

І. А. Хомич, Т. В. Ковалінська*, В. І. Сахно, Ю. В. Іванов*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

*Відповідальний автор: sungel@i.ua

**ПРОБЛЕМИ ТА ЗАСОБИ ФОРМУВАННЯ РАДІАЦІЙНИХ ПОЛІВ
ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ І КВАЛІФІКАЦІЇ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС**

Аналізується сучасний стан експериментальної радіаційної установки ІЯД НАН України на останньому етапі адаптації її до здійснення комплексних функціональних випробувань електромеханічного та електротехнічного обладнання з переліку критичного і важливого для надійної експлуатації ядерних об'єктів на стійкість до експлуатаційних умов ядерних енергетичних установок. Завданням цього етапу є імітація в реакційній камері установки радіаційних експлуатаційних умов роботи обладнання в гермозонах енергетичних реакторів. Розглядаються розробки технічних засобів для формування в реакційній камері установки нормативних значень чистих і змішаних радіаційних полів. Обговорюються результати фінального («радіаційного») етапу створення в ІЯД НАН України дослідницького комплексу (імітатора) для вирішення актуальних проблем підвищення надійності в атомній енергетиці.

Ключові слова: ядерна енергетика, надійність, кваліфікація обладнання, функціональні випробування, радіаційні поля, імітатори.

1. Вступ

Кваліфікація обладнання рекомендована МАГАТЕ [1] як один з найважливіших напрямків підвищення експлуатаційної та ядерної безпеки енергоблоків АЕС. Національними регулюючими органами ядерної енергетики на підставі рекомендацій МАГАТЕ створено відповідні нормативні документи (НТД) щодо реалізації цього методу підвищення надійності національної ядерної енергетики. Цими НТД [2 - 4] визначено, що для проведення кваліфікаційних випробувань обладнання слід спочатку змоделювати процеси термічного старіння, потім радіаційного та експлуатаційного. Усі ці процеси рекомендовано [5, 6] здійснювати послідовно. Експертний висновок щодо придатності обладнання формується на основі аналізу всіх отриманих протоколів випробувань. Впровадження технології кваліфікації обладнання забезпечило суттєве зростання експлуатаційної надійності в ядерній енергетиці. Проблема знову стала актуальною, коли сформулась тенденція подовження термінів позапроектної експлуатації реакторів, які формально виробили свій ресурс, але фактично залишилися працездатними об'єктами [7, 8]. За таких обставин постала необхідність пошуку шляхів подальшого підвищення експлуатаційної надійності ядерної енергетики, але тепер уже за об'єктивними показниками реального залишкового ресурсу, тому що в подальшому покладатися лише на ймовірнісні методи оцінки надійності

[9] є ризиковим. У цьому випадку буде можливість виключати недовикористання експлуатаційного ресурсу й одночасно запобігати передчасному виходу з ладу працюючого обладнання. Такі завдання стали підставою створення в ІЯД НАН України науково-технологічної радіаційної установки з прискорювачем електронів 4 МеВ і потужністю пучка 5 кВт [10] та виконання на ній комплексних робіт [11 - 13] для отримання фізичних параметрів, відповідно до вимог НТД щодо підвищення безпеки АЕС.

2. Стан проблеми

Зараз на радіаційній установці ІЯД НАН України завершується комплекс технічних заходів з метою адаптації її до кваліфікаційних випробувань електротехнічного та електромеханічного обладнання з переліку критичного й важливого для забезпечення надійності ядерних енергоустановок [14].

Завданням останнього етапу адаптації установки є вирішення проблем імітації (відтворення) в камері установки радіаційних умов, аналогічних умовам експлуатації критичного обладнання в герметичних зонах на реальних ядерних об'єктах. Тут проблемою є забезпечення рівномірного розподілу радіаційного поля в об'ємах до 2 м³, достатніх для встановлення там обладнання і його випробування з усіма складовими реальних радіаційних полів по місцю його експлуатації. Це є необхідною умовою забезпечення

відповідності процесів, що протікають в обладнанні при його експлуатації на ядерному об'єкті, та процесів при моделюванні їх у лабораторних умовах. Особливо для електротехнічного обладнання та обладнання системи керування, що експлуатується в «жорстких» умовах оточуючого середовища.

