

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**ІЛЬКОВИЧ ВІКТОР ВАСИЛЬОВИЧ**

УДК 621.039.5

**РОЗРОБКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ОСНОВ  
ДОДАТКОВОЇ ПРОГРАМИ КОНТРОЛЮ МЕТАЛУ КОРПУСУ ВВЕР-1000  
ЗА ДОПОМОГОЮ ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ**

05.14.14 – Теплові та ядерні енергоустановки

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті ядерних досліджень НАН України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,  
**Буканов Володимир Миколайович**,  
Інститут ядерних досліджень НАН України,  
завідувач відділу проблем дозиметрії ядерних реакторів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Маслов Олег Вікторович**,  
Одеський національний політехнічний університет,  
завідувач кафедри фізики Інституту комп'ютерних систем.

кандидат технічних наук,  
**Грінченко Геннадій Петрович**,  
державне підприємство "Національна атомна  
енергогенеруюча компанія "Енергоатом",  
начальник відділу радіаційного матеріалознавства  
відокремленого підрозділу "Науково-технічний центр".

Захист відбудеться "11" лютого 2016 року о 14<sup>15</sup> на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д26.167.01 при Інституті ядерних досліджень НАН України за  
адресою: 03680, м. Київ, просп. Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту ядерних досліджень  
НАН України, 03680, м. Київ, просп. Науки, 47.

Автореферат розісланий "6" січня 2016 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д26.167.01  
кандидат фізико-математичних наук



Хоменков В.П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Разом з наближенням строку експлуатації енергоблоку АЕС до проектного починає реалізовуватися комплекс широкомасштабних заходів із продовження його роботи у понадпроектний період із забезпеченням необхідного рівня безпеки.

У загальній проблемі продовження експлуатації енергоблоків АЕС пріоритетне значення мають питання продовження експлуатації їх критичних елементів, які з технічних причин є незамінними й невідновлюваними або їхня заміна є економічно недоцільною. Досягнення науки й техніки, багаторічний досвід експлуатації корпусних ядерних енергетичних реакторів, у тому числі реакторів ВВЕР, дозволяють обґрунтовано продовжити їх строк експлуатації на 20-30 років і більше, і це стало стійкою тенденцією передових ядерних країн. У першу чергу таким елементом кожного енергоблоку АЕС є корпус реактора (КР), технічний стан якого в результаті й визначає можливість продовження експлуатації енергоблоку в понадпроектний період.

Наразі строк експлуатації більшості енергоблоків АЕС України істотно наблизився до призначеного в проекті, і до 2025 р. для більшості нині діючих енергоблоків АЕС буде вичерпаний – за винятком енергоблоків №2 Хмельницької АЕС і №4 Рівненської АЕС (РАЕС). У зв'язку з цим технічно обґрунтоване й економічно доцільне продовження строків експлуатації енергоблоків АЕС при дотриманні вимог національних норм і правил з ядерної і радіаційної безпеки та рекомендацій МАГАТЕ ставиться до першочергових завдань і стратегії розвитку ядерної енергетики України у найближчий час.

Основою атомної енергетики України є енергоблоки з реакторами ВВЕР-1000. На цих реакторах відповідно до вимог ПНАЭ Г-7-008-89 у процесі експлуатації реалізується програма контролю властивостей металу корпусу. Це контроль властивостей металу шляхом випробувань зразків-свідків (ЗС), вивантажених з реактора після їх витримки в "реакторних" умовах. На більшості реакторів ВВЕР-1000 реалізується штатна (проектна) програма ЗС. Однією з особливостей штатної програми ЗС є те, що вона забезпечує проведення контролю властивостей металу КР тільки протягом проектного строку. Разом з тим, аналіз результатів випробувань ЗС і моніторингування радіаційного навантаження КР енергоблоків АЕС України показують можливість продовження строків експлуатації корпусів понад встановлені проектом.

