposition Velocity of ^{90}Sr and ^{137}Cs for a Long Term Period after the Chornobyl Accident for the Cities of Ukraine, Kyiv and Chornobyl

Keywords:

ecological safety,
monitoring,
volume activity,
deposition flux,
deposition velocity,
Chornobyl accident,
 ^{90}Sr ,
 ^{137}Cs

A reliable assessment of the radioactive aerosol spread is an environmental safety task of current interest and high priority. An important parameter, used to calculate the transport of radioactive fallout, is the deposition velocity of radioactive aerosol. Fluctuations in the deposition velocity, which according to experimental data are within several orders of magnitude, depend on a number of factors (including time), which requires a detailed analysis of the patterns of radioactive pollution fields formation of air and the underlying surface. In this radio-ecological study, the dynamics of the average annual values of the deposition velocity of ^{90}Sr and ^{137}Cs were evaluated and analyzed, based on the experimental data of the measurements of the volume activity and the depositional fluxes obtained in Ukraine for the cities of Kyiv and Chornobyl after the Chornobyl nuclear power plant accident, during 1987–2019. The deposition rates for ^{90}Sr and ^{137}Cs estimated over a long period of time (33 years) show different trends. The total deposition velocity of ^{90}Sr tends to increase, while for ^{137}Cs the deposition velocity decreases over time. This pattern is characteristic of the two studied sites (Kyiv and Chornobyl). Relevant trends in the dynamics of deposition velocity may indicate the transformation of aerosol carriers of these radionuclides, their aerodynamic and migratory capabilities. This study could be of use for an empirical parameterization of deposition velocities in air quality models.

Introduction

As a result of the Chornobyl accident, about 1.85×10^{18} Bq of radioactive fission products in the form of an aerosol were released into the environment. During the spread, radioactive aerosols settled in large areas, forming radioactive traces and local spots. Later migrating due to natural and man-made processes [1–4], including the radionuclide cycle (soil, air, water, plants and living organisms), radioactive contamination can pose a significant danger due to the destructive effects of ionizing radiation [5–8].

The calculation of the effective dose obtained by inhalation is relatively simple, if the integral (total) over time or the average concentration of radionuclides in the air over a period of time is known. However, it is sometimes difficult or even impossible to measure the integral activity in the air, especially after accidental emissions, in particular over a short period of time. In this case, the integral concentration in the air is usually estimated based on the depositional flux and the deposition velocity of a particular radionuclide. The depositional flux, divided by the deposition velocity, gives an integral concentration in the air. If the relative amounts of radionuclides at the time

© A. M. Novikov, 2022

of release (or propagation) are known, as well as the ratio of their deposition velocities, then the measurement of the deposition density of one radionuclide in the mixture can be considered sufficient to determine all radionuclides during deposition [9]. This provides additional opportunities in the case of radionuclide composition, when the determination of one is significantly more difficult (or even impossible) than the determination of the other.

Radio-ecological monitoring and methods of mathematical modeling of the spread of radioactive emissions and their deposition on the underlying surface have become especially relevant and important in solving scientific and applied problems [15–19]. The accumulation of data during monitoring and their subsequent analysis make it possible to assess (assess the existence) of the relationship between the deposition flux F ($\text{Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) and the volume activity C (Bq/m^3), which can then be used to calculate (parameterize) the deposition velocity V (m/s).

In the previous work [20], the analysis of experimental data of measurements, received after the Chernobyl accident concerning one of the main dose-forming technogenic radionuclides ^{137}Cs ($T_{0.5} = 30.2$), was carried out. It has been found that there is a strong positive correlation between the depositional flux and the volume activity in general. The estimated average annual deposition velocities of ^{137}Cs for a long period of 32 years after the Chernobyl accident from 1987 to 2018 tend to decrease and are in the range from 30 to 1 cm/s . In particular, for Kyiv, the dependence of the total deposition velocity of ^{137}Cs on time can be approximated by the function $V_{\text{total}}(t) = 36.11e^{-\frac{t}{8.66}\ln(2)}$, where t is the time after deposition in years, V_{total} is in cm/sec .

In this work, the dose-forming technogenic radionuclide ^{90}Sr , which is a chemical analogue of calcium and mainly accumulates in the bones, whereby increasing the risk of bone cancer, leukemia and other diseases [5–7], is analyzed. Radiation safety standards [13] set the following permissible levels of radionuclides: through the respiratory organs $\text{DN}_B^{\text{inhal}} 400 \text{ Bq year}^{-1}$, through digestive organs $\text{DN}_B^{\text{ingest}} 4,000 \text{ Bq year}^{-1}$, permissible concentrations in the air $\text{DK}_B^{\text{inhal}} 0.2 \text{ Bq m}^{-3}$ and in the drinking water $\text{DK}_B^{\text{ingest}} 10,000 \text{ Bq m}^{-3}$ for category B. Sufficiently large emissions caused by the Chernobyl accident (10 PBq), long half-life ($T_{0.5} = 28.5 \text{ g}$) and high mobility of ^{90}Sr stimulate research [21] related to this radionuclide [22–24].

Since the calculation of the sample correlation does not require any assumptions about the population (see Nefzger and Drasgow, 1957) [25], an in-depth consideration of the interpretation of correlation coefficients

(Rodgersn and Nicewander, 1988) [26] with the study of distributions is not given.

The aim of this work is to evaluate the dynamics of the average annual values of the deposition velocity of ^{90}Sr and compare with the corresponding values obtained for ^{137}Cs .

Input data for analysis and research methods

Within the framework of this work, search, analysis, digitization and processing (comparison, coordination) of experimental data of time series for the period from 1987 to 2019 of volume activity and flux density of ^{90}Sr and ^{137}Cs were carried out. This experimental data were given in the reviews of the environmental pollution state on the territory of Ukraine according to the observations of the hydro-meteorological network (Central Geophysical Observatory named after Borys Sreznevsky (CSO), as well as in technical

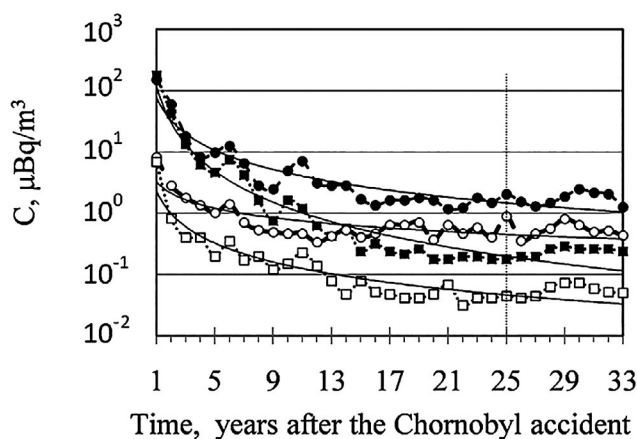


Fig. 1. Dynamics of average annual values of volume activity after the Chernobyl accident from 1987 to 2019: ● – ^{137}Cs and ■ – ^{90}Sr in Chornobyl (Ch), ○ – ^{137}Cs and □ – ^{90}Sr in Kyiv (K)

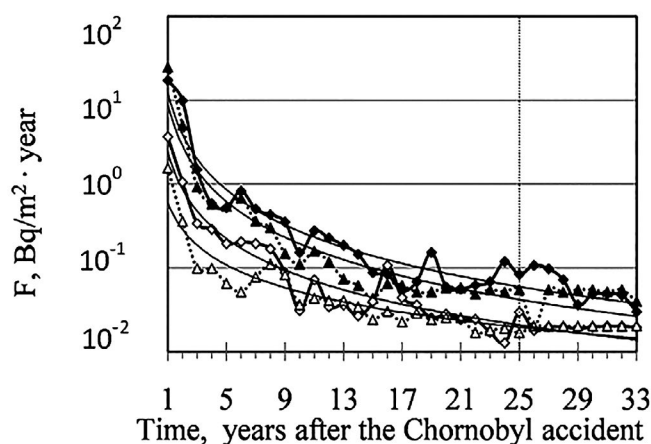


Fig. 2. Dynamics of average annual values of deposition flux after the Chernobyl accident from 1987 to 2019: ◆ – ^{137}Cs and ▲ – ^{90}Sr in Chornobyl (Ch), ◇ – ^{137}Cs and △ – ^{90}Sr in Kyiv (K)

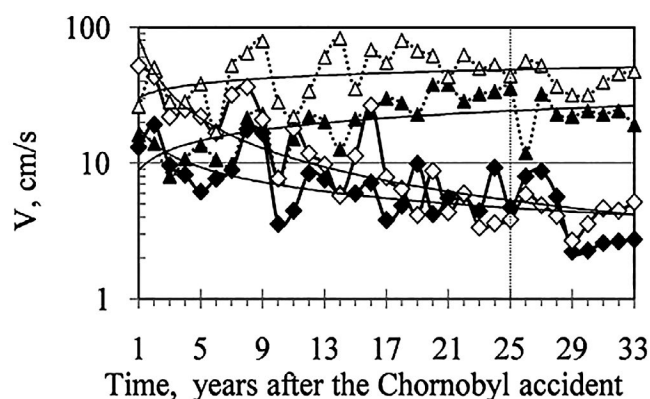


Fig. 3. Dynamics of average annual values of deposition velocity $V(t) = F(t) / C(t)$: $\blacktriangle$ – ^{90}Sr and $\blacklozenge$ – ^{137}Cs in Chornobyl, $\triangle$ – ^{90}Sr and $\lozenge$ – ^{137}Cs in Kyiv

reports according to the monitoring of radioactive aerosol in the surface layer of atmospheric air (Kyiv Radiological Department of NGO “Typhoon”) and radioactive contamination on the territory of Ukraine (State Committee of the Ukrainian SSR of Hydrometeorology, Ukrainian Republican Department of Hydrometeorology).

Also, meteo-data from meteorological stations of Kyiv Zhuliany International Airport were involved in the analysis (ICAO airport code: UKKK; coordinates: 502407N0302707E; 2005–2019) [27].

Results and discussion

The obtained time series of average annual data of volume activity and the depositional flux of ^{90}Sr and ^{137}Cs for the cities of Kyiv and Chornobyl are presented in Figs. 1 and 2. Also, the trend lines are approximated by the power function, for which the values $f(t) = a \cdot t^{-b}$ of the reliability of the approximation in this case are higher than for the exponential function $f(t) = a \cdot e^{-\frac{t}{T_{0.5} \ln(2)}}$, where t is the time in years after the Chornobyl accident, $T_{0.5}$ is the half-life of the corresponding value (Table — where also basic statistics).

Over a corresponding period of time (33 years), the decrease in volume activity for ^{90}Sr occurred much faster (about three orders of magnitude) than ^{137}Cs (approximately two orders of magnitude). The decrease in the depositional flux for both radionuclides is about three orders of magnitude, the half-life $T_{0.5} \approx 6$ years.