3. Методичні особливості функціональних випробувань

В ІЯД НАН України (далі – ІЯД) проведено численні дослідження проблеми надійної експлуатації об'єктів ядерної енергетики. З урахуванням попередніх методів функціональних випробувань [15] та їхнього розвитку запропоновано більш досконалу, комплексну методику кваліфікації. В її основі випробування функціональної стійкості обладнання в стаціонарних, перехідних та аварійних режимах експлуатації на спеціалізованих стендах – імітаторах. Доцільно враховувати всі типи іонізуючого випромінювання на АЕС в режимах нормальної експлуатації та при аваріях. Технологічний процес треба реалізувати не у вигляді послідовного випробування стійкості функцій обладнання для окремих експлуатаційних факторів, а як комплексний процес випробувань обладнання в робочому режимі при спільній дії всіх експлуатаційних факторів одночасно.

У нормативних положеннях основним діючим радіаційним фактором вважається гамма-випромінювання, а нейтронного та бета-випромінювання при проведенні кваліфікаційних випробувань моделюють еквівалентними гамма-дозами. Наприклад, при кваліфікаційних випробуваннях кабелів АЕС для режимів стаціонарної і стабільної експлуатації рекомендовано [3] обмеження максимальної потужності дози в 1 кГр/год. Для випробувань на стійкість докризових ситуацій потужність необхідно збільшувати в десятки разів.

4. Актуальність розробки

В Україні поки що відсутні технічні засоби, здатні відтворювати при випробуваннях обладнання повний набір експлуатаційних параметрів, з іонізуючими випромінюваннями включно. Такі імітатори входять до переліку унікальних радіаційних об'єктів і повинні забезпечувати стабільну тривалість випробувань на різних фазах формування і розвитку кризових і аварійних ситуацій – від 30 діб до кількох місяців. При випробуванні на аварійні умови експлуатації може виникати необхідність суттєвого збільшення навантаження на піддослідне обладнання аж до його руйнування.

Тому для вітчизняної ядерної енергетики створення імітаторів, здатних випробовувати критичне обладнання в їхніх робочих режимах при дії всіх експлуатаційних і кризових факторів, є актуальною й економічно обґрунтованою задачею. На даному етапі необхідно завершити роботи по «радіаційній» частині проекту – забезпечити імітацію «чистих» радіаційних полів та їхніх суперпозицій у великих об'ємах реакційної камери радіаційної науково-технологічної установки ІЯД.

Аналіз «радіаційної» частини НТД виявив ефекти, що не враховуються при стандартній кваліфікації.

1. За рекомендаціями НТД радіаційне старіння обладнання моделюється як окремий процес. Це не зовсім коректно. Дослідження в ІЯД показали, що існуюча технологія моделювання радіаційного старіння не повною мірою відображає реальні процеси такого старіння в умовах ядерних об'єктів і враховує лише пострадіаційні ефекти. З експертних кваліфікаційних висновків виключено врахування процесів деградації органіки та інших матеріалів в обладнанні під впливом бета-випромінювання та нейтронів, оскільки сама методика моделювання суттєво відрізняється від реальних умов експлуатації обладнання на АЕС і відповідно вносить похибку в отримані результати випробувань, бо враховує лише пострадіаційні зміни в матеріалах обладнання, а не в його функціях. Наприклад, для електромеханічного та електротехнічного обладнання більш значимими факторами втрати функціональності є супутні процеси – радіоліз повітря, вологи, іонізація матеріалів на поверхні ізоляторів.

Проведений аналіз свідчить, що для імітації умов експлуатації критичного обладнання в гермозонах АЕС необхідно не тільки забезпечити нормативні рівні різних складових радіаційного поля, але й формування навколо піддослідного обладнання супутніх продуктів радіолізу повітря. Ці завдання можна вирішувати лише з використанням потужних електрофізичних джерел іонізуючої радіації – прискорювачів електронів. При роботі з виведеним пучком електронів в атмосфері реакційної камери генеруються доступні для досліджень усі радіаційні фактори, характерні для гермозон ядерних енергетичних реакторів.

Дослідження показують, що при опроміненні, наприклад, електротехнічного та електромеханічного обладнання необхідно враховувати (або технічно виключати) вплив супутніх факторів – хімічних реакцій продуктів радіолізу повітря, виникнення цілої низки продуктів трансформації енергії випромінювань в органічних складових електротехнічного обладнання за ланцюгами радіаційної хімії.

Електротехнічне обладнання є специфічним об'єктом кваліфікації, тому що характеризується наявністю у своєму складі різноманітних органічних матеріалів та металів. Для прийняття коректних експертних висновків кваліфікації обладнання цієї групи необхідно отримати результати доповнювати результатами радіаційних матеріалознавчих досліджень. Такі дослідження можуть виконуватися як складова кваліфікації одночасно і на атомному реакторі ІЯД. Супутні процеси опромінення формують низку радіаційно-хімічних реакцій з утворенням активних сполук [16]. Такі сполуки здатні прискорювати окислення металів і деструкцію органіки. До переліку таких супутніх сполук при опроміненні обладнання в присутності повітря з вмістом води (пари) належать продукти іонізації молекул води, що утворюються за участі іонізованих молекул і атомів кисню. Імовірно й більш складні сполуки від радіолізу повітря з вмістом кислотних чи лужних випаровувань.

2. Невиправдано ігнорувати положення радіаційної хімії щодо утворення в атмосфері гермозони низки активних радикалів (з водню, кисню, азоту), які входять до переліку активних хімічних сполук та речовин. Навіть при опроміненні на повітрі без сторонніх включень будуть виникати численні продукти іонізації (радіолізу) повітря. Їх кілька груп. Основні з них – легкі іони (H , H_2), іони кисню (O_2) та його похідні (O_3), окис-

ли азоту (NO_2 , NO), а також вільні електрони та іонізовані молекули, що формують електричні поля навколо опромінюваного обладнання. З огляду на це, необхідно дослідити і врахувати вплив продуктів радіолізу борної кислоти, гідрозину та їхніх похідних.

3. Викликають сумніви ігнорування ефектів від іонізованої атмосфери, що здатні різко погіршити параметри ізоляційних вузлів і зменшити ресурс надійної роботи електротехнічного обладнання.

5. Розробки та експерименти

Імітатор в ІЯД створюється на тій самій ядерно-фізичній техніці – радіаційній установці з прискорювачем електронів до енергії 4 MeV. Електрони мають технологічні переваги, тому що їхня енергія може контролювано конвертуватися в інші види радіації з метою імітації чистих і змішаних радіаційних полів.

Поточне завдання досліджень та розробок імітатора – створення на установці технічних можливостей проведення «радіаційних» функціональних випробувань обладнання АЕС. Основними проблемами тут є розробка технічних засобів для формування радіаційного поля гамма-випромінювання, суперпозиції радіаційного поля гамма-і бета-випромінювання та визначення необхідності й можливостей отримання нейтронних полів.

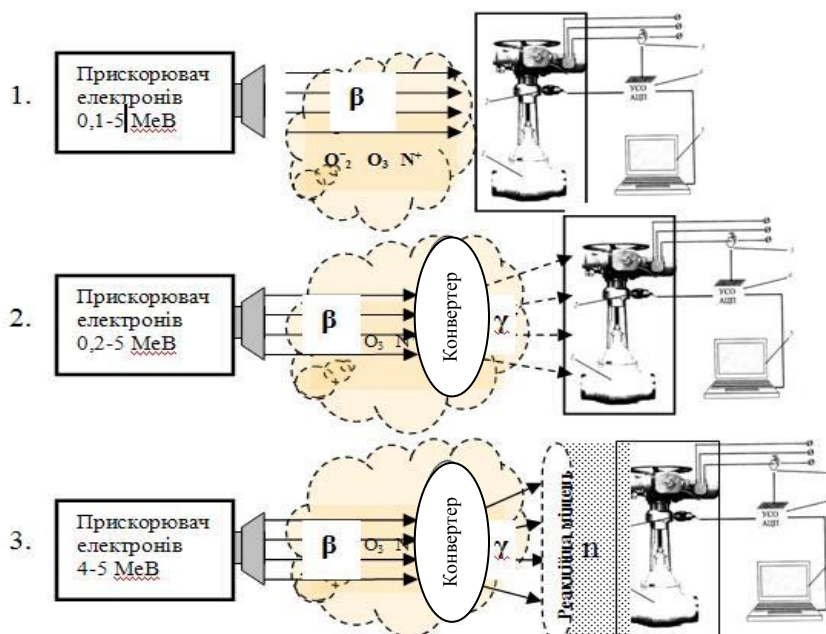


Рис. 1. Схеми імітації різних складових радіаційних полів у гермозонах.