Таким чином, для виконання комплексу робіт з продовження терміну служби обладнання енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 необхідні розробка й реалізація додаткової програми ЗС з метою забезпечити матеріалознавчий супровід тривалої експлуатації корпусу в понадпроектний період.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукової роботи за проектом "Розробка основних положень додаткової програми контролю технічного стану металу корпусу реактора ВВЕР-1000 за допомогою зразків-свідків" (№ державної реєстрації 0111U009145) згідно з цільовою програмою наукових досліджень НАН України "Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики й застосування радіаційних технологій у галузях економіки" і розпорядження Президії НАН України від 23.03.2012 № 203.

**Мета і задачі дослідження.** Основною метою дисертаційної роботи є створення науково-технічних основ додаткової програми ЗС для забезпечення контролю технічного стану металу корпусу ВВЕР-1000 у понадпроектний період експлуатації.

Для досягнення поставленої мети підлягали вирішенню наступні задачі:

- виконати аналіз номенклатури ЗС одноярусних контейнерних збірок (КЗ) з точки зору забезпечення контролю металу КР у понадпроектний період експлуатації;
- виконати аналіз умов опромінення одноярусних КЗ штатної програми ЗС реакторів ВВЕР-1000 з метою визначення основних шляхів їх модернізації;
- розробити схему модернізації одноярусних КЗ;
- розробити методика визначення оптимальних строків вивантаження штатних одноярусних КЗ для модернізації й модернізованих – для випробувань опромінених ЗС;
- розробити основні положення дозиметричного експерименту з визначення характеристик поля нейтронів у місцях розташування ЗС штатної програми в конкретному реакторі;
- розробити загальні положення процесу верифікації та валідації, який включає розробку спеціалізованого для валідації експерименту, призначеного для визначення значень функціоналів нейтронного потоку, що характеризують умови опромінення ЗС у реакторах ВВЕР-1000;
- розробити методика визначення орієнтації труб на вигородці реактора, призначених для розміщення штатних КЗ, відносно активної зони (АКЗ);
- виконати оцінку достовірності методики визначення орієнтації труб;
- розробити обладнання для орієнтування модернізованих і метрологічних КЗ відносно АКЗ реактора;
- виконати аналіз результатів випробувань ЗС і моніторингу радіаційного навантаження корпусів ВВЕР-1000 енергоблоків АЕС України з точки зору початку робіт з модернізації КЗ;
- розробити основні етапи модернізації одноярусних КЗ для конкретного реактора ВВЕР-1000.

*Об'єкт дослідження* – контроль технічного стану металу КР за допомогою ЗС.

*Предмет дослідження* – умови опромінення ЗС і КР ВВЕР-1000; розкид флюенсів нейтронів на ЗС опромінених модернізованих КЗ, обумовлений розробленою схемою модернізації одноярусних КЗ; терміни вивантаження штатних одноярусних КЗ для модернізації і модернізованих – для випробувань опромінених ЗС; орієнтація труб на вигородці реактора, призначених для розміщення штатних КЗ, відносно АКЗ.

*Методи дослідження.* Для досягнення поставленої мети і вирішення задач дослідження були використані наступні методи:

- математичне моделювання нейтронно-фізичних процесів, що відбуваються в ядерних реакторах ВВЕР-1000, методом Монте-Карло за допомогою програмних засобів MCSS і MCPV для визначення умов опромінення ЗС і КР;
- методи елементарної і вищої алгебри при виведенні формул для оцінки розкиду флюенсів на ЗС опромінених модернізованих КЗ, а також при розробці методики визначення оптимальних термінів вивантаження штатних одноярусних КЗ для модернізації і модернізованих – для випробувань ЗС;

- тривимірне геометричне моделювання в системі автоматизованого проектування для визначення орієнтації труб на вигородці реактора, призначених для розміщення штатних КЗ, відносно АКЗ;
- нейтронно-активаційний метод в дозиметричному експерименті з визначення характеристик поля нейтронів в місцях розташування ЗС штатної програми реакторів ВВЕР-1000.

Достовірність розрахункових результатів, отриманих за допомогою програмних засобів, забезпечена виконанням верифікації та валідації, а результатів, отриманих аналітично, – математичною коректністю тих методів, за допомогою яких вони отримані, а також безпосереднім аналізом початкових, проміжних і кінцевих даних.

**Наукова новизна отриманих результатів** загалом і в цілому полягає в тому, що *вперше* розроблено науково-технічні основи додаткової програми ЗС для забезпечення контролю технічного стану металу корпусу ВВЕР-1000 у понадпроектний період експлуатації.

У рамках вирішення цієї задачі:

- розроблено методику модернізації одноярусних КЗ штатної програми ЗС металу корпусу ВВЕР-1000, що забезпечує випереджаюче опромінення ЗС відносно внутрішньої поверхні КР і вирівнювання значень флюенсів нейтронів, накопичених зразками за весь час опромінення, для можливості підбору представницьких груп ЗС для випробувань;
- отримано формули для оцінки оптимальних термінів вивантаження штатних одноярусних КЗ для модернізації і модернізованих – для випробувань опромінених ЗС;
- розроблено дозиметричний експеримент з визначення умов опромінення ЗС, для якого запропоновано унікальну оптимальну схему установки нейтронно-активаційних детекторів (НАД) в контейнерах метрологічних КЗ, що дозволяє отримати необхідну інформацію про поле нейтронів в місцях розташування ЗС;
- розроблено методику визначення орієнтації труб на вигородці реактора, призначених для розміщення штатних КЗ, відносно АКЗ за допомогою співставлення відеозйомки цих труб телевізійною системою на перевантажувальній машині та тривимірних геометричних моделей труб і вигородки, створених в системі автоматизованого проектування;
- розроблено унікальне обладнання, що дозволяє орієнтувати модернізовані і метрологічні КЗ відносно АКЗ реактора.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблено, затверджено на Южно-Українській АЕС (ЮУАЕС) і погоджено з Держатомрегулювання України "Робочу програму модернізації однорядних опромінюваних контейнерних збірок зі зразками-свідками металу корпусу реактора енергоблоку №1 ВП ЮУАЕС".

Розроблено, затверджено на ЮУАЕС і погоджено з Держатомрегулювання України "Технічні вимоги до розробки проекту модернізації контейнерної збірки 5Л2 зі зразками-свідками металу шва корпусу реактора енергоблоку №1 ВП ЮУАЕС і виготовлення метрологічних контейнерних збірок".

У рамках реалізації першого етапу "Робочої програми модернізації однорядних опромінюваних контейнерних збірок зі зразками-свідками металу корпусу реактора енергоблоку №1 ВП ЮУАЕС" виконано модернізацію КЗ 5Л2 зі ЗС металу шва

КР і здійснено її установку в реактор.

Розпочато роботу з проведення дозиметричного експерименту на енергоблоці №1 ЮУАЕС. Для одержання експериментальної інформації про умови опромінення ЗС штатної програми в реактор встановлено три метрологічні КЗ.

**Особистий внесок здобувача.** При одержанні результатів, представлених у дисертації, здобувач брав участь у всіх етапах роботи: у постановці задач і виборі методів їх вирішення, виконанні наукових і технічних розробок, аналізі числових розрахунків і експериментальних даних, підготовці статей до опублікування.

У роботах, які написані в співавторстві, здобувачеві належать:

- розробка методики визначення орієнтації труб, призначених для установки КЗ, відносно АКЗ реактора і оцінка достовірності результатів, отриманих за допомогою цієї методики [1];
- виведення формули для максимального відносного відхилення флюенсів нейтронів на ЗС металу корпусу ВВЕР-1000 додаткової програми в першому наближенні [2];
- виведення формул для визначення термінів вивантаження штатних КЗ для модернізації і модернізованих – для випробувань ЗС [3];
- розробка схеми процесу верифікації та валідації, що включає розробку спеціалізованого для валідації експерименту, метою якого є отримання експериментальних даних в місцях розташування ЗС [4].

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи були представлені на Міжнародній конференції МАГАТЕ "3rd International Conference on NPP Life Management (PLIM) for Long Term Operations (LTO)" (14–18 травня 2012 р., м. Солт-Лейк-Сіті, США), на Міжнародних конференціях "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy" (7–12 червня 2010 р., 3–7 вересня 2012 р., м. Київ), на щорічних наукових конференціях Інституту ядерних досліджень НАН України (26–29 січня 2010 р., 25–28 січня 2011 р., 24–27 січня 2012 р., 28 січня – 1 лютого 2013 р., 26–30 січня 2015 р., м. Київ).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковані в 14 статтях, з них: основні результати опубліковані в 5 наукових фахових виданнях України, які включені в міжнародну наукометричну базу даних Scopus [1-5], у 2 роботах в електронній міжнародній реферативній базі даних МАГАТЕ INIS (The International Nuclear Information System) [6, 7], у 1 іноземному електронному науковому фаховому виданні [8]; а інші 6 – роботи апробаційного характеру [9-14].

**Структура й обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів і висновків. Робота містить 156 сторінок, 46 рисунків, 14 таблиць. При цьому 3 сторінки цілком зайняті рисунками, 4 сторінки – таблицями і 1 сторінка містить як рисунок так і таблицю. Наприкінці роботи на 14 сторінках наведено список використаних джерел із 112 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** коротко сформульовані актуальність теми, мета й задачі дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено наукову новизну отриманих результатів, наукове та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора, апробація результатів дисертації та публікації.

**Перший розділ** дисертації містить аналіз проблеми забезпечення контролю металу КР ВВЕР-1000 у понадпроектний період експлуатації за допомогою ЗС.

На початку розділу розглядаються особливості конструкційного виконання програм ЗС, що реалізуються на реакторах ВВЕР-1000, умови опромінення зразків штатних і модернізованих програм. Зокрема увага приділяється забезпеченню прискореного опромінення зразків у порівнянні з корпусом, яке дозволяє прогнозувати стан металу КР на майбутнє. Показано, що штатна програма ЗС не забезпечує матеріалознавчий супровід експлуатації корпусу в понадпроектний період.

Оптимальним шляхом вирішення задачі контролю стану металу КР у понадпроектний період є реалізація додаткової програми ЗС. Основу додаткової програми можуть скласти зразки, які на даний час опромінюються в одноярусних КЗ. Тому ці збірки було детально розглянуто.

Показано, що штатні одноярусні збірки не дозволяють отримувати дані стосовно змін властивостей металу КР через цілий ряд недоліків, а саме:

- відсутність прискореного опромінення ЗС у порівнянні з КР;
- наявність значного градієнта нейтронного потоку по периметру і висоті КЗ;
- довільна орієнтація збірки відносно АКЗ реактора;
- малоефективне дозиметричне забезпечення штатної програми ЗС та важкодоступність місць установки КЗ, які не дозволяють отримати достовірні експериментальні дані про умови опромінення зразків;
- суттєвий вплив конструкційних особливостей реакторів ВВЕР на умови опромінення ЗС (наприклад, значний технологічний допуск на висоту вигородки  $\pm 2$  см), із-за чого наявні експериментальні дані є представницькими тільки по відношенню до того реактора, на якому вони були отримані.

Оскільки розробка загальних положень додаткової програми ЗС вимагає знання умов опромінення зразків одноярусних КЗ і КР, було коротко розглянуто основні сучасні методики дозиметрії ЗС і корпусу ВВЕР-1000 з акцентом на ті, що зараз використовуються в Україні.

Методика визначення умов опромінення КР, що використовується в Україні, включає розрахунки переносу нейтронів в білякорпусному просторі реактора програмним засобом MСРV і дозиметричні вимірювання на зовнішній поверхні КР за допомогою спеціального обладнання. Дані дозиметричних вимірювань використовуються для обґрунтування достовірності результатів визначення умов опромінення корпусу. До того ж, відповідно до постанови Колегії Державного комітету ядерного регулювання України №16 від 12.09.05 було виконано процедуру верифікації та валідації цієї методики. Вона здійснювалася на основі сучасних підходів до процедури верифікації та валідації і з врахуванням вимог нормативних документів, що діють в атомно-енергетичних комплексах України й Російської Федерації. На підставі цієї роботи ДП НАЕК "Енергоатом" за узгодженням з Держатомрегулювання (лист №15-32/4462 від 07.08.09) своїм розпорядженням №124-р від 12.02.10 надав дозвіл до використання пакета програм MСРV для розрахунків функціоналів нейтронного потоку в білякорпусному просторі реакторів ВВЕР при виконанні робіт, пов'язаних з обґрунтуванням безпеки ядерних установок. Таким чином, зроблено висновок, що методика визначення умов опромінення корпусу ВВЕР-1000 достатньо надійна для її використання при розробці та реалізації додаткової програми ЗС.

Далі проаналізовано надійність визначення умов опромінення ЗС. В Україні ця робота виконується передусім за допомогою програмного засобу MCSS, який побудовано на аналогічних принципах, що і MCPV, та навіть має повністю ідентичні з ним модулі. Працездатність використовуваної методики визначення умов опромінення ЗС підтверджено у рамках міжнародного проекту TAREG2.01/00 "Перевірка впливу радіаційного окрихчування матеріалів корпусів ВВЕР-1000 і 440/213, з акцентом на їх цілісність", що виконувався українськими і російськими науководослідними організаціями за підтримки Європейської комісії. У рамках цього проекту було виконано перевірку пакету програм MCSS на найповнішому на сьогодні масиві експериментальних даних про умови опромінення ЗС в реакторі ВВЕР-1000, отриманих на енергоблоці №1 Балаковської АЕС.

У зв'язку з тим, що для розробки і реалізації додаткової програми ЗС необхідна високоточна експериментальна інформація про умови опромінення ЗС було детально проаналізовано експеримент на Балаковській АЕС. Виявилось, що цей експеримент має ряд недоліків. Крім того, як вже зазначалося вище, конструкційні особливості реакторів ВВЕР суттєво впливають на умови опромінення ЗС. Тому зроблено висновок, що необхідним етапом реалізації додаткової програми ЗС є проведення дозиметричного експерименту з метою визначення характеристик поля нейтронів у місцях розташування зразків у конкретному реакторі.

Завершує розділ постановка основних задач дисертаційної роботи, які впливають з проведеного в цьому розділі аналізу сучасного стану проблеми.

**Другий розділ** дисертації присвячено розробці загальних положень схеми модернізації одноярусних КЗ зі ЗС.

На початку розділу наведено аналіз номенклатури ЗС, що опромінюються в штатних одноярусних КЗ. Показано, що тип і кількість ЗС будь-якого одноярусного комплексу відповідає вимогам нормативних документів з точки зору коректного визначення ступеню радіаційного окрихчування матеріалів КР ВВЕР-1000.

Оскільки ЗС можуть бути використані для прогнозування стану металу КР тільки, якщо вони опромінені з випередженням в порівнянні з внутрішньою поверхнею корпусу, було виконано спільний аналіз умов опромінення КР і КЗ зі ЗС. Зокрема, показано можливість забезпечення прискореного опромінення ЗС одноярусних КЗ на штатних місцях розміщення зразків двох'ярусних збірок до флюенса нейтронів, що забезпечує можливість обґрунтувати безпеку КР у понадпроектний період експлуатації. Однак, реалізація цього вимагає кардинальної модернізації КЗ.

Прискорення опромінення ЗС одноярусних КЗ може бути досягнуте за рахунок їхнього наближення до АКЗ реактора, наприклад, шляхом їх переносу з верхнього ярусу збірки на нижній. У цьому по суті найпростішому варіанті їхній середній коефіцієнт випередження\* опромінення піднімається до  $\sim 2.5$ .

Очевидно, що при розробці додаткової програми цей перенос повинен бути виконаний таким чином, щоб мінімізувати існуючі недоліки штатної програми ЗС. Як вже зазначалося вище, один з них обумовлений великими градієнтами нейтрон-

---

\* Коефіцієнт випередження – відношення усередненої величини густини потоку (флюенса) нейтронів з енергією  $E_n > 0.5$  MeV на ЗС за весь час їх опромінення, до відповідного максