

У ЗОНІ ПІДВИЩЕНОЇ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ

Алгоритм забезпечення надійності атомних електростанцій

Атомна енергетика одночасно належить і до пріоритетних галузей економіки, оскільки вітчизняні АЕС генерують близько 45% загального обсягу виробленої електроенергії в країні, і до найпроблемніших секторів промислового комплексу, тому що терміни експлуатації її 13 енергоблоків здебільшого добігають кінця. Загалом стан атомних реакторів сьогодні не відповідає сучасним стандартам безпеки, а поводження з радіоактивними відходами – екологічним нормам. Нагальними проблемами України були і залишаються виведення з експлуатації реакторів, що відпрацювали свій термін, перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, концентрація ресурсів, необхідних для розвитку атомної енергетики та її інфраструктури. Усі ці та багато інших завдань окреслюють сферу діяльності Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України.

Система науково-технічної та інженерної підтримки високотехнологічної атомної галузі СРСР функціонувала, спираючись на мережу потужних наукових центрів, які були зосереджені переважно на території Російської Федерації. Становлення України як незалежної держави, що володіє потужним потенціалом атомної енергетики, вимагає створення і розвитку власної національної системи науково-технічного, проектного та інженерного супроводу заходів, спрямованих на модернізацію і розвиток цієї важливої галузі.

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій (ІПБ АЕС) було створено Постановою Президії НАН України від 16.02.04 № 44 на основі реорганізації Міжгалузевого науково-технічного центру (МНТЦ) «Укриття» з метою подальшого розвитку фундаментальних і прикладних досліджень у сфері безпеки АЕС, їх належної організації та координації. Напрямами діяльності цієї науково-дослідної установи Президія НАН України визначила:

- напрацювання заходів для підвищення рівня безпеки та ефективності експлуатації АЕС;
- технології утилізації радіоактивних відходів;
- розроблення і впровадження технологій виведення з експлуатації енергоблоків АЕС;
- дослідження об'єкта «Укриття» та науковий супровід робіт із перетворення його на екологічно безпечну систему;
- дослідження властивостей речовин та прогнозування стану матеріалів, що містять ядерне паливо;
- розв'язання технологічних, медико-біологічних і радіоекологічних проблем, пов'язаних із перетворенням об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему;
- проектування об'єктів та обладнання для поводження з радіоактивними відходами, у тому числі сховищ для їх захоронення;
- транспортування ядерних матеріалів та радіоактивних речовин.

Відповідно до поставлених завдань фахівці інституту зосередили свої досліджен-

ня у двох напрямках: роботи з безпечної експлуатації атомних електростанцій; розв'язання проблем об'єкта «Укриття» та виведення ЧАЕС із експлуатації.

АКУСТИЧНА ДІАГНОСТИКА

Одним із фундаментальних завдань атомної енергетики є контроль діагностики обладнання ядерно-енергетичних установок (ЯЕУ). Системи реакторної діагностики підвищують не лише безпеку експлуатації ЯЕУ, своєчасно виявляючи і прогнозуючи вихід із ладу устаткування, але й економічність використання ядерного палива і роботи АЕС загалом.

Нині значного поширення у світі набули системи реакторної діагностики, основані на аналізі реакторних шумів. Багато країн проводить інтенсивні дослідження з розвитку систем нейтронно-шумової діагностики, а в Україні такі системи майже не використовують. Саме цим зумовлена потреба розроблення методів математичного аналізу і технічних засобів та їх адаптації до умов українських АЕС.

У відділенні атомної енергетики розробляють методичні засади ідентифікації стану та діагностики ЯЕУ із застосуванням методів акустичної діагностики для моніторингу найбільш важливих характеристик реактора, як-от: вібростан внутрішньокорпусних устроїв, виявлення сторонніх предметів у контурі теплоносія, ідентифікація протікань тощо.

У відділі фізики ядерних реакторів досліджують підкритичні ядерні реактори, керовані зовнішнім джерелом нейтронів; вимірюють величину підкритичності скупчень паливовмісних матеріалів (ПВМ) у середині об'єкта «Укриття» та у сховищах відпрацьованого ядерного палива (ВЯП). Розроблено методику застосування нейтронних шумів для визначення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів.

Фахівці відділу системного управління безпекою АЕС розробили й експлуатують аналоговий і цифровий реактиметри, впро-

вадили прикладне програмне забезпечення для розрахунків потужності, періоду і реактивності, отримали низку важливих результатів, запропонувавши, зокрема, новий експериментальний метод і виготовивши нове електронне обладнання для визначення флуктуацій нейтронного потоку.

Отримано результати, згідно з якими підкритична система з розчину урану-235 у воді дає змогу одержати ще кращі показники за коефіцієнтами підсилення потоку нейтронів, порівняно з аналогічними параметрами системи, яка складається з металевого урану.

Для контролю трубопроводів АЕС запропоновано «спосіб вимірювання величини малої протічки» (патент України на винахід), який ґрунтується на вимірюванні концентрації важких аероіонів радіолітичного походження в герметичних приміщеннях ядерного реактора. Як свідчать результати стендових досліджень, цей спосіб перевищить чутливість штатного способу вимірювання протікань із першого контуру реактора ВВЕР-1000 у 8–10 разів.

ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ УСТАТКУВАННЯ АЕС

Аналіз інцидентів на українських АЕС свідчить, що значна їх частка (від 20 до 40%) спричинена недостатньою надійністю електротехнічного устаткування. Це зумовило необхідність проведення досліджень із вивчення ролі й місця основного енергетичного та електротехнічного обладнання в комплексі заходів безпеки енергоблоків АЕС, а також розроблення, обґрунтування і впровадження системного підходу до забезпечення надійної і ефективної експлуатації АЕС.

Важливими результатами наукової діяльності в цьому напрямі є:

— установлення факту роботи основного електротехнічного устаткування енергоблоків українських АЕС у режимах регулювання реактивної потужності. Так, турбогенератори, що мають номінальний коефіцієнт

потужності 0,9, працюють зазвичай при підвищених його значеннях (0,93–0,98). Це зумовлює збільшення втрат у кінцевих зонах сердечника статора, надмірну термомеханічну напругу в лобових частинах обмотки, скорочує розрахунковий ресурс машин.

Спільно з ОАО «Укргідроенерго» й ІЕД НАН України розроблено й обґрунтовано основні принципи забезпечення штатних режимів експлуатації електротехнічного устаткування енергоблоків АЕС у межах створення єдиних енергетичних комплексів «АЕС + ГЕС (ГАЕС)».

На основі теоретичних досліджень розроблено алгоритм практичної реалізації експрес-методики оцінювання технічного стану турбогенератора і його систем, який ґрунтується на цілеспрямованому (інтелектуальному) обробленні температурної інформації, що надходить від засобів штатного термоконтролю.

Учені винайшли технічний спосіб підвищення безпеки, надійності та ефективності роботи енергоблока АЕС, розширивши його діапазон регулювання реактивної потужності. Суть цього способу в тому, що в одному з ланцюгів енергоблока встановлюють асинхронізований турбогенератор, а в іншому – синхронний. Винахід запатентовано як корисну модель.

Розроблено математичні моделі теплового стану основних елементів і вузлів статора турбогенератора, алгоритм і програмний комплекс практичної реалізації методики експрес-оцінювання технічного стану турбогенератора та його систем, що ґрунтується на цілеспрямованому (інтелектуальному) обробленні інформації, яка надходить від засобів штатної системи термоконтролю. Важливою особливістю пропонованої методики і програмного комплексу є те, що стан машини визначають без проведення спеціального діагностичного експерименту, тобто не втручаючись у диспетчерський графік навантаження турбогенератора, а на основі природної зміни навантаження в процесі експлуатації (зміна активного і ре-

активного навантаження протягом доби або тижня). Комплекс успішно випробувано в лабораторних умовах із використанням експериментальних даних теплових досліджень турбогенератора ТВВ-1000-2УЗ Рівненської АЕС.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження, підготовано пропозиції із застосування методу інфрачервоної діагностики для контролю стану елементів і вузлів основного електротехнічного устаткування, зокрема, під час передремонтного обстеження стану сердечника статора турбогенератора з метою виявлення місцевих дефектів сталі пакетів. Ця запатентована методика дає можливість підвищити ефективність передремонтного обстеження сердечника статора, скорочує терміни і підвищує якість проведення ремонтних робіт. Пропонований спосіб верифіковано на випробувальному стенді ДП «Завод «Електротяжмаш» із використанням початкової експериментальної інформації реального турбогенератора.