Було проаналізовано доступні методики конверсії енергії електронних пучків у різні види іонізуючих випромінювань та супутні продукти радіолізу зовнішнього середовища (рис. 1). Структура графіки базується на основі поперед-

ніх публікації за темами випробування обладнання для АЕС [15] для ілюстрації взаємозв'язку комбінованої технології кваліфікації ІЯД з попереднім (найбільш досконалим) методом.

На схемі 1 наведено структуру технічного комплексу для функціональних кваліфікаційних випробувань бета-випромінюванням (електронами). В основі цього методу – пряме опромінення об'єктів потоками електронів різних енергій.

Схема 2 ілюструє технологію опромінення об'єктів гальмівним електромагнітним випромінюванням пікометрового діапазону (гамма-випромінювання). Гамма-випромінювання виникає при гальмуванні електронів на важкій мішені (конвертері). Нижня межа енергій електронів визначається лише ефективністю передачі енергії їх у гамма-кванти. На практиці з економічної точки зору не вигідно конвертувати електрони з енергією нижче 0,5 MeV.

Схема 3 відображає технологію опромінення нейтронами, які виникають у результаті збудження фотоядерних реакцій (γ, n) на мішенях з відповідного матеріалу. Формування потоків нейтронів потрібної енергії в такій схемі легко забезпечується парафіновими фільтрами-сповільнювачами.

Важливою перевагою такої структури імітатора є можливість генерації випромінювань і супутніх процесів радіолізу зовнішнього середовища – іонізованої атмосфери, вологи та інших складових іонізації атмосфери (аероіонів). Суперпозиції

радіаційних полів різного складу досягаються відповідним вибором типу й конфігурації гальмівних мішеней. Схему 3 передбачено лише як перспективу при умові фінансування комплексної модернізації системи радіаційного захисту комбінованими багат шаровими поглинаючими структурами. Опромінення нейтронами різко обмежує можливості продовження на цій установці розробки промислових радіаційних технологій через активацію внутрішнього обладнання.

З цих міркувань на перших етапах передбачається експлуатувати імітатор лише для функціональних випробувань електротехнічного обладнання і виробів в умовах дії гамма- і бета-випромінювань та їхніх суперпозицій. Для технічної реалізації таких режимів розроблено конструкції конвертерів енергії електронів у гамма-кванти двох типів – на повне поглинання та напівпрозоре поглинання близько 50 %.

Конвертер з повним поглинанням енергії електронів зображено на рис. 2. Основним елементом конвертера є гальмівна мішень з вольфраму. У нашому випадку проблемою є велика потужність пучка електронів – до 5 кВт. Основна частина енергій електронів переходить у тепло і призводить до нагрівання конвертера.

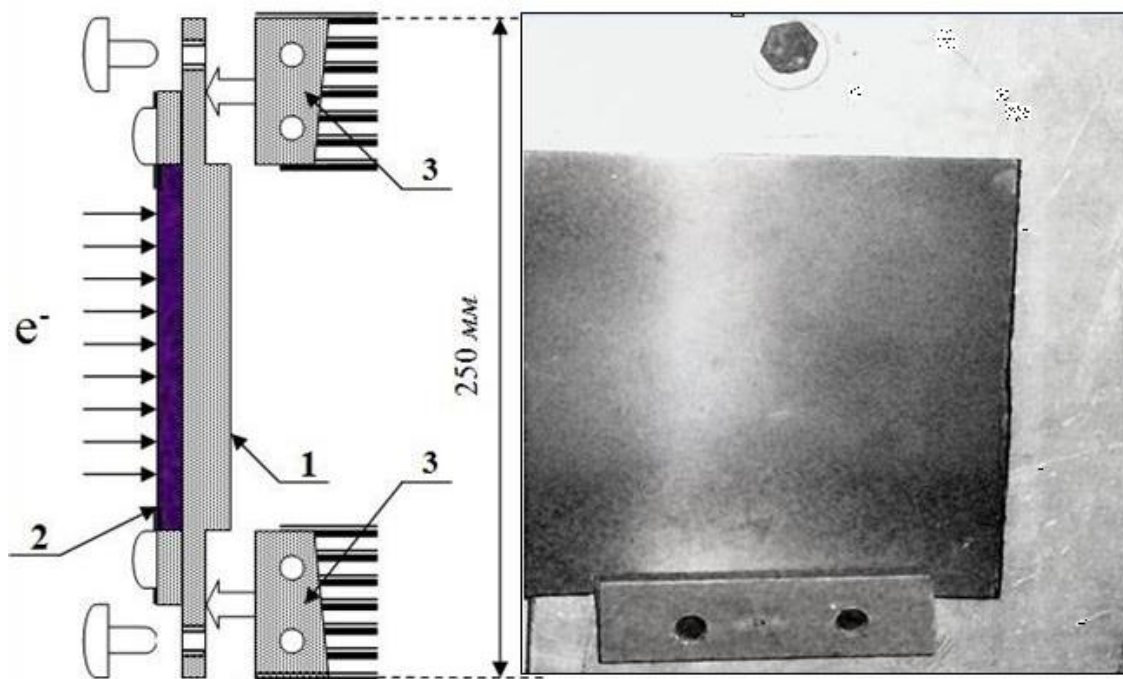


Рис. 2. Схема вузла з мішенню повного поглинання: 1 – несуча пластина; 2 – гальмівна мішень; 3 – охолоджувач. На фото конструкція конвертера з боку пучка.

Конструкція конвертера складається з гальмівної мішені (2), яку закріплено на несучій пластині (1) з алюмінію. Тепло, що виділяється на гальмівній мішені, відводиться за допомогою пластинчастих алюмінієвих радіаторів (3), які

закріплюються на вільному неробочому просторі несучої пластини таким чином, щоб мінімально поглинати гамма-кванти, що генеруються на гальмівній мішені. Повітряне охолодження здатне достатньо ефективно відводити тепло лише до

потужності пучка не вище 2 кВт навіть з примусовим обдуванням. Для конвертації енергії пучка потужністю більше 2 кВт планується підключати додатковий контур охолодження водою. З цією метою в тілі радіаторів передбачено відповідні наскрізні отвори. Попередня оцінка показує, що з конвективним повітряним охолодженням і при

площі ребер радіатора не менше 300 см^2 кожен 1 кВт поглинутого пучка може піднімати температуру конвертера на $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Очікується, що додаткове інтенсивне обдування (вентилятором охолодження випускного вікна прискорювача) надасть можливість знизити температуру конвертера на $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

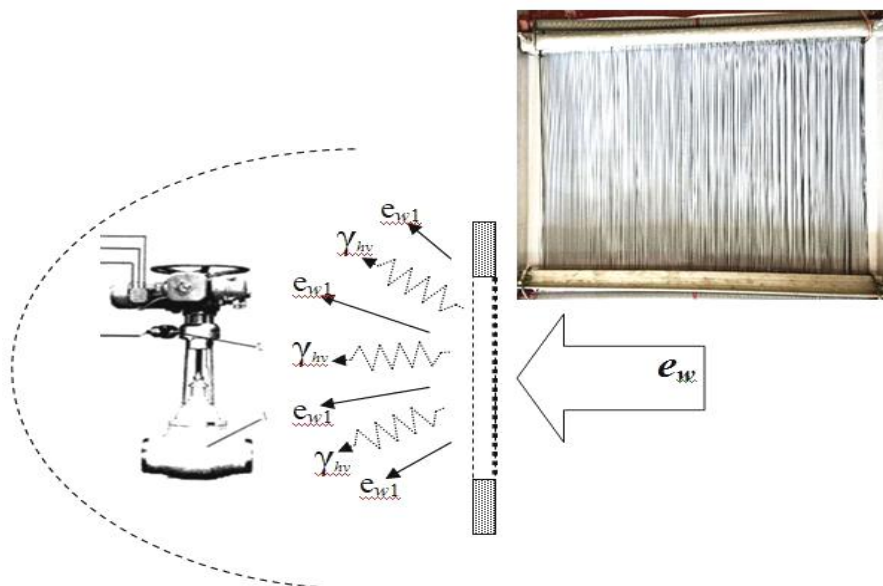


Рис. 3. Схема імітації змішаних радіаційних полів напівпрозорою гальмівною мішенню. На фото конструкція півпрозорої гальмівної мішені.

Випробування напівпрозорого конвертера (рис. 3) здійснювались при різній інтенсивності і співвідношеннях бета- і гамма-компоненти в діапазоні імпульсного струму первинних електронів до $0,4 \text{ A}$ з енергією 4 MeV . Вони показали, що в межах струму пучка електронів від 0 до $0,22 \text{ A}$ та його конверсії на вольфрамовій мішені з коефіцієнтом перекриття $0,5$ формується змішане поле потужністю $4,5 \text{ кГр/год}$ (нормативний рівень кваліфікації обладнання АЕС). Характер розподілу радіаційного поля гама-випромінювання в такому режимі суттєво відрізняється від розподілу первинного електронного пучка [17].