From the analysis of correlations, including sequential depending on the sample size N , between the volume activity C and the deposition flux F , both within one site and between the sites of Kyiv and Chornobyl, there are strong, stable positive correlations depend-

cies. The obtained values of Pearson's correlation coefficients, significant at the level of $p < 0.05$, are in the range of $0.99 < r < 1.00$. The total sample is $N = 33$ pairs of observations, which generally satisfies the existing idea of a sufficient number of cases for correlation analysis [28, 29] and to some extent corresponds to the idea of the possibility of estimating the deposition velocity V using the ratio $V = F/C$ [8, 20].

The calculated time series of the deposition velocity, as well as the trend lines approximated by the power function are presented in Fig. 3, the coefficients of which are given in the Table. Differences in trends in deposition velocities may to some extent reflect how the dispersion of radionuclide carriers changes over time. It is most probable that particles of smaller aerodynamic diameters and ^{90}Sr of larger aerodynamics become the predominant carriers of ^{137}Cs . It is obvious that the migration capabilities of ^{137}Cs in the air increase over time, in contrast to ^{90}Sr . In addition, the obtained values of deposition velocities for Chornobyl are approximately twice lower than the values for Kyiv (Table and Figs. 8–9), which may also indicate different migration opportunities of aerosols of these sites.

Fig. 4 presents significant at the level of $p < 0.05$ Pearson's correlation coefficients between the volume activity C (deposition flux F) and the probability of wind direction (by rhumb lines) of the meteorological data from the meteorological station of the Kyiv Zhuliany International Airport (UKKK) for 2005–2019. For ^{137}Cs , there is a negative correlation between the volume activity (as well as

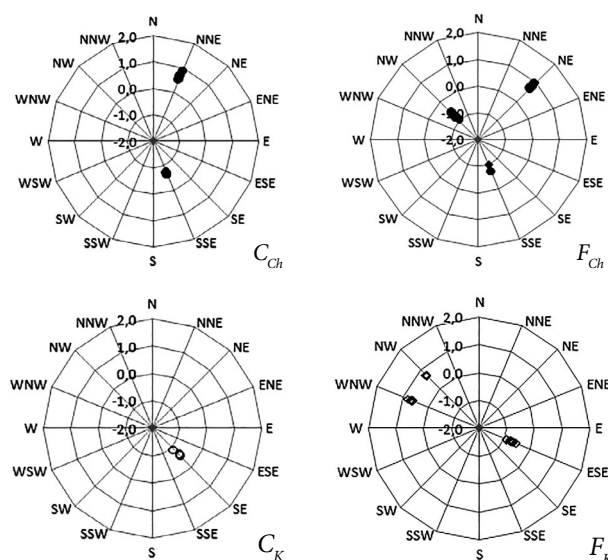


Fig. 4. Pearson's correlation coefficients (significant at the level of $p < 0.05$) depending on the wind direction (by rhumb lines), for ^{137}Cs : C_{Ch} — volume activity and F_{Ch} — deposition flux in Chornobyl, C_K — volume activity and F_K — deposition flux in Kyiv

Coefficients of trend line functions for volume activity $C(t)$ 10^{-5} Bq / m³, total depositional flux $F(t)$ Bq/m² per day and total deposition velocity $V(t)$ cm/s ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in Chernobyl and Kyiv, 1987–2019, as well as the ratio ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr, Chernobyl/Kyiv (R^2 — approximation coefficient)

Chornobyl												
Parameter	Isotope	Basic statistics					$f(t) = a \cdot e^{-\frac{t}{T_{0.5}} \ln(2)}$			$f(t) = a \cdot x^{-b}$		
		Mean	Median	min	max	St. dev.	a	T _{0.5} , year	R ²	a	b	R ²
$C_{Ch}(t)$	¹³⁷ Cs	9.84	2.05	1.18	151.67	27.55	14.63	8.66	0.569	77.0	1.22	0.861
	⁹⁰ Sr	8.09	0.26	0.18	177.83	31.41	9.155	4.62	0.670	120	1.98	0.927
$F_{Ch}(t)$	¹³⁷ Cs	1.04	0.11	0.03	17.16	3.36	1.538	5.78	0.705	12.31	1.65	0.920
	⁹⁰ Sr	1.06	0.06	0.02	24.78	4.35	0.980	5.78	0.617	9.16	1.67	0.910
$V_{Ch}(t)$	¹³⁷ Cs	7.20	5.98	2.23	19.12	4.27	12.16	17.33	0.462	18.5	0.42	0.415
	⁹⁰ Sr	21.66	22.00	7.92	37.69	8.65	12.39	−25.67	0.360	8.834	−0.313	0.365
$C_{Ch_Cs/Sr}(t)$	¹³⁷ Cs/ ⁹⁰ Sr	5.53	6.29	0.85	11.52	2.87	1.598	11.36	0.687	0.641	−0.759	0.828
$F_{Ch_Cs/Sr}(t)$		1.58	1.37	0.66	5.34	0.89	—	—	—	1.344	−0.018	0.001
$V_{Ch_Cs/Sr}(t)$		0.42	0.30	0.09	1.38	0.33	0.981	11.55	0.673	2.094	0.740	0.635
Kyiv												
$C_K(t)$	¹³⁷ Cs	0.94	0.54	0.34	8.21	1.40	1.264	23.10	0.301	3.233	0.61	0.634
	⁹⁰ Sr	0.34	0.07	0.03	6.95	1.20	0.451	8.66	0.576	2.298	1.21	0.856
$F_K(t)$	¹³⁷ Cs	0.21	0.03	0.01	3.67	0.65	0.377	6.30	0.704	2.413	1.47	0.919
	⁹⁰ Sr	0.09	0.03	0.02	1.56	0.27	0.149	8.66	0.632	0.60	1.06	0.889
$V_K(t)$	¹³⁷ Cs	13.47	7.69	2.68	51.73	12.68	34.53	9.90	0.763	86.39	0.86	0.753
	⁹⁰ Sr	47.54	47.14	17.01	82.57	17.21	38.27	−86.64	0.046	30.22	−0.148	0.107
$V_{K/Ch}(t)=$ F_K/C_{Ch}	¹³⁷ Cs	2.30	1.79	0.73	9.20	1.74	2.982	34.66	0.195	3.627	0.24	0.139
	⁹⁰ Sr	8.38	8.91	0.79	16.54	4.68	1.889	−9.90	0.524	0.579	−0.922	0.711
$C_{K_Cs/Sr}(t)$	¹³⁷ Cs/ ⁹⁰ Sr	8.12	8.51	1.18	20.00	4.77	2.797	−13.59	0.521	1.406	−0.603	0.574
$F_{K_Cs/Sr}(t)$		1.60	1.07	0.67	3.98	0.94	2.523	23.11	0.430	4.02	0.41	0.469
$V_{K_Cs/Sr}(t)$		0.35	0.14	0.06	1.99	0.41	0.902	8.66	0.700	2.858	1.01	0.767
Chornobyl / Kyiv												
$C_{Ch/K_Sr}(t)$	⁹⁰ Sr	10.09	5.19	2.61	51.28	10.76	20.25	11.55	0.606	52.2	0.77	0.753
$F_{Ch/K_Sr}(t)$		4.09	2.72	1.00	15.88	3.76	6.557	17.33	0.403	15.25	0.60	0.648
$V_{Ch/K_Sr}(t)$		0.49	0.53	0.15	0.87	0.19	0.323	36.48	0.169	0.292	0.439	0.1
$C_{Ch/K_Cs}(t)$	¹³⁷ Cs	6.08	4.36	1.83	21.21	4.76	11.57	13.86	0.576	23.81	0.61	0.66
$F_{Ch/K_Cs}(t)$		3.73	2.84	0.78	9.38	2.09	4.078	69.31	0.057	5.101	0.17	0.075
$V_{Ch/K_Cs}(t)$		0.82	0.59	0.25	2.57	0.58	0.352	18.73	0.322	0.214	0.439	0.351

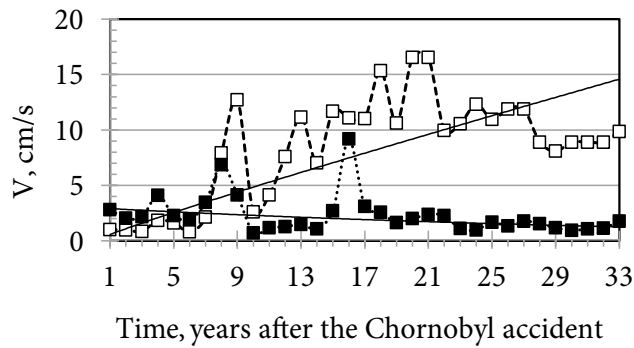


Fig. 5. Dynamics of average annual values of deposition velocity $V_{K/Ch}(t) = F_K(t)/C_{Ch}(t)$: $\square$ – ^{90}Sr and $\blacksquare$ – ^{137}Cs in Kyiv

the deposition flux) of ^{90}Sr and the probability of wind blowing from the southeast (less polluted areas).

No stable patterns for the existence of correlations, significant at the level of $p < 0.05$ between the average annual values of C (as well as F) and the minimum, average, maximum, total humidity or precipitation, were found at this stage of research (there are some cases that require additional research).

Taking into account the rather strong correlations between the data of Kyiv and Chernobyl, the assumption (hypothesis) about the possibility of migration and the impact of aerosols from the more contaminated areas of the Chernobyl direction was considered. Therefore, the deposition velocity of ^{90}Sr in Kyiv was estimated not only using the volume activity C_K , obtained during the monitoring in Kyiv $V_K = F_K/C_K$, but also additionally using the volume activity C_{Ch} , obtained in Chernobyl $V_{K/Ch}$ i.e. $V_{K/Ch} = F_K/C_{Ch}$. The calculated time series of the deposition velocity, as well as the trend lines approximated by the power function, are presented in Fig. 5, the coefficients of which are given in the Table.

The time series (dynamics) of the $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ ratio for the volume activity C , the deposition flux F and the precipitation velocity V are given in Fig. 6 for Chernobyl and Fig. 7 for Kyiv. In the initial years, the $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ ratios in the volume activity samples are close to the values in the samples for the deposition flux, which may indicate (to some extent) the relationship (identity) of the respective aerosols. Subsequently, over time, the $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ ratio in the bulk activity samples tends to increase in contrast to the deposition flux, which is kept at one. The difference in the values of the ratio of the volume activities of $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ and the ratio of the deposition flux $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ increases by an order of magnitude. For both sites (Chernobyl and Kyiv), there is an increase of an order of magnitude between the deposition velocities of ^{137}Cs and ^{90}Sr .