МЕТОДИКИ ПРЕВЕНТИВНИХ КОНТРЗАХОДІВ

Гарантування безпеки персоналу ядерно-радіаційних об'єктів, населення і довкілля посідає одне з головних місць у проблемі безпеки АЕС. Атомні електростанції, які працюють, майже не забруднюють довкілля радіоактивними речовинами. Проте можливі їх викиди в навколишнє середовище в разі недотримання нормального режиму експлуатації АЕС. Отже, одним із основних завдань є надійний контроль довкілля.

Ефективність протиаварійного реагування визначають насамперед готовністю відповідних підрозділів до здійснення негайних або превентивних контрзаходів. Плани реагування на території впливу аварії прогнозують рівень радіаційного стану. З огляду на це сьогодні фахівці розробляють математичні моделі радіаційного прогнозування в разі аварії на АЕС,

методи моніторингу радіоактивного аерозолю, аналітично-інформаційну систему оцінення радіаційного стану територій на базі ГІС-технологій.

Учені інституту розробили Лагранжево-Ейлерову мезомасштабну модель поширення радіоактивних домішок в атмосфері та їх осадження на підстильну поверхню, яка враховує нестационарність і просторову неоднорідність умов поширення радіоактивності. За її допомогою проведено реконструкцію динаміки формування полів концентрації радіоактивних матеріалів у повітрі та ґрунті в початковий період аварії на ЧАЕС для територій України і Білорусі. Результати розрахунків радіоактивного забруднення повітря, ґрунту й території України йодом-131, отримані методами моделювання атмосферного перенесення, використано для реконструкції доз опромінення щитовидної залози населення України.

На основі результатів моніторингу за допомогою фільтр-вентиляційних установок і багатокаскадних імпакторів стихійних викидів із об'єкта «Укриття» й поширення радіоактивного аерозолю навколо нього отримано функції розподілу активності за розмірами часток і швидкості вилуговування ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ і ^{241}Am , що дало змогу оцінити величину інгаляційних доз біля отворів, у локальній зоні ОУ і на проммай-данчику ЧАЕС.

З метою оперативного прогнозування радіаційного стану, аналізу просторового та часового розподілу факторів радіаційного впливу й оптимізації реабілітаційних контрзаходів створюють аналітично-інформаційну систему на базі ГІС-технологій, використовуючи комплекс фізичних та екологічних моделей.

На основі аналізу експериментальних даних, отриманих протягом 23-річного періоду після аварії на ЧАЕС, аналітично описано кінетику процесів взаємодії довгодіючих радіонуклідів ^{90}Sr і ^{137}Cs у ґрунті і потрапляння їх у рослини. Створено

модель для прогнозування концентрації радіонуклідів у сільгосппродукції, визначено всі її параметри, розроблено розрахунковий алгоритм і програму. Модель верифіковано за експериментальними даними радіаційного моніторингу агросфери України в межах міжнародного проекту «Чорнобиль».

Розроблено концепцію інформаційно-аналітичної системи управління екологічною ситуацією в зонах впливу АЕС під час її роботи в нормальних та аварійних режимах; ухвалено (НТР ДП НАЕК «ЕНЕРГО-АТОМ») рішення про створення науково-аналітичного центру розроблення і підтримки системи оперативного реагування на базі ІПБ АЕС НАН України.

ВИВЕДЕННЯ АЕС ІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

У зв'язку з відсутністю необхідного досвіду в Україні і світі, недосконалістю чинних нормативних документів потрібно розробити методичні рекомендації для виведення з експлуатації блоків АЕС, науково-технічного супроводу цього процесу. Відповідні роботи виконує відділення виведення АЕС із експлуатації, що аналізує світовий досвід, напрацьовує методичні рекомендації для комплексного інженерного і радіаційного обстеження й визначення оптимального варіанта виведення АЕС із експлуатації, оцінює фінансові витрати, формує регламент радіаційного контролю енергоблока АЕС і розробляє план захисту персоналу в разі радіаційної аварії на ньому, структуру і зміст програми поводження з радіоактивними відходами після виведення АЕС із експлуатації.

З метою координації роботи галузей вітчизняного приладобудування та науково-технічного розвитку у сфері розроблення приладів, систем і технологій реалізації заходів радіаційної безпеки на АЕС в ІПБ АЕС створено відділ радіаційного приладобудування із залученням фахівців НВП «Атомкомплексприлад», що добре відоме своїми оригінальними розробками, зокрема

спектрометричним комплексом контролю теплоносія першого контуру реактора, програмно-технічним комплексом контролю протікання парогенератора за активністю ^{16}N у гострій парі, сцинтиляційним гамма-спектрометром для паспортизації несорттованих твердих радіоактивних відходів тощо. У 2007 р. на Хмельницькій АЕС було встановлено і введено в дослідну експлуатацію програмно-технічний комплекс (Азот-16-ПГ) для визначення протікання в парогенераторах із 1-го до 2-го контуру методом реєстрації гамма-випромінювання ^{16}N у гострій парі.

СТАБІЛІЗАЦІЯ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

У 2006 р. спільним рішенням НАН України і Міністерства з надзвичайних ситуацій та в справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи України на Інститут проблем безпеки АЕС НАН України покладено функції наукового керівника програми реалізації заходів безпечної експлуатації об'єкта «Укриття» (ОУ), перетворення його на екологічно безпечну систему, виведення енергоблоків ЧАЕС із експлуатації.

У складі Міжнародного консорціуму фахівців ІПБ АЕС беруть участь у міжнародному проекті SIP реалізації невідкладних заходів щодо стабілізації об'єкта «Укриття» та підготовки до його перетворення на екологічно безпечну систему. Основні напрями науково-технічної підтримки проекту стабілізації об'єкта «Укриття»:

- дослідження радіаційних умов разом із обстеженням зон проведення робіт і шляхів доступу до них;
- вимірювання просторових характеристик гамма-випромінювання за допомогою виготовлених в ІПБ АЕС приладів;
- розроблення і впровадження проектних рішень щодо захисного екранування;
- проектування та реалізація спеціальних заходів для пилопригнічення;
- розроблення технологій поводження з радіоактивними відходами;

– аналіз потенційних аварій і розроблення запобіжних заходів.

Радіаційний захист під час роботи на ОУ забезпечували, здійснюючи спеціальні заходи, розроблені в ІПБ АЕС.

Одним із основних завдань, які необхідно розв'язати під час планування робіт у радіаційно-небезпечних умовах, є зменшення дозових навантажень на персонал. Розроблена у відділі інформаційних технологій програма розрахунку доз дає змогу оперативно визначити дозове навантаження на певному маршруті безпосередньо на основі електронної креслярської документації. Використання в цій програмі технології ObjectARX дало можливість поєднати написаний за допомогою мови програмування C++ алгоритм розрахунку дози і зрозумілий для конструкторів та інженерів інтерфейс AutoCAD.

Фактичне значення отриманої персоналом у процесі стабілізації ОУ колективної ефективної дози (КЕД) опромінення виявилось істотно меншим від проектних величин. Це свідчить про високу якість проектних рішень та успішну реалізацію організаційних і технічних заходів, які розробляли на основі проведених у попередні роки наукових досліджень.

Фахівці інституту протягом багатьох років після аварії на ЧАЕС контролюють стан ОУ та його вплив на навколишнє середовище.

Важливими результатами багаторічних досліджень властивостей ПВМ стали розроблений сценарій перебігу аварії на 4-му блоці ЧАЕС, визначення кількості і місць основних скупчень ПВМ, критмасових зон у місцях скупчень ПВМ у приміщенні 305/2 КМ31 у ділянці проламу, КМ2 у ділянці пароскидного клапана; методика високоселективного вилучення урану, плутонію, америцію і кюрію з проб ПВМ різної природи; рекомендації щодо розроблення технологій вилучення радіонуклідів із лавоподібних ПВМ із метою запобігання ядерній та радіаційній небезпеці.