За рахунок різної іонізуючої здатності цих видів випромінювання їхнє поглинання в матеріалі радіаційного захисту суттєво відрізняється, як і розподіл фонового радіаційного поля поза межами реакційної камери. Існуючий радіаційний захист проектувався для поглинання енергії прямого і розсіяного пучка електронів при його взаємодії з опромінюваним матеріалом (для традиційних промислових радіаційних технологій не важче заліза!) та взаємодії розсіяних електронів з металевими конструкціями в боксі прискорювача. При опроміненні електротехнічного обладнання доводиться враховувати, що в його складі можуть міститися самі різноманітні матеріали, у тому числі й важкі – срібло, золото, паладій, пла-

тина, платинородій, вольфрам, свинець тощо. При радіаційній обробці генеруються додаткові потоки гальмівних випромінювань. Тому, як на наш погляд, кваліфікація обладнання лише силами фахівців ядерної енергетики не є коректна. Кваліфікація повинна виконуватися розробниками або за участі їх, бо лише вони володіють вичерпною інформацією про наявність важких матеріалів у складі піддослідного обладнання. Ефективність такого підходу була доведена в ІЯД при кваліфікації сигнального термостійкого кабелю. Були залучені галузеві фахівці ПВО ВЕДА та ІХВМС НАН України [18], розробники цього унікального виробу. Це дало можливість у короткі строки довести параметри кабелю до проектних вимог.

6. Проблеми та завдання

В експериментах було помічено суттєве зростання потужності радіаційних полів у боксі прискорювача та критичний режим роботи радіаційного захисту від зворотно-розсіяного гамма-випромінювання. З цих міркувань зрозуміла першочергова необхідність вирішувати проблему вдосконалення засобів радіаційного захисту технологічного приміщення прискорювача. Вона складається з двох задач – вимірювання динамі-

ки радіаційних полів у технологічних приміщеннях установки та на прилеглий території в режимі формування в реакційній камері чистих та змішаних радіаційних полів, а потім проектування (при необхідності) засобів радіаційного захисту. Усі вимірювання необхідно проводити при розташуванні в камері еквівалентів (конструктивних) обладнання з гермозон реакторів.