Figs. 8 and 9 show the time series of the relationship between the average annual values of the volume activity of C_{Ch} in Chernobyl and the volume activity of C_K in Kyiv ($C_{Ch/K} = C_{Ch}/C_K$), similarly to the deposition flux $F_{Ch/K}$ and deposition velocities $V_{Ch/K}$ ^{90}Sr and ^{137}Cs . In the initial years, the volume activity, as well as the deposition flux of ^{90}Sr (^{137}Cs) in Chernobyl, was an order of magnitude higher than in Kyiv. Over time, there has been a gradual decline in the difference between site activities, but there is still a difference, in Chernobyl several times higher than in Kyiv. At all times, for ^{90}Sr ,

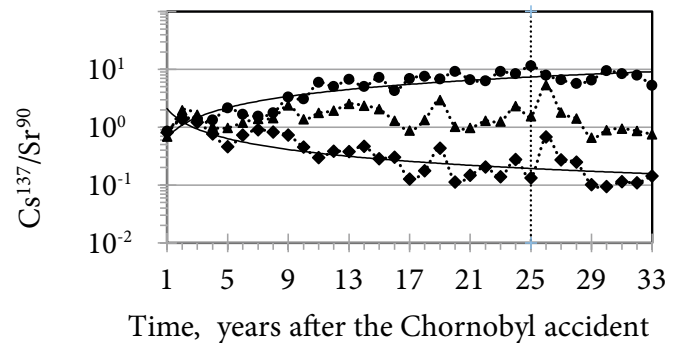


Fig. 6. Dynamics of $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ ratio of average annual values: $\bullet$ – C , $\blacktriangle$ – F , and $\blacklozenge$ – V in Chernobyl

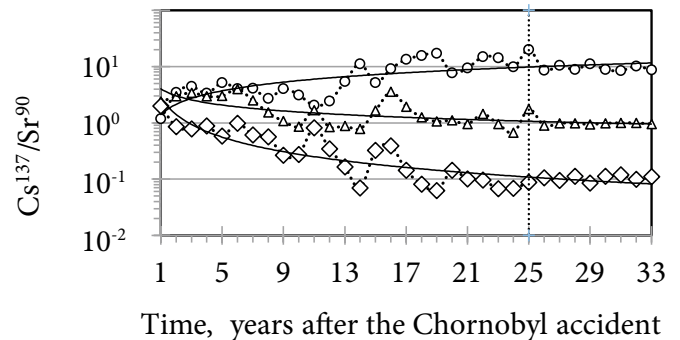


Fig. 7. Dynamics of $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ ratio of average annual values: $\circ$ – C , Δ – F and $\diamond$ – V in Kyiv

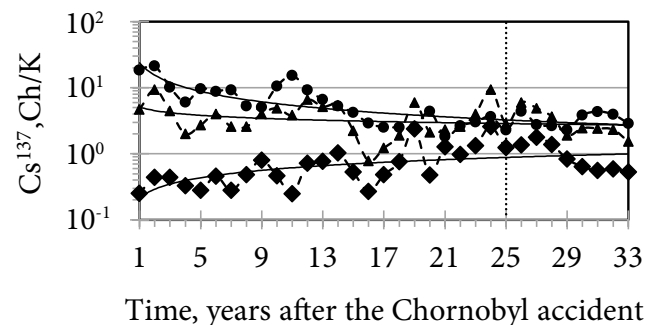


Fig. 8. Dynamics of the ratio of average annual values of ^{137}Cs between Chernobyl and Kyiv (Ch/K): $\bullet$ – C , $\blacktriangle$ – F and $\blacklozenge$ – V

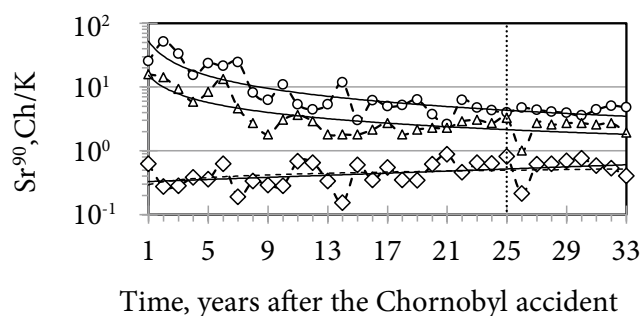


Fig. 9. Dynamics of the ratio of average annual values of ^{90}Sr between Chornobyl and Kyiv (Ch/K): ● – C, ▲ – F and ♦ – V

the values of $C_{\text{Ch/K}}$ are slightly higher than the values of $F_{\text{Ch/K}}$, and have similar monotonically declining trends. For ^{137}Cs , in addition to the monotonic decline, there is a convergence of trends.

The evaluated deposition velocity of ^{90}Sr in Chornobyl is generally lower than in Kyiv, which is most likely due to anthropogenic impacts. To some extent, a similar situation is observed for ^{137}Cs , but there are some cases in the period 2005–2014 (19–28 years after the accident, see Fig. 3), where the deposition velocity of ^{137}Cs in Chornobyl is higher than in Kyiv.

Conclusions

For ^{90}Sr (as well as for ^{137}Cs) there are strong positive correlations between the volume activity C and the deposition flux F , both within a single site and between sites (Kyiv and Chornobyl). The values of Pearson's correlation coefficients, significant at the level of $p < 0.05$, are in the range of $0.99 < r < 1.00$. The estimated deposition velocities for ^{90}Sr show different dynamics from the values obtained for ^{137}Cs . The increasing trend lines of the ^{90}Sr deposition velocity may indicate that over time, particles of larger aerodynamic diameters, in contrast to ^{137}Cs , begin to play a predominant role in ^{90}Sr migration. Therefore, the migration capacity of ^{137}Cs in the air increases in contrast to ^{90}Sr , for which there is a reverse trend.

References

1. Garger E. K. (2018). [The dry deposition rate of radioactive substances of Chernobyl origin according to observations]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 31, pp. 85–103. Available at: http://mntc.smn.com.ua/downloads/2018_31/c85.PDF. (in Rus.)
2. Talerko M. M., Lev T. D., Kovalets I. V., Yatsenko Yu. V. (2020). [Modeling study of the atmospheric transport of radioactivity released into the air as a result of forest fires

in the Exclusion Zone in April 2020]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 18, no. 3, pp. 86–104. Available at: <http://npe.org.ua/wp-content/uploads/2020/10/18-11.pdf>. (in Ukr.)

3. Tyshchenko O. G., Landin V. P. (2020). [Changes in the underlying surface and vegetation in the Chornobyl Exclusion Zone during 1986–2017]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 19, no. 4, pp. 75–84. Available at: <http://npe.org.ua/wp-content/uploads/2021/01/4-9.pdf>. (in Ukr.)
4. Garger E. K. (2008). *Vtorichniy pod'yem radioaktivnogo aerolya v prizemnom sloe atmosfery* [Secondary rise of radioactive aerosol in the surface layer of the atmosphere]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 192 p. Available at: <https://www.twirpx.com/file/1457758>. (in Rus.)
5. Shydlovska T. A. (2011). *Medyko-biologichni aspekty vplyvu ionizuyuchoyi radiatsiyi vnaslidok avariyi na ChAES*. [Bio-medical aspects of the influence of ionizing radiation as a result of the ChNPP accident]. Chornobyl, 215 p. (in Ukr.)
6. Akleev A. V. (ed.) (2006). *Chelyabinskaya oblast': likvidatsiya posledstviy radiatsionnykh avariy*. [Chelyabinsk region: elimination of the consequences of radiation accidents]. Available at: http://elib.biblioatom.ru/text/chelyabinskaya-oblast'-likvidatsiya-avariy_2006/go,6. (in Rus.)
7. *Toxicological profile for Strontium*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2004, 445 p. Available at: file:///C:/Users/Helga/Downloads/cdc_6550_DS1.pdf.
8. Anupama M., Ashok Kumar K., Naveena Lavanya Latha J. (2016). Role of Strontium in biological systems. *European Journal of Pharmaceutical and Medical Research*, vol. 12, no. 3, pp. 177–184. Available at: https://www.researchgate.net/publication/322713485_ROLE_OF_STRONTIUM_IN_BIOLOGICAL_SYSTEMS.
9. *Sources and Effects of Ionising Radiation*. UNSCEAR2000 Report to the General Assembly. United Nations, New York, 2000, 659 p. Available at: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf.
10. Nosovskyi A. V. (ed.) (2017). *Institut problem bezopasnosti atomnykh elektrostantsiy NAN Ukrainy: 25 let*. [Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine: 25 years.]. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 416 p. Available at: <http://www.ispnpp.kiev.ua/ru/ipb-aes-nanu-25-let>. (in Rus.)
11. Shynkarenko V. K., Talerko M. M., Kashpur V. O., Skorjak G. G., Svyryd O. A. (2020). [Radioactive aerosols in the near zone of the Chornobyl Nuclear Power Plant in 2018]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 16, no. 1, pp. 57–67. doi.org/10.31717/2311-8253.20.1.7. (in Ukr.)
12. Shynkarenko V. K., Kashpur V. A., Skorjak G. G. (2019). [New Safe Confinement and radioactive aerosols in the