Для контролю ядерної безпеки ПВМ застосовують інформаційно-вимірювальні системи «Фініш», «Сигнал», за допомогою тривимірних моделей геометрії скупчень ПВМ у приміщеннях об'єкта «Укриття» розраховують критичність, потоки нейтронів і гамма-квантів та інші характеристики ПВМ.

Для вивчення енергетичних і кутових розподілів гамма-випромінювання в робочих зонах, а також для фізичного моделювання біозахисту фахівці інституту розробили низку установок, наприклад: «Екран» — для оцінювання кутових розподілів і моделювання біозахисту; багатодетекторний пристрій — для вимірювання кутових розподілів гамма-випромінювання (кульовий детектор ШД-1); гамма-спектрометр із колімованим детектором СЕГ-04К; дозиметри-радіометри з виносними колімованими детекторами.

Розроблено методику й установку для вимірювання щільності поверхневих β -забруднень в умовах сильного гамма-фону, сортування РАВ на основі ковшового дозиметра, експрес-детектування питомої активності атмосферних аерозолів під час робіт на об'єкті «Укриття» на основі вимірювання концентрації звичайного пилу й оцінювання його активності в повітрі; проведено випробування моделі багатодетекторної установки для оперативного вимірювання кутових розподілів гамма-випромінювання на основі CdZnTe-детекторів.

За результатами останніх досліджень встановлено, що в південній зоні проплавлення фундаментної плити об'єкта «Укриття» містяться ядернонебезпечні скупчення ПВМ, які є критичною збіркою в перезволоженому стані. Підкритичність скупчення перебуває за межами аварійного значення ($K_{\text{эф}} > 0.98$), а зневоднення після побудови нового безпечного конфайнменту може призвести до виникнення самопідтримуваної ланцюгової реакції.

У відділенні ядерної і радіаційної безпеки здійснюють контроль стихійних вики-

дів із ОУ, проводять гідрогеологічний моніторинг, визначають елементний та ізотопний склад скупчень радіоактивної води в приміщеннях ОУ. Для дослідження проб із об'єкта «Укриття» застосовують сучасні методи: гамма-спектрометрію; альфа-спектрометрію з попереднім радіохімічним виділенням радіонуклідів; бетарадіометрію з попередньою радіохімічною підготовкою проб; лазерно-люмінесцентну спектрометрію; фотометрію; іонометрію, зокрема з іоноселективними електродами. Роботи виконують у сертифікованих лабораторіях 2-го і 3-го класу радіаційної небезпеки.

У складних радіаційних умовах об'єкта «Укриття» проведення широкомасштабних досліджень не завжди виправдане у зв'язку з великими дозовитратами, а в багатьох випадках неможливе через відсутність шляхів доступу. Тому значну увагу сьогодні приділяють математичному моделюванню радіаційних умов, а також біозахисту. Це, наприклад, моделювання процесу підйому радіоактивного пилу і аерозолів як під час проведення різних видів робіт в об'єкті «Укриття» і на забрудненій території, так і в разі можливих аварій; математичне моделювання спектрів гамма-випромінювання від об'єкта «Укриття» і контейнеризованих РАВ; моделювання зміни радіаційної ситуації під час земельних робіт на радіоактивно забрудненій території, процесу сортування радіоактивно забруднених ґрунтів, вимірювання характеристик контейнерів із лавоподібними ПВМ.

Консорціум «КСК», до складу якого входить інститут, у 2007 р. завершив роботи в межах міжнародного проекту «Стабілізація будівельних конструкцій об'єкта «Укриття». Реалізація проекту дала змогу зменшити ймовірність потенційних аварій, пов'язаних із руйнуванням будівельних конструкцій і, таким чином, продовжити термін безпечної експлуатації об'єкта «Укриття» до завершення будівництва конфайнменту.