Отримані результати досліджень топографії

та напрямку поширення пелюстків гальмівного і розсіяного випромінювання є основною для розробки додаткових засобів радіаційного захисту. Досвід таких робіт в ІЯД вже нагромаджено. Для даного випадку можна скористатися розробленою в ІЯД методикою корекції розподілу радіаційних полів за допомогою системи розсіюючих і відбиваючих екранів поблизу від джерел вторинного небажаного випромінювання [19].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Radiation Processing: Environmental Applications* (Vienna, IAEA, 2007) 71 p.
2. *Equipment Qualification in Operational Nuclear Power Plants: Upgrading, Preserving and Reviewing. Safety Reports Series No. 3.*
3. СТП 0.03.050-2009. Стандарт підприємства. Кваліфікація обладнання та технічних пристроїв АЕС. Общие требования. НАЭК 18.02.2009 № 136-Н.
4. СТП 0.03.083-2009. Кваліфікація обладнання на условия окружающей среды. Общие требования. НАЭЫК 23.06.2009. № 546.
5. ПМ-Д.0.03.476-09. Программа работ по квалификации оборудования энергоблоков АЭС ГП НАЭК «Энергоатом».
6. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій.
7. Энергетична стратегія України на період до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071. 166 с.
8. О.М. Ковалевич, В.Г. Веземський. Безопасность АЭС и прочность элементов оборудования при продлении срока эксплуатации блоков первого поколения. *Атомная энергия* 90(2) (2001) 90.
9. А.І. Бережний, О.Є. Севбо, І.О. Семенюк. Розробка вимог до використання імовірнісних методів для оптимізації технічного обслуговування та ремонтів обладнання. *Ядерна та радіаційна безпека* 12(3) (2009) 40.
10. И.Н. Вишневский и др. Радиационная установка с ускорителем электронов ИЯИ НАН Украины. *Атомная энергия* 94(2) (2003) 163.
11. І.М. Вишневський та ін. Спеціалізований стенд для функціональних випробувань кабельних виробів АЕС. *Ядерна фізика та енергетика* 1(19) (2007) 140.
12. В.І. Сахно, С.П. Томчай, О.В. Сахно. Дослідження радіаційно-стимульованих факторів деградації обладнання АЕС. *36. наук. праць ІЯД* 1(3) (2001) 102.
13. В.І.Сахно та ін. Проблеми радіаційних випробувань кабелів АЕС на установці ІЯД. *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение* 6 (2007) 128.
14. ПР-Т.0.03.115-02. Предварительный перечень оборудования и элементов АЭС Украины, подлежащих квалификации (для проекта ВВЭР-1000/В-320) (К.: НАЭК «Энергоатом», 2002).
15. О.В. Сахно. Дослідження і розробка методів та технічних засобів радіаційних випробувань обладнання АЕС на електрофізичних установках. Автореф. дис. ... канд. техн. наук (К.: Ін-т ядерних дослідж., 2008) 21 с.
16. І.М. Вишневський та ін. *Радіаційні та ядерні технології в ІЯД НАН України* (К.: Ін-т ядерних дослідж., 2014) 175 с.
17. І.А. Остапенко та ін. Дослідження параметрів поля радіаційної установки ІЯД НАН України з метою проведення кваліфікаційних випробувань. У кн.: *Тези доп. XXI щоріч. наук. конф. Ін-ту ядерних дослідж. НАН України, Київ, Україна, 27 - 31 січня 2014 р.* (К.: Ін-т ядерних дослідж., 2014) с. 108.
18. Т.В. Ковалінська. Дослідження та модернізація радіаційної установки ІЯД для функціональних випробувань обладнання та нових матеріалів АЕС. Автореф. дис. ... канд. техн. наук (К.: Ін-т ядер. дослідж., 2011) 18 с.
19. В.І. Сахно. Проблеми оптимізації протирадіаційного захисту промислових радіаційних технологічних установок. У кн.: *XVI Міжнар. конф. по фізиці радіаційних явищ та радіаційному матеріалознавстві, Алушта, Крим, 6 - 11 вересня, 2004.* с. 286.

И. А. Хомич, Т. В. Ковалинская*, В. И. Сахно, Ю. В. Иванов

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

*Ответственный автор: sungel@i.ua

**ПРОБЛЕМЫ И СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ
ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ И КВАЛИФИКАЦИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

Анализируется современное состояние экспериментальной радиационной установки ИЯИ НАН Украины на последнем этапе адаптации ее к осуществлению комплексных функциональных испытаний электромеханиче-

ского и электротехнического оборудования из перечня критического и важного для надежной эксплуатации ядерных объектов на устойчивость к эксплуатационным условиям ядерных энергетических установок. Задачей этого этапа является имитация в реакционной камере установки радиационных эксплуатационных условий работы оборудования в гермозоне энергетических реакторов. Рассматриваются разработки технических средств для формирования в реакционной камере установки нормативных значений чистых и смешанных радиационных полей. Обсуждаются результаты заключительного («радиационного») этапа создания в ИЯИ НАН Украины исследовательского комплекса (имитатора) для решения актуальных проблем повышения надежности в атомной энергетике.

Ключевые слова: ядерная энергетика, надежность, квалификация оборудования, функциональные испытания, радиационные поля, имитаторы.

I. A. Khomych, T. V. Kovalinska*, V. I. Sakhno, Yu. V. Ivanov

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: sungel@i.ua

PROBLEMS AND MEANS OF FORMATION OF RADIATION FIELDS FOR FUNCTIONAL TESTS AND QUALIFICATIONS OF THE NPP ELECTRICAL EQUIPMENT

The current state of the experimental radiation installation of the INR of NAS of Ukraine at the last stage of its adaptation to the implementation of complex functional tests of electromechanical and electrical equipment from the list of critical and important for reliable operation of nuclear facilities for resistance to operating conditions of nuclear power plants is analyzed. The task of this stage is to imitate the radiation operating conditions of equipment operation in the pressure zone of the energy reactors in the reaction chamber of the installation. The development of technical means for the formation in the reaction chamber of installation of standard values of pure and mixed radiation fields is considered. This paper discloses the results of the final (“radiation”) phase of the creation of a research complex (simulator) at the INR to solve the current problems of increasing reliability in the nuclear power industry.

Keywords: nuclear energy, reliability, equipment qualification, functional tests, radiation fields, simulators.

REFERENCES

1. [Radiation Processing: Environmental Applications](#) (Vienna, IAEA, 2007) 71 p.
2. [Equipment Qualification in Operational Nuclear Power Plants: Upgrading, Preserving and Reviewing. Safety Reports Series No. 3.](#)
3. СТII 0.03.050-2009. (Enterprise standard). Qualification of equipment and technical devices of nuclear power plants. General requirements. National Nuclear Power Generation Company 02.18.2009. No. 136-H. (Rus)
4. СТII 0.03.083-2009. (Enterprise standard). Qualification of equipment for environmental conditions. General requirements. National Nuclear Power Generation Company 23.06.2009. No. 546. (Rus)
5. ПМ-Д.0.03.476-09. (Professional module). The work program for the qualification of equipment of Nuclear Power Plants units of the state enterprise National Nuclear Power Generation Company “Energoatom”. (Rus)
6. НП 306.2.141-2008. (Norms and Rules). General safety provisions of nuclear power plants. (Ukr)
7. Ukraine’s energy strategy for the period until 2030. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 10.07.2013 No. 1071. 166 p. (Ukr)
8. O.M. Kovalevich, V.G. Verezemskiy. Safety of Nuclear Power Plants and the strength of equipment elements during the extension of the life of first-generation units. [Atomic Energy 90\(2\) \(2001\) 103.](#) (Rus)
9. A.I. Berezhnyy, O.Ye. Sevbo, I.O. Semenyuk. Developing requirements for using probabilistic methods to optimize equipment maintenance and repair. [Yaderna ta Radiatsiyina Bezpeka 12\(3\) \(2009\) 40.](#) (Ukr)
10. I.N. Vishnevskii et al. Radiation Setup with an Electron Accelerator at the Institute of Nuclear Physics of the Ukrainian National Academy of Sciences. [Atomic Energy 94\(2\) \(2003\) 124.](#)(Rus)
11. I.M. Vyshnevskiy et al. Specialized stands for functional testing of NPP cables products. [Yaderna Fyzyka ta Energetyka \(Nucl. Phys. At. Energy\) 1\(19\) \(2007\) 140.](#) (Ukr)
12. V.I. Sakhno, S.P. Tomchay. Investigations of airions processes and development of technological facilities. [Zbirnyk Naukovykh Prats IYAD 1\(3\) \(2001\) 122.](#) (Ukr)
13. V.I. Sakhno et al. Problems of Radiation Testing of NPP Cables at the IAF Installation. [Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Ser.: Fizika Radiatsionnykh Povrezhdeniy i Radiatsionnoye Materialovedeniye 6 \(2007\) 128.](#) (Ukr)

14. ПП-Т.0.03.115-02. Preliminary list of equipment and elements of Ukrainian NPPS subject to qualification (for the VVER-1000/V-320 Project) (Kyiv: National Nuclear Power Generation Company "Energoatom", 2002). (Rus)
15. O.V. Sakhno. Research and development of methods and equipment for radiation testing of NPP equipment at electrophysical installations. The Abstract of the Thesis of the Candidate of Sciences in Technics (Kyiv: Institute for Nuclear Research, 2008) 21 p. (Ukr)
16. I.M. Vyshnevsky et al. *Radiation and Nuclear Technologies at the Institute for Nuclear Research of the NAS of Ukraine* (Kyiv: Institute for Nuclear Research, 2014) 175 p. (Ukr)
17. T.V. Kovalinska et al. Investigation of the radiation field parameters of the facility of the Institute for Nuclear Research of the NAS of Ukraine for the purpose of conducting qualification tests. In: *Abstracts of the XXI Annual Sci. Conf. of the Institute for Nuclear Research of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, January 27 - 31, 2014* (Kyiv: Institute for Nuclear Research, 2014) p. 108. (Ukr)
18. T.V. Kovalinska. Research and modernization of the INR radiation facility for the functional testing of the equipment and new NPP materials. The Abstract of the Thesis of the Candidate of Sciences in Technics (Kyiv: Institute for Nuclear Research, 2011) 18 p. (Ukr)
19. V.I. Sakhno. Problems of optimization of radiation protection of industrial radiation technological facilities. In: *XVI Intern. Conf. in Physics of Radiation Phenomena and Radiation Material Science, Alush-ta, Crimea, September 6 - 11, 2004*. p. 286. (Ukr)

Надійшла 09.07.2019

Received 09.07.2019