- near zone of ChNPP]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 13, no. 1, pp. 76–82. (in Ukr.)
13. NRB-97, DGN6.6.1.-6.5.001-98. *Norms of radiation safety of Ukraine. State Hygiene Standards*. Approved by the decision of the Chief State Sanitary Doctor of Ukraine dated 01.12.1997, no. 62, 127 p. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>. (in Ukr.)
 14. Shynkarenko V. K., Kashpur V. A., Skorjak G. G., Kalinovskiy A. K. (2016). [Assessment of aerosol radiation situation on ChNPP industrial site during work on construction of a New Safe Confinement]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 27, pp. 58–66. Available at: http://www.ispnpp.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/2016_27/c58.pdf. (in Rus.)
 15. Talerko N. N. (2005). [The set of models for the assessment of consequences of atmospheric releases from nuclear power plants in inhomogeneous and time-dependent fields of nuclide volume activity]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 2, pp. 8–16. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/128026/01-Talerko.pdf?sequence=1>. (in Ukr.)
 16. Talerko N. N. (2009). [Physical features and limitations of atmospheric transport models of radionuclides for different spatio-temporal scales]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 11, pp. 57–62. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/7429/07-Talerko.pdf?sequence=1> (in Rus.)
 17. Talerko N. N. (2010). [Reconstruction of Chornobyl source parameters using gamma dose rate measurements in Prypiat town]. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 169–177. (in Rus.)
 18. Talerko N. N., Zhiginas D. V., Kuzmenko A. G. (2018). [Reconstruction of the parameters of the source of radioactive emissions from the data of radiation monitoring using the Kalman filter]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 30, pp. 40–50. (in Rus.)
 19. Hudkov I. M., Kashparov V. O., Parenjuk O. Yu. (2019). *Radioekologichnyy monitorynh* [Radioecological monitoring]. Kyiv, Kherson: National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, 187 p. Available at: <https://oldiplus.ua/downloads/monitoring.pdf> (in Ukr.)
 20. Novikov A. M. (2020). [Retrospective analysis of the annual deposition velocity of ^{137}Cs after the fallout of the Chornobyl accident]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 16, no. 1, pp. 68–78. doi.org/10.31717/2311-8253.20.2.8. (in Ukr.)
 21. Landin V. P., Chobotko H. M., Kuchma M. D., Raychuk L. A. (2017). [Overcoming the consequences of the Chornobyl disaster in the agrosphere of Ukraine]. *Agroecological Journal*, vol. 2, pp. 67–75. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/agrog_2017_2_11. (in Ukr.)
 22. Shynkarenko V. K. (2004). *Otsinka kontrzakhodiv, spryamovanykh na znyzhennya vmistu chornobylskoho ^{90}Sr u silskohospodarskiy produktsiyi, za nakoplychennyam stabilnoho strontsiyu pryrodnoho pokhodzhennya. Metodychni rekomendatsiyi* [Evaluation of countermeasures aimed at reducing the content of Chornobyl ^{90}Sr in agricultural products, the accumulation of stable strontium of natural origin. Guidelines]. Kyiv: IAB, 29 p. Available at: <https://www.twirpx.com/file/1504835>. (in Ukr.)
 23. *Chornobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts*. NEA, 2002, 157 p. Available at: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2022-01/3508-cher-nobyl_2022-01-05_11-11-9_843.pdf.
 24. Garger E. K., Kashpur V. O., Skorjak G. G., Shynkarenko V. K. (2014). [Physico-chemical characteristics of the aerosol of the 30-km zone of the Chornobyl NPP in 1986–2013]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 23, pp. 54–65. (in Rus.)
 25. Nefzger M. D., Drasgow J. (1957). The needless assumption of normality in Pearson's r. *The American Psychologist*, vol. 12, pp. 623–625. Available at: <https://doi.apa.org/doiLanding?doi=10.1037%2Fh0048216>.
 26. Rodgers J. L., Nicewander W. A. (1988). Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *The American Statistician*, vol. 42, no. 1, pp. 59–66. Available at: <https://www.stat.berkeley.edu/~rabbee/correlation.pdf>.
 27. Novikov A. M. (2019). [Application of information retrieval systems for providing scientific works with archival meteorological data]. Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference "Computer and Informational Systems and Technologies" (Kharkiv, April 23–24, 2019), pp. 25–26. Available at: <https://nure.ua/wp-content/uploads/workshop/csitic.2019.pdf>. (in Ukr.)
 28. Grzhibovskiy A. M. (2017). [Correlation data analysis using Statistica and SPSS software]. *Nauka i Zdravookhranenie* [Science and Health], vol. 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/korrelatsionnyy-analiz-dannyh-s-ispolzovaniem-programmnogo-obespecheniya-statistika-i-spss>. (in Rus.)
 29. Rens van de Schoot (2020). *Small sample size solutions: A guide for applied researchers and practitioners*. New York: Routledge, 285 p. Available at: www.twirpx.com/file/3376961.

A. M. Новіков

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

Порівняльна оцінка динаміки середньорічної швидкості осадження ^{90}Sr та ^{137}Cs за довготривалий період після Чорнобильської катастрофи для міст України, Києва та Чорнобиля

Достовірна оцінка поширення радіоактивного аерозолі є актуальним та пріоритетним завданням екологічної безпеки. Важливим параметром, що використовується для розрахунку транспортування радіоактивних опадів, є швидкість осадження радіоактивного аерозолі. Коливання швидкості осадження, що за експериментальними даними знаходяться в межах декількох порядків величини, залежить від ряду факторів (зокрема і часу), що потребує детального аналізу закономірностей формування полів радіоактивного забруднення повітря та підстильної поверхні.

У представленому радіоекологічному дослідженні оцінено та проаналізовано динаміку середньорічних значень швидкості осадження ^{90}Sr та ^{137}Cs на основі експериментальних даних вимірювань об'ємної активності та потоків осадження, отриманих в Україні для міст Києва та Чорнобиля після аварії на Чорнобильській АЕС протягом 1987–2019 рр.

Для ^{90}Sr (як і для ^{137}Cs) спостерігаються сильні позитивні кореляційні зв'язки між об'ємною активністю

С та потоком щільності випадіння F , як в межах окремого майданчика, так і між майданчиками (Києвом та Чорнобилем). Значення коефіцієнтів кореляції Пірсона, значимі на рівні $p < 0,05$, знаходяться в межах $0,99 < r < 1,00$.

Оцінені за довготривалий період (33 роки) швидкості осадження для ^{90}Sr та ^{137}Cs проявляють відмінні тенденції (тренди). Загальна швидкість осадження ^{90}Sr має тенденцію до зростання, у той час як для ^{137}Cs швидкість осадження з часом зменшується, що може вказувати на трансформацію носіїв аерозолів цих радіонуклідів, їхніх аеродинамічних та міграційних можливостей переміщення в повітрі. Для ^{137}Cs зростає роль частинок менших аеродинамічних діаметрів, що очевидно повинно підвищувати міграційні можливості, на відміну від ^{90}Sr , для якого спостерігається зворотна тенденція. Такі закономірності характерні для двох досліджуваних майданчиків (Києва та Чорнобиля).

Дослідження може бути використане для емпіричної параметризації швидкостей осадження в моделях якості повітря.

Ключові слова: екологічна безпека, моніторинг, об'ємна активність, потік щільності випадіння, швидкість осадження, аварія на ЧАЕС, ^{90}Sr , ^{137}Cs .

Надійшла 22.11.2021

Received 22.11.2021

І. В. Куцина, В. С. Гавриленко, Д. І. Хвалін

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

Результати діяльності Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України у 2021 році

Ключові слова:

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій, НАН України, наукова діяльність, впровадження результатів досліджень, міжнародне співробітництво, робота з засобами масової інформації, видавнича діяльність

Наведено основні результати наукової та науково-організаційної діяльності Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України у 2021 р. Показано, що незважаючи на об'єктивні складнощі, зумовлені економічною й епідеміологічною ситуацією у світі, співробітниками Інституту були отримані важливі науково обґрунтовані результати з фундаментальних і прикладних досліджень, зокрема, щодо ядерної та радіаційної безпеки об'єкта «Укриття», а також підвищення надійності та безпеки експлуатації атомних електростанцій. Ці результати впроваджені та використовуються у законотворчій діяльності України, на виробництві, в електроенергетиці та в закладах вищої освіти.

Вступ

У 2021 р. вже другий рік поспіль Інститут проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України (ІПБ АЕС НАН України), як і всі наукові установи в Україні та світі, продовжував свою роботу в умовах пандемії. Додаткові складнощі зумовили також економічні та політичні чинники. Однак попри обмеження та необхідність суттєво коригувати формат виконання поставлених завдань, науковці інституту продовжували докладати необхідних зусиль для виконання запланованих науково-дослідницьких робіт, впровадження їхніх результатів та представлення їх у публікаціях та в рамках наукових заходів.

ІПБ АЕС був створений на підставі Постанови Президії НАН України № 44 від 16.02.2004 р. шляхом реорганізації Міжгалузевого науково-технічного центру «Укриття», який, у свою чергу, було започатковано відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 55 від 04.02.1992 р. Інститут став правонаступником Міжгалузевого науково-технічного центру з усіх питань і зобов'язань. На Інститут було покладено

обов'язки наукового керівника робіт зі зняття з експлуатації енергоблоків Чорнобильської АЕС (ЧАЕС) та перетворення об'єкта «Укриття» (ОУ) на екологічно безпечну систему, а також відповідальність за подальший розвиток фундаментальних і прикладних досліджень у галузі безпеки атомних станцій, їхню належну організацію та координацію [1].

На сьогоднішній час Інститут має такі напрями наукової діяльності:

перетворення ОУ на екологічно безпечну систему;
безпека експлуатації ядерних установок;
зняття з експлуатації ядерних установок;
поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) і радіоактивними відходами (РАВ).

За весь час існування ІПБ АЕС НАН України його очолювали такі видатні вчені: Карасьов В. С. (1992–1993 рр.); Токаревський В. В. (1993–1995 рр.); Ключников О. О. (1996–2015 рр.); Носовський А. В. (з 2016 р. і станом на сьогодні).

У зв'язку з оголошенням НАН України конкурсу на заміщення посади директора ІПБ АЕС були організовані та проведені вибори відповідно до Статуту

© І. В. Куцина, В. С. Гавриленко, Д. І. Хвалін, 2022

Інституту та Методичних рекомендацій щодо особливостей обрання керівника державної наукової установи, затверджених постановою Кабінету Міністрів України № 998 від 14.12.2016 р. Згідно з результатами таємного голосування та п. 3.12.4 Статуту НАН України директором ІПБ АЕС обрано чл.-кор. НАН України, д-ра техн. наук, проф. Носовського А. В., який набрав більше двох третин голосів.

На сесії Загальних зборів НАН України 26 травня 2021 р. чл.-кор. НАН України, д-ра техн. наук, проф. Носовського А. В. обрано дійсним членом (академіком) НАН України.

У 2021 р. за вирішення проблем безпеки об'єктів атомної енергетики, багаторічну сумлінну працю, високий професіоналізм та з нагоди 35-х роковин Чорнобильської катастрофи нагороджені: Медаллю «За працю і звитягу» — 1 працівник, Грамотами Верховної Ради України — 2 працівника, Цінними подарунками Голови Верховної Ради України — 2 працівника, Подяками Президії НАН України — 4 працівники. Крім того, за особисті досягнення нагороджені: Медаллю «За оборону рідної держави» — 1 працівник, Відзнакою «Почесний громадянин міста Славутич» — 1 працівник, Відзнакою НАН України для молодих учених «Талант, натхнення, праця» — 1 працівник.

У 2021 р. згідно з Тематичним планом науковими співробітниками Інституту виконувались 8 робіт за бюджетними темами відомчої тематики, 3 — програмно-цільової та конкурсної тематики, а також 8 — госпдоговірної тематики. У цій статті наведено результати, які отримані під час виконання робіт з кожного напрямку діяльності Інституту.

Перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему

У рамках науково-технічного супроводу робіт щодо введення Нового безпечного конфайнмента (НБК) в експлуатацію виконано комплекс досліджень з обґрунтування ядерної та радіаційної безпеки, що дозволило ЧАЕС отримати ліцензію на переробку та зберігання РАВ, а також забезпечити початок виконання практичної діяльності з експлуатації НБК щодо перетворення ОУ на екологічно безпечну систему (рис. 1, 2). Співробітниками Інституту виконано дослідження впливу НБК на довкілля та розроблено комплекс коригувальних дій у разі виникнення небезпечних наслідків від погіршення радіаційних умов під час експлуатації кон-



Рис 1. Загальний вигляд Нового безпечного конфайнмента



Рис 2. Об'єкт «Укриття» під Новим безпечним конфайнментом

файнмента. На основі комплексного довгострокового моніторингу досліджено вплив стану лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ) на рівень ядерної безпеки НБК і побудовано базу даних з сукупністю інформації про основні характеристики цих матеріалів, що дозволило розробити організаційно-технічні заходи щодо запобігання або зниження ризиків від погіршення їхнього стану. Результати робіт впроваджені у державному спеціалізованому підприємстві (ДСП) «ЧАЕС», що дозволило покращити контроль рівня ядерної та радіаційної безпеки під час перетворення ОУ на екологічно безпечну систему.

Шляхом виконання комплексних робіт досліджено стан захисного полімерного покриття у підпокрівельному просторі ОУ та визначено вплив контрольних параметрів на експлуатацію комплексу НБК-ОУ, що сприяє зменшенню негативних наслідків радіаційного навантаження на довкілля. Результати роботи впроваджені в ДСП «ЧАЕС» і дозволили приймати науково обґрунтовані рішення щодо термінів проведення зрошування захисним покриттям поверхонь у підпокрівельному просторі ОУ.

Крім цього, у 2021 р. під час виконання науково-дослідницьких робіт отримано результати, які дозволяють планувати та виконувати майбутні роботи щодо перетворення ОУ на екологічно безпечну систему. Так, на основі експериментальних досліджень розроблено модель перерозподілу радіонуклідів у поровому просторі ЛПВМ ОУ, яка дозволяє за допомогою електрокінетичних процесів перевести ці матеріали у хімічно стабільні кристалічні сполуки та сприяє створенню нових методів кондиціювання для забезпечення умов довготривалого зберігання та/або їхнього майбутнього захоронення. Розроблена модель впроваджена у ДСП «ЧАЕС», що сприяє підвищенню достовірності визначення поведінки ЛПВМ в умовах НБК і впливає на рівень ядерної та радіаційної безпеки. Науково обґрунтовані рішення щодо поводження з ЛПВМ були використані у законотворчій діяльності Національної комісії з радіаційного захисту населення України при Верховній Раді України, зокрема під час підготовки експертного висновку до проекту Закону про внесення змін до Загальнодержавної програми зняття з експлуатації ЧАЕС та перетворення ОУ на екологічно безпечну систему (реєстр. № 5602 від 03.06.2021 р.), внесеного Кабінетом Міністрів України. Запропоновані методичні рекомендації щодо створення нових методів кондиціювання ЛПВМ використовуються у низці дисциплін навчального процесу 4-го освітнього рівня Державної Установи «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» під час підготовки аспірантів спеціальності 103 «Науки про Землю» (спеціалізація «Екологічна безпека»).

Визначено фактори, що впливають на вибір сценаріїв перетворення ОУ, оцінено ризики несприятливих впливів на довкілля кожного зі скупчень ПВМ, проведено аналіз національних нормативно-правових актів та оцінку їхньої достатності для вирішення комплексу завдань щодо перетворення ОУ на екологічно безпечну систему, а також розроблено методологічно-технічні пропозиції з підвищення ефективності й інформативності штатної системи контролю ядерної безпеки НБК. Отримані результати у вигляді науково обґрунтованих рекомендацій щодо поетапного вилучення або переведення в контрольований стан ПВМ заплановані до впровадження у Державному агентстві України з управління зоною відчуження (ДАЗВ) і ДСП «ЧАЕС».

Безпека експлуатації ядерних установок

В умовах необхідності і важливості впровадження програми нового будівництва ядерних енер-

гоблоків для забезпечення енергетичної незалежності України досліджено важливі характеристики сучасної реакторної установки AP1000, яка ліцензована у США, Канаді і деяких інших країнах. Досліджено переваги проекту AP1000 перед іншими сучасними реакторними установками EPR-1750, APR-1400, ВВЕР-1200, а також питання, на які необхідно звернути особливу увагу під час обґрунтування впровадження технології AP1000 в ядерній енергетиці України.

Під час планування обсягів споживання електроенергії в Україні на період 2020–2040 рр. рекомендовано використовувати результати аналізу розвинених країн, а також країн, рівень споживання електроенергії яких близький до нашої держави. Отримані прогностичні оцінки щодо споживання електроенергії в Україні дозволяють визначити оптимальні діапазони встановленої потужності енергоблоків АЕС, у тому числі з урахуванням введення потужностей заміщення на АЕС України.

Виконано системний аналіз перспективних напрямів розвитку атомної енергетичної галузі, типів та особливостей використання реакторних установок нового покоління, а також систематизовано визначальні фізико-технічні проблеми реалізації нових технологій у головному обладнанні ядерних енергоблоків нового покоління. Отримані результати у вигляді багатокритеріальної методології вибору перспективних ядерно-енергетичних технологій заплановані до впровадження у Державному підприємстві Національна атомна енергогенеруюча компанія (ДП НАЕК) «Енергоатом» та дозволяють науково обґрунтувати вибір основного обладнання, конструктивних і будівельних матеріалів для ядерно-енергетичного сектору України.

Узагальнено відомості про особливості проявів потенційно небезпечних теплогідравлічних аномалій, що виникають у процесі експлуатації активних зон ВВЕР. Значну увагу приділено загрозі неконтрольованого виникнення в тепловидільних збірках латентних передаварійних та аварійних експлуатаційних станів під час генерації парової фази на поверхні твелів, включаючи кризу тепловіддачі в умовах подальшого кипіння теплоносія. Відзначено, що в цих умовах тепловіддача, яка має відбуватися виключно в конвективному режимі, характеризується також неконтрольованим виникненням процесу кипіння, від активації перших центрів пароутворення до формування розвиненої пухиркової структури теплоносія. Розглянуто обмежені можливості сучасних технічних засобів моніторингу технічного стану ВВЕР, які

не забезпечують виявлення зазначених аномалій та передаварійних режимів тепловіддачі. З огляду на дані про флуктуації потоку нейтронів, показано, що шумові складники на виході штатних детекторів нейтронного потоку (детектори прямого заряду) несуть важливу діагностичну інформацію, яка наразі втрачається, щодо теплогідрравлічних процесів в об'ємі активної зони. З урахуванням цього зроблено висновок про необхідність невідкладної розробки методології оперативної ідентифікації випадкових спектральних реалізацій нейтронного шуму, що реєструється на виходах нейтронних детекторів існуючих систем внутрішньореакторного контролю. Визначено характер необхідних надійних даних про спектральну структуру основних типів діагностичних образів нейтронного шуму відповідно до основних типів теплогідрравлічних аномалій. Наведено аналіз даних відомих, а також виконаних за участі науковців інституту реакторних експериментів, на основі якого доведено, що спектральна структура авто- та когерентної густини сигналів на виході штатних детекторів нейтронного потоку містить вичерпну діагностичну інформацію стосовно типу та місця локалізації парорідинних структур в активній зоні ВВЕР. З огляду на це проаналізовано інформаційні характеристики окремих спектральних діапазонів нейтронного шуму і зроблено висновки щодо безпосередньої їх відповідності до характерних теплогідрравлічних процесів, як об'єктів діагностики.

На основі узагальнення тенденцій розвитку водоохолоджуваних енергетичних ядерних реакторів, аналізу стану відповідних досліджень та досвіду науковців інституту сформульовано науково-практичні напрями та конкретизовано першочергові науково-технічні проблеми, пов'язані з забезпеченням надійності та продовженням термінів гарантованої експлуатації діючих та перспективних ядерних енергоустановок. Визначено основні недоліки існуючих систем контролю та діагностики перебігу складних багатофакторних нейтронно-фізичних, теплогідрравлічних та вібраційних процесів, якими супроводжується експлуатація цих реакторів, включаючи їх найважливіше головне обладнання — активні зони — і показано принципову недосконалість цих систем та невідповідність їх зростаючим вимогам безпеки. Відзначено необхідність запровадження методів спектрального аналізу та штучного інтелекту для врахування флуктуаційних складових сигналів датчиків основних технологічних параметрів. Наголошено на необхідності зміни принципів побудови

систем контролю та діагностики шляхом створення засобів автоматичної діагностики, здатних виявляти початкові фази потенційно небезпечних аномалій, що має полегшити інформаційно напружені умови праці персоналу, підвищити ефективність та економічність оперативних рішень та оптимізувати ремонтну політику із суттєвим подовженням ресурсу обладнання. Сформульовано вимоги до створюваного інтелектуального діагностичного функціоналу водоохолоджуваних реакторів, визначено напрями побудови математичних моделей, алгоритмічного та програмного забезпечення комп'ютерних комплексів автоматичного контролю та діагностики.

На основі багатофакторного імітаційного моделювання визначено термодинамічні та структурні параметри матеріалів реактора на надкритичній воді під впливом радіаційного випромінювання. З урахуванням поведінки надкритичної води під впливом опромінення досліджено термодинамічні параметри рідинної системи, яка утворюється за можливих режимів роботи цього реактора, що дозволило оцінити надійність матеріалів зовнішніх конструкційних елементів і стійкість матеріалів внутрішніх конструкцій під впливом радіаційного випромінювання за надкритичних умов і коректно визначити можливий термін їхньої експлуатації. Наукові та науково-практичні результати у вигляді рекомендацій щодо вибору конструкційних матеріалів з продовженням терміном експлуатації за умов інтенсивного радіаційного опромінення та методики визначення фізико-хімічних властивостей води у надкритичному стані використано під час навчального процесу на кафедрі молекулярної фізики фізичного факультету Київського національного університету (КНУ) імені Тараса Шевченка.