УЗАГАЛЬНЕННЯ НАУКОВОГО ДОРОБКУ

Інститут проблем безпеки АЕС — піонер у сфері побудови систем управління якістю для наукових організацій. Систему управління якістю сертифіковано в Національному органі із сертифікації УкрСЕРТ на відповідність вимогам ДСТУ ISO 9001:2001 (ISO 9001-2000, IDT) та міжнародному органі із сертифікації «Bureau Veritas Quality International» на відповідність вимогам ISO 9001:2000. Це дає змогу інституту брати активну участь у міжнародних проєктах. У 2009 р. систему якості приведено у відповідність до вимог стандарту ISO 9001:2008.

Фахівці ІПБ АЕС доклали чимало зусиль для розроблення спільно з Міжнародним консорціумом (Bechtel International Systems, USA, Electricite' de France, Battelle Memorial Institute, USA) у складі КСК документа «Концептуальний проєкт (ТЕО) нового безпечного конфайнменту (НБК)», який визначає стратегію робіт із перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему

Результати своїх наукових досліджень співробітники ІПБ АЕС узагальнили в низці виданих монографій і збірників. У 2004–2009 рр. опубліковано 17 монографій, 13 збірників наукових праць, 15 препринтів. Інститут заснував книжкову серію «Безпека атомних електростанцій», у форматі якої вже побачили світ 9 монографій.

Науковці ІПБ АЕС отримали низку патентів на винахід, серед яких патенти на «Пристрій для виділення альфа-активного аерозолі техногенного походження із повітряного середовища», «Спосіб піродезактивації металевих радіоактивних відходів», «Спосіб формування захисного локалізуючого покриття», «Пристрій для експресної оцінки радіоактивних аерозолів», «Пристрій для вимірювання кутового розподілу інтенсивності гамма-випромінювання», «Спосіб вимірювання кутового розподілу інтенсивності гамма-випромінювання», «Спосіб виявлення малих протічок води», «Енергоблок атомної електростанції».

18 ліцензій, дозволів, сертифікатів якості дають інституту змогу працювати в усіх напрямках розвитку атомної енергетики. Наявність зазначеної документації підтверджує спроможність ІПБ АЕС завершити низку актуальних досліджень, передаючи свої прикладні розробки для штатної експлуатації на АЕС.

О. Ключников

У ЗОНІ ПІДВИЩЕНОЇ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ

Алгоритм забезпечення надійності атомних електростанцій

Резюме

Чорнобильська катастрофа змусила вчених України зосередити увагу на дослідженні радіаційних процесів, що відбуваються під час аварій на атомних електростанціях. Непередбачувані людством наслідки використання енергії атома підштовхнули фахівців до розроблення низки превентивних контрзаходів на випадок порушення режиму експлуатації АЕС, напрацювання методик прогнозування концентрації радіонуклідів, математичного моделювання радіаційних умов, вироблення стратегій поведінки в надзвичайних ситуаціях тощо. Активізації робіт у цих напрямках сприяло створення безпосередньо в Чорнобилі Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, діяльність якого висвітлена в статті.

Ключові слова: реакторна діагностика, радіаційний моніторинг, прогнозування концентрації радіонуклідів, регулювання реактивної потужності, превентивні контрзаходи на АЕС.

О. Ключников

IN THE AREA OF HIGH RESPONSIBILITY

(Algorithm of nuclear power plant reliability provision)

Summary

Chernobyl disaster forced Ukrainian scientists to focus their attention on the research of radiation processes that occur in the course of accidents at nuclear power plants. Consequences of nuclear energy use that can not be predicted by the mankind pushed the experts to develop a number of preventive actions in case of violation of nuclear power plant operation mode, practice the methods of radionuclide concentration forecasting, radiation conditions mathematical modeling, elaboration of the strategy of conduct under emergency situation. Intensification of the work in these trends resulted in foundation of the Institute of nuclear power plants safety problems of National Academy of sciences of Ukraine in Chernobyl. Activity of the institute is described in the article.

Keywords: reactor diagnostics, radiation monitoring, forecasting of radionuclide concentration, reactive power control, preventive actions at nuclear power plant.