У рамках угоди про співробітництво з компанією Qingdao Xianchu Energy Development Group Ltd. (Китайська Народна Республіка) групою співробітників ІПБ АЕС спільно з китайськими інженерами виконується розробка концепту робота для очищення труб охолодження конденсаторів на АЕС Ціньшань. Оскільки під час експлуатації системи охолодження конденсаторів на цій АЕС, яка використовує морську воду, виникає проблема засмічення трубопроводу, це зумовлює необхідність розробки мобільних пристроїв для їхнього очищення. Фахівцями Інституту було запропоновано концепт мобільного робота, який має компактні розміри в транспортному положенні та збільшує свою базу в робочому стані, що дозволяє виконувати очищення трубопроводу діа-

метрами 1 200 і 4 000 мм без участі людини (рис. 3, 4). Після проведення низки розрахунків розроблено унікальне шасі зі змінною геометрією для переміщення у циліндричних поверхнях, а також ґрунтозабірний комплекс і систему подачі інструмента. Цей концепт був представлений замовнику China National Nuclear Corporation. Станом на сьогодні проходять

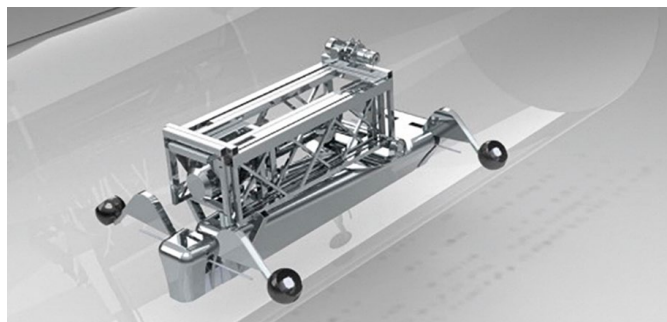


Рис 3. Транспортне положення мобільного робота в трубопроводі



Рис 4. Робоче положення мобільного робота



Рис 5. Випробувальна платформа для нахилого транспортера відпрацьованих збірок демонстраційного реактора

переговори щодо технічної реалізації проєкту. Результати роботи заплановані до впровадження на АЕС Ціньшань.

Зняття з експлуатації ядерних установок

У рамках методичного та науково-технічного супроводу тестування термічної та пінної дезактивації РАВ визначено ефективність застосування технологій Корейського науково-дослідного інституту на реальних радіоактивно забруднених зразках бетону та металу ЧАЕС, а також розроблено рекомендації з підвищення ефективності та застосування цих технологій на ЧАЕС. Результати роботи впроваджено у ДСП «ЧАЕС» і сприяють зменшенню радіаційного навантаження на персонал та довкілля.

Розроблено методичні рекомендації щодо визначення бета-активності «гарячих» частинок та їхнього розподілу за активністю на основі авторадіографії забруднених поверхонь, що надає можливість проводити дослідження з визначення закономірності утворення та шляхів поширення радіоактивних аерозолів фахівцям, які не мають попереднього досвіду з таких робіт.

У рамках угоди про співробітництво ІПБ АЕС з компанією Qingdao Xianchu Energy Development Group Ltd. виконується розробка технічного рішення випробувальної платформи для нахилого транспортера відпрацьованих збірок демонстраційного реактора на швидких нейтронах потужністю 600 МВт. Під час роботи, зокрема, розроблено та запропоновано концептуальне рішення у вигляді універсальної випробувальної платформи, яка відповідає одночасно параметрам транспортера відпрацьованих збірок і транспортера екранованого приміщення (рис. 5). З метою чіткого загального уявлення про розроблений концепт співробітниками Інституту підготовлено та передано спеціалістам компанії Qingdao Xianchu Energy Development Group Ltd. анімаційний демо-ролик. Після детального аналізу концепту з китайської сторони та двостороннього обговорення особливостей конструкції було прийнято рішення щодо незначного корегування проєктних матеріалів з подальшим затвердженням концептуального рішення. Результати роботи заплановані до впровадження на АЕС Хайян.

Виконано математичне моделювання розповсюдження радіоактивних аерозолів, які потрапили в атмосферу за рахунок лісових пожеж у 2015, 2018 і 2020 рр., для Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) та території України (рис. 6, 7).

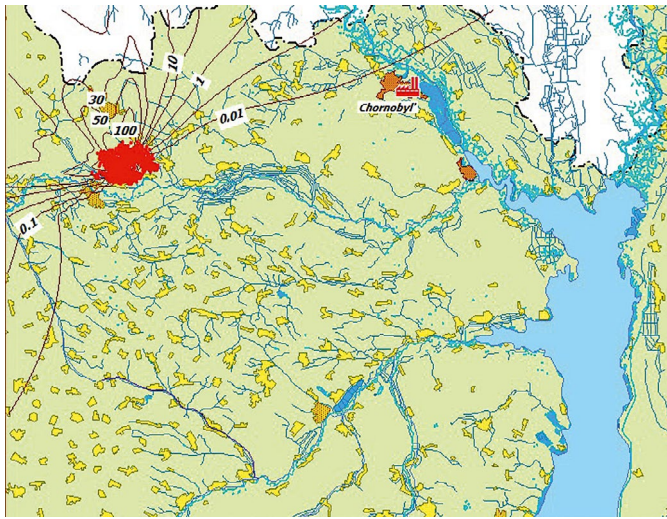


Рис. 6. Моделювання атмосферного розповсюдження радіоактивних аерозолів у результаті лісових пожеж у ЧЗВ

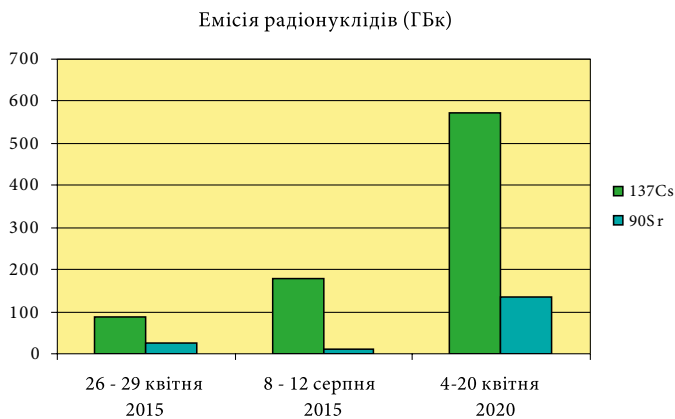


Рис. 7. Усереднене значення емісії радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr , які потрапили в атмосферу за рахунок лісових пожеж

На основі даних дистанційного зондування місцевості виконано дослідження ефективності визначення ділянок лісових екосистем, що зазнали впливу пожежі 2020 р. На відповідних ділянках було відібрано 42 проби біомаси рослинності, лісової підстилки та ґрунту для подальшого їхнього аналізу на вміст радіонуклідів з метою актуалізації даних щодо радіоактивного забруднення досліджуваної території та визначення закономірності міграції радіонуклідів у компоненти біомаси рослинності з ґрунту та підстилки, а також розрахунку валових запасів радіонуклідів у дерево-станах лісових екосистем. Це дозволило створити файл реєстру проб з геолокацією місць відбору.

З урахуванням радіоекологічної критичності виконано комплексну оцінку впливу ЧЗВ на прилеглу територію в радіусі 100 км у період лісових пожеж, що дозволило визначити найбільш критичні території, на яких можливе формування небезпечних рівнів до-

зового навантаження на населення під час повітряного перенесення радіонуклідів із ЧЗВ у випадку лісових пожеж та екстремальних метеорологічних явищ (пилі бурі) в зоні. Розглянуто різні сценарії структури регіонального землекористування та побудовано тематичні оціночні карти, які є основою для превентивного планування реабілітаційних заходів відповідно до норм радіаційної безпеки в разі критичних ситуацій.

Науково обґрунтовані рекомендації з екологічної реабілітації радіоактивно забруднених територій ЧЗВ на основі результатів експериментальних і модельних досліджень заплановані до впровадження у ДАЗВ України й Міністерство аграрної політики та продовольства України, а також сприяють розробці науково обґрунтованих рекомендацій щодо можливості повернення різних частин території ЧЗВ до різних форм господарського використання, у тому числі виробництва сільськогосподарської продукції, вибору та зміни форм землекористування на сільськогосподарських територіях, прилеглих до зони відчуження.

Поводження з ВЯП і РАВ

У 2021 р. на майданчику ЧАЕС було введено у промислову експлуатацію сховище сухого типу (СВЯП-2) для приймання, підготовки до зберігання і безпосередньо довгострокового зберігання (протягом 100 років) ВЯП реакторів РБМК. У межах роботи над цим проектом співробітники ІПБ АЕС брали участь у розробці розділів Програми науково-технічного супроводу об'єкта «Завершення будівництва сухого сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-2) на майданчику ДСП ЧАЕС на етапах будівництва та введення в експлуатацію» та забезпеченні науково-інженерного супроводу буріння та облаштування спостережних свердловин радіогідроекологічного моніторингу.

У рамках науково-технічного супроводу на етапах будівництва та введення в експлуатацію Централізованого сховища ВЯП (ЦСВЯП) виконано аналіз достатності й ефективності заходів із забезпечення радіаційної безпеки персоналу та довкілля за умов, які не регламентовані чинними нормами та стандартами, а також проведено вібродинамічні випробування будівлі приймання ВЯП (рис. 8). Розроблений попереднього року Регламент радіаційного контролю на етапі введення в експлуатацію ЦСВЯП погоджено Державною інспекцією ядерного регулювання України. Все це сприяє посиленню енергетич-



Рис. 8. Будівля приймання відпрацьованого ядерного палива

ної незалежності України за рахунок відмови від послуг Російської Федерації зі зберігання відпрацьованого палива.

У рамках наукового супроводу на етапі введення в експлуатацію промислового комплексу з переробки твердих РАВ Чорнобильської станції за допомогою розробленого програмного забезпечення для розрахунку коефіцієнтів радіонуклідного вектора й обробки лабораторних даних проведено вдосконалення параметрів системи радіаційного та технічного контролю промислового комплексу, а також забезпечено роботу системи паспортизації упаковок із цими відходами (рис. 9). Результати роботи впроваджені у ДСП «ЧАЕС».



Рис. 9. Промисловий комплекс з переробки твердих радіоактивних відходів

Співпраця з національними та закордонними науковими організаціями

ІПБ АЕС продовжує плідну співпрацю більше ніж з 20 науковими установами України в рамках договорів про спільну науково-технічну діяльність.

Інститут має угоди про співробітництво з такими міжнародними організаціями та компаніями як:

Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ); Підрозділ з проблем безпеки НАТО (NATO Emerging Security Challenges Division, США); Відділ безпеки та радіації Дослідницького центру Юліха (Research Center Jülich, Department for Safety and Radiation), Міжнародна консультативна група Consortium of PLEJADES GmbH, товариство Gesellschaft für Anlagen- und Reactorsicherheit, GRS (Німеччина); Японське агентство з атомної енергії (Japan Atomic Energy Agency, JAEA), Національна корпорація «Університет Фукусіми» (Японія); товариство з обмеженою відповідальністю (ТОВ) «Китайсько-українські ядерно-енергетичні технології Сянчу»; Університет Південної Кароліни, Університет штату Східного Теннессі, Університет Клемсона, Аргонська національна лабораторія (США); компанія Qingdao Xianchu Energy Development Group Ltd. (КНР), Університет Брістоля (Велика Британія), Корейський науково-дослідний інститут атомної енергії (Південна Корея); Університет Упсала (Швеція) та інші.

За результатами роботи в рамках гранту МАГАТЕ «Методи аналізу гідрогеологічних параметрів водонесних горизонтів поблизу АЕС із застосуванням індикаторів» (Methods for Analyzing the Hydrogeological Characteristics of the Aquifers in the Vicinity of Nuclear Power Plants using Indicators, Research Contract no. F22546), який було звершено у 2020 р., підготовлено до друку колективну монографію «Use of isotope hydrology to characterize groundwater systems in the vicinity of nuclear power plants».

У рамках угоди про науково-технічне співробітництво між Японським агентством з атомної енергії (JAEA) та ІПБ АЕС виконуються дослідження деградації ПВМ унаслідок впливу мікроорганізмів. Мета — визначення структури мікробів в ОУ та впливу мікроорганізмів на перерозподіл радіонуклідів у сформованій у ньому екосистемі. Отримані під час виконання роботи експериментальні дані демонструють процеси вилугування, що свідчить про змішані фізико-хімічні (внаслідок хімічного впливу води) та біологічні (вплив мікроорганізмів) закономірності процесів. Зразки культур з ОУ продемонстрували значно вищий ступінь переходу ^{137}Cs до культурального середовища порівняно з рештою експериментальних і контрольних зразків, що дозволяє стверджувати про внесок певних видів мікроорганізмів у процеси вилугування. Підвищення кислотності культурального середовища зразків з мікроорганізмами ОУ передбачає модифікацію водневого показника (рН) як одного з механізмів біовилугування.

У 2021 р. продовжено роботи в рамках спільного українсько-японського проєкту «Покращення радіаційного контролю навколишнього середовища та законодавчої бази в Україні для екологічної реабілітації радіоактивно забруднених майданчиків» програми «Науково-технічне партнерство в інтересах сталого розвитку» (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development, SATREPS) за підтримки Японського Агентства з науки і технологій (Japan Science and Technologies Agency, JST) і Японського агентства міжнародного співробітництва (Japan International Co-operation Agency, JICA). Метою роботи є посилення технічного рівня радіаційного контролю й законодавчої бази в Україні для екологічного відновлення радіоактивно забруднених територій, а також забезпечення моніторингу та моделювання для підтримки здійснення нового районування ЧЗВ.

Проведено засідання спільної групи WG3 проєкту за напрямом «Оцінка атмосферного забруднення на основі наземного моніторингу та комп'ютерного моделювання розповсюдження радіоактивних аерозолів» (представники від Японії — Інститут радіоактивності навколишнього середовища Фукусіма-І, Інститут проблем математичних машин і систем НАН України та ДСП «Екоцентр»). З використанням двох фільтро-вентиляційних установок Sibata HV-RW, встановлених на території Гідроцеху ЧАЕС та біля берегової насосної станції, проведено перші відбори проб радіоактивних аерозолів у приземному повітрі на території осушеної частини ставка-охолоджувача ЧАЕС. Після виходу з ладу обох установок у серпні 2021 р. вони відправлені на ремонт до Японії. Розроблену в ІПБ АЕС модель розрахунку підйому та подальшого розповсюдження радіоактивних аерозолів в атмосфері внаслідок лісових пожеж адаптовано до умов Японії та використано для оцінки наслідків лісової пожежі радіоактивно забруднених лісів у 2017 р. зони обмеження АЕС Фукусіма-І.

У рамках договору між ІПБ АЕС та South West Nuclear Hub / School of Physics University of Bristol (Беліка Британія) виконується робота «Випробування експериментальних пристроїв для оцінки радіаційних умов об'єктів на ЧАЕС і НБК». Під час виконання роботи, зокрема, з використанням методів і обладнання дистанційного роботизованого радіаційного картографування та комплексного інженерно-радіаційного обстеження виконано візуальне тривимірне об'ємне сканування у широкому спектральному діапазоні та створено тривимірні термограми, проведено дистан-

ційне тривимірне картографування західної стіни ОУ, радіаційне тривимірне картографування приміщень Чорнобильської станції та НБК за допомогою чотириноного самохідного робота Boston Dynamics «Spot» (рис. 10). Це дозволило отримати нові наукові дані про об'єкти та провести унікальні експерименти в умовах підвищеного радіаційного фону та випробування унікального обладнання [2].



Рис. 10. Чотириногий самохідний робот Boston Dynamics «Spot»

Незважаючи на складну епідеміологічну ситуацію світового масштабу, яка ускладнює міжнародну діяльність, у 2021 р., зокрема, було підписано договір з МАГАТЕ «Розробка та застосування ізотопних методів для ефективного управління водними ресурсами в гірничих районах» (Development and Application of Isotope Techniques for Efficient Water Resources Management in Mining Areas, Research Contract No. F33026). Мета роботи — оцінка впливу підприємств Калусько-Голинського родовища калійних солей на засолення питного водоносного горизонту за допомогою ізотопного методу та математичної моделі техногенно-геологічних умов. Під час виконання досліджень, зокрема, виконано аналіз умов засолення території Калусько-Голинського родовища, зроблено відбір проб підземних і поверхневих вод, на основі лабораторних досліджень визначено хімічний склад і концентрації тритію, дейтерію, калію та ізотопів кисню. Встановлено, що вода родовища має підвищений вміст тритію та дейтерію порівняно з підземними водами. Подальший аналіз ореолів розповсюдження ізотопів у підземних водах дозволить визначити масштаб забруднення підземних вод.

Крім цього, у 2021 р. між Університетом Упсала (Швеція) та ІПБ АЕС було підписано меморандум про науково-технічне співробітництво щодо моніторингу ксенону в ОУ. Мета — розробка методології та

технології моніторингу ізотопів ксенону в ОУ для підтвердження ефективності роботи системи ядерної безпеки комплексу НБК-ОУ. Під час виконання досліджень, зокрема, виконано польові роботи задля визначення точок відбору проб ізотопів ксенону, проведено попередні роботи з відбору ізотопів ксенону за допомогою фільтраційних пасток, а також розглянуто концептуальне рішення про інтеграцію системи у штатні системи контролю ПВМ ОУ та управління НБК [3].

Науково-організаційна діяльність

На сьогодні шість фахівців ІПБ АЕС працюють над дисертаційними роботами на здобуття наукового ступеня доктора наук, сім — над роботами на здобуття наукового ступеня кандидата наук, шестеро працівників навчаються в аспірантурі.

Під керівництвом співробітників Інституту один здобувач захистив кандидатську дисертацію на спеціалізованій вченій раді ІПБ АЕС за спеціальністю 05.14.14 — теплові та ядерні енергоустановки; один здобувач захистив докторську дисертацію на спеціалізованій вченій раді КНУ імені Тараса Шевченка за спеціальністю 01.04.14 — теплофізика та молекулярна фізика.

У 2021 р. два студента Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» проходили дипломну практику в ІПБ АЕС. Прийнято на роботу сім спеціалістів з вищою освітою у віці до 35 років. На додаток, один співробітник Інституту закінчив вищий навчальний заклад без відриву від виробництва.

На стажування в установи за кордоном відправлено троє наукових працівників.

Один молодий науковець бере участь у проведенні досліджень у рамках міжнародної угоди з МАГАТЕ за темою «Розробка та застосування ізотопних методів для ефективного управління водними ресурсами в гірничих районах».

У звітному році Інститут взяв участь в організації таких заходів:

VI Міжнародна конференція INUDECО'21 «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища» (26–29 квітня, м. Славутич), спільно з ДСП «ЧАЕС», Виконавчим комітетом міської ради м. Славутич, ДАЗВ України та Інститутом проблем математичних машин і систем НАН України. У рамках роботи конференції було проведено Міжнародну дискусійну па-

нель з громадською організацією «Українське ядерне товариство» (ГО «УкрЯТ») на тему «35-ті роковини аварії на ЧАЕС: від минулого до майбутнього»;

XVI Міжнародна науково-практична конференція МОДС'2021 «Математичне та імітаційне моделювання систем» (28 червня — 1 липня, м. Чернігів), спільно з Чернігівським національним технологічним університетом, Центральним науково-дослідним інститутом озброєння та військової техніки збройних сил України, Інститутом проблем математичних машин та систем НАН України та ін.;

Семінар з науковцями Брістольського університету Королівської інженерної академії Великої Британії (20–24 вересня, м. Чорнобиль), спільно з ДСП «ЧАЕС»;

Семінар з науковцями Шведської агенції з оборонних досліджень (FOI) та Університету Упсала (15–18 листопада, м. Чорнобиль), спільно з ДСП «ЧАЕС».

Водночас співробітники ІПБ АЕС брали участь у 17 міжнародних заходах в Україні, Казахстані, Канаді, Німеччині, США, Швейцарії, Угорщині, Португалії, Франції, Росії, Японії, Великобританії та в 11 національних заходах у Києві, Харкові, Житомирі, Чернігові, Чорнобилі, Славутичі.

Співробітники ІПБ АЕС брали участь у:

1) Підготовці до 35-х роковин аварії на ЧАЕС телевізійних проєктів від телеканалів:

Громадське телебачення «Науковий полігон. Чорнобиль. Документальний фільм» [4];

Телеканал Україна «Вартові мирного атома» [5];

Радіосвобода «Інший Чорнобиль: Магніт зони відчуження» [6];

Факти ICTV, Документальний фільм сайту Факти ICTV, оснований на невідомих історіях очевидців і ліквідаторів аварії на ЧАЕС [7].

2) Зустрічі з молоддю (проведення двох лекцій) в онлайн-режимі на тему «Чорнобильська зона та об'єкт «Укриття». Сучасний стан та майбутнє» в рамках проєкту «Наукові зустрічі» [8].

3) III Міжнародному круглому столі «Перспективи впровадження інновацій в атомну енергетику» (Організатори: ГО «УкрЯТ» та Рада молодих вчених при Відділенні фізико-технічних проблем енергетики НАН України).

4) Панельній дискусії «Атомні можливості для енергетичної незалежності України» в рамках XIX Міжнародного енергетичного бізнес-форуму 20 жовтня 2021 р. у ДП НАЕК «Енергоатом».

5) Зустрічі з німецькими студентами в рамках літньої школи DAAD Go East Summer School 2021, яку в цьому році проводили фахівці Навчально-

наукового центру екології та охорони навколишнього середовища Поліського національного університету. Основна тема навчання — ознайомлення німецьких студентів з сучасним станом і проблемами ЧЗВ, а також пов'язаними з цим питаннями.

Інститут продовжує працювати з громадськістю, зокрема, шляхом висвітлення результатів своєї діяльності та наукових досягнень у засобах масової інформації. Досвід, отриманий у результаті виконуваних робіт, передається у вигляді звітів до Українського інституту науково-технічної експертизи та інформації (УкрІНТЕІ), опублікованих статей, інформації на сайті Інституту, публікації монографій, підручників, навчальних посібників, довідників, методичних рекомендацій, доповідей на семінарах, конференціях, читанні лекцій у вищих навчальних закладах під час підготовки бакалаврів, магістрів та аспірантів.

У 2021 р. було надруковано 5 книжкових видань, авторами яких стали співробітники ІПБ АЕС (рис. 11):

1. Нейтронні та рентгенівські дослідження ліпідних мембран: монографія / Л. А. Булавін, О. І. Куклін, А. В. Носовський, Д. В. Соловйов; НАН України, Ін-т проблем безпеки атом. електростанцій. — Київ; Чорнобиль : ІПБ АЕС НАН України, 2021. — 160 с.

2. Об'єкт «Укриття» в умовах нового безпечного конфайнмента / В. О. Краснов, А. В. Носовський, С. А. Паскевич, В. М. Рудько; під заг. ред. А. В. Носовського. — Чорнобиль : ІПБ АЕС НАН України, 2021. — 344 с.

3. Shelter object in the conditions of the New Safe Confinement / V. O. Krasnov, A. V. Nosovskiy, S. A. Paskevych, V. M. Rudko; ed. by A. V. Nosovskiy. Chornobyl : ISP NPP, NAS of Ukraine, 2021. — 320 p.

4. Хвалін Д. І. Підвищення надійності та ефективності експлуатації турбогенераторів електричних станцій: монографія / Д. І. Хвалін. — Бостон, США : Primedia eLaunch LLC, 2021. — 152 с.

5. Attacks defense of computer nets by tools using extended information about environment / V. Lytvynov, N. Stoianov, I. Stetsenko, I. Skiter, O. Trunova, A. Hrebennyk, V. Nekhai, I. Burmaka. — Chernihiv : Polytechnic National University, 2021. — 212 p.

З 2018 р. ІПБ АЕС є співзасновником журналу «Ядерна енергетика та довкілля» (ISSN 2311-8253) спільно з ДП «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування» та ГО «УкрЯТ». Відповідно до Наказу Міністерства освіти і науки України № 1643 від 28.12.2019 р. журнал внесено до Переліку наукових фахових видань України [9]. Журнал індексується в базах даних Index Copernicus (входить до Index Copernicus Master List), Google Scholar, INIS, ResearchBib.

Результати досліджень співробітників Інституту у 2021 р. опубліковані в наукових виданнях, що індексуються провідними наукометричними базами даних (Scopus, Web of Science). Загальна кількість цих статей утричі перевищує аналогічний показник порівняно з середнім значенням 2016–2019 рр. і в півтора рази — порівняно з 2020 р. Водночас публікаційна активність закордоном підвищилась у два рази порівняно з середнім значенням аналогічного показника 2016–2019 рр., але менша, ніж попереднього року. Кількість статей у рецензованих фахових виданнях України відповідає показнику 2020 р.

З метою нерозповсюдження коронавірусної інфекції більшість зустрічей і заходів відбувається в онлайн-режимі за допомогою сучасних телекомунікаційних засобів, тому ІПБ АЕС постійно підтримує свій інтернет-сайт [10], а також сайт науково-технічного журналу «Ядерна енергетика та довкілля» в належному стані. Так, у 2021 р. сайт Інституту відвідали користувачі більше ніж з 215 іноземних країн.



Рис. 11. Книжкові видання співробітників ІПБ АЕС, надруковані у 2021 р.

Висновки

ІПБ АЕС є єдиною науковою установою в Україні, яка починаючи з 1992 р. забезпечувала та продовжує забезпечувати науково-технічну підтримку робіт зі зняття з експлуатації енергоблоків Чорнобильської АЕС та перетворення ОУ на екологічно безпечну систему. Соціальне значення робіт, що виконуються, полягає в захисті людини та навколишнього природного середовища від потенційних ризиків, пов'язаних з існуванням радіаційно небезпечного зруйнованого четвертого енергоблока, небезпека якого з часом зростає за рахунок руйнування конструкцій, що постраждали внаслідок аварії. Вирішення проблеми перетворення ОУ на екологічно безпечну систему є актуальним завданням сьогодення не тільки для України, але й для всього міжнародного співтовариства.

Водночас робота Інституту специфічна, оскільки наукові дослідження виконуються в особливо шкідливих умовах на об'єктах з обмеженим доступом, що потребує наявності засобів індивідуального захисту, спеціалізованого ліцензійного обладнання, проведення періодичних медичних оглядів, оформлення спеціальних дозволів і перепусток та ін. Така специфіка функціонування призводить до додаткових витрат. Наявне лабораторне обладнання є морально та фізично застарілим, тому потребує великих фінансових вкладень в оновлення, а переважно заміни на нове. Також існує проблема залучення молоді. Інститут щороку залучає до роботи випускників вищих навчальних закладів, але більшість з яких розглядають установу як площадку для набуття досвіду та через певний час переходять у більш привабливі з точки зору оплати праці підприємства.

Проте, незважаючи на об'єктивні складнощі та керуючись стратегією розвитку, ІПБ АЕС НАН України докладає всі необхідні зусилля для збереження науково-технічного потенціалу за умов економічної та епідеміологічної кризи.

Список використаної літератури

1. Звіт про діяльність Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України у 2021 році / ІПБ АЕС НАН України. — Київ, 2021. — 150 с. — Режим доступу: <http://www.ispnpp.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/10/zvit-2021.pdf>.
2. Візит науковців брістольського університету до ІПБ АЕС // Новини; ІПБ АЕС : офіційний веб-сайт. — Режим доступу: <http://www.ispnpp.kiev.ua/vizit-bristol21>.

3. Спільні дослідження з моніторингу ізотопів ксенону в об'єкті «Укриття» // Новини; ІПБ АЕС : офіційний веб-сайт. — Режим доступу: www.ispnpp.kiev.ua/shveden-visit.
4. Науковий полігон. Чорнобиль. Документальний фільм / hromadske : YouTube-канал. — Режим доступу: www.youtube.com/watch?v=jeYCRAknHqs&feature=emb_imp_woyt.
5. Операція «Саркофаг». Вартові мирного атома / Телеканал Україна : YouTube-канал. — Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=wWfZ1WTIFI>.
6. Другой Чернобыль: Магнит зоны отчуждения / Радио Свобода : YouTube-канал. — Режим доступу: https://www.youtube.com/watch?v=HRq4_s9ZKLM&t=212s.
7. Чернобыль 1986–2021. Неизвестные истории очевидцев и ликвидаторов аварии на ЧАЭС / Факти ICTV : YouTube-канал. — Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=Y2caCOxxv1w>.
8. Чорнобильська Зона та об'єкт «Укриття». Сучасний стан та майбутнє / Лекторій «Наукові зустрічі / Scientific meetings» : YouTube-канал. — Режим доступу: https://www.youtube.com/watch?v=kjH4sktEBY4&feature=emb_imp_woyt.
9. Науково-технічний журнал «Ядерна енергетика та доквілля» : офіційний веб-сайт. — Режим доступу: <http://npe.org.ua/uk>.
10. Інститут проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України : офіційний веб-сайт. — Режим доступу: www.ispnpp.kiev.ua.

I. V. Kutsyna, V. S. Havrylenko, D. I. Khvalin

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

The Work Results of the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the NAS of Ukraine in 2021

For the second year in a row, the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine (ISP NPP, NAS of Ukraine), as well as other scientific institutions in Ukraine and around the world, continues its work in the context of a pandemic. Additional difficulties are also caused by economic and political factors. However, despite the limitations and the need to significantly adjust the format of the tasks, the scientists of the Institute continued to make the necessary efforts to carry out planned research, implement their results and present them in publications and research activities. The main results of scientific and scientific-organizational

activities of the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants in 2021 are presented in the article. Despite the difficult economic situation due to the epidemic, the staff of the Institute obtained important results in studies of nuclear and radiation safety of the Shelter object, and in works aimed at improving the reliability and safety of existing Ukrainian and foreign nuclear power plants. The results of works in the field of the Shelter object transformation into an ecologically safe system, safe operation of nuclear facilities, decommissioning of nuclear facilities, spent nuclear fuel and radioactive waste management are presented in the article. These results are implemented and used in the legislative activity of Ukraine, in production, in the power industry and during the educational process.

Keywords: Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, scientific activity, implementation of research results, international cooperation, work with mass media, publishing activity.

References

1. *Report on the activities of the Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2021*. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 2021, 150 p. Available at: <http://www.ispnpp.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/10/zvit-2021.pdf>. (in Ukr.)
2. *Visit of the scientists of the Bristol University to the ISP NPP*. ISP NPP: official website. Available at: <http://www.ispnpp.kiev.ua/vizit-bristol21>. (in Ukr.)
3. *Joint research on xenon isotope monitoring at the Shelter object*. ISP NPP: official website. Available at: <http://www.ispnpp.kiev.ua/shveden-visit>. (in Ukr.)
4. *Scientific landfill. Chernobyl. Documentary*. Hromadske: YouTube channel. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=jeYCRaKnHqs&feature=emb_imp_woyt. (in Ukr.)
5. *Operation "Sarcophagus". Guardians of the peaceful atom*. "Ukraine" TV channel: YouTube channel. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=wWfIZ1WTIFI>. (in Ukr.)
6. *Another Chornobyl: Exclusion Zone Magnet*. Radio Svoboda: YouTube channel. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=HRq4_s9ZKLM&t=212s. (in Rus.)
7. *Chornobyl 1986–2021. Unknown stories of eyewitnesses and liquidators of the Chornobyl accident*. Facts ICTV: YouTube channel. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=Y2caCOxxv1w>. (in Rus.)
8. *Chornobyl Zone and Shelter object. Current state and future*. Lectures "Scientific meetings": YouTube channel. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=kJH4sk-tEBY4&feature=emb_imp_woyt. (in Ukr.)
9. Scientific Journal "Nuclear Power and the Environment": official website. Available at: <http://www.npe.org.ua>.
10. *Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine*: official website. Available at: www.ispnpp.kiev.ua.

Надійшла 21.02.2022

Received 21.02.2022

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). Тверда копія статті подається за бажанням. Електронна версія статті повинна бути створена за допомогою текстового редактора Microsoft Word з урахуванням таких вимог: шрифт — Times New Roman; кегель — 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 А4.

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 окремими від тексту файлами 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 кривії 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).

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 IT-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, методику 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).

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 українські та російські джерела 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 розмішувати 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 довкілля» взято принципи формування бібліографічних посилань American Psychological Association (APA). Відповідно до специфіки адаптації бібліографічного опису матеріалів українською та російською мовами враховано рекомендації експерта бази даних Scopus О. В. Кирилової.

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 російської 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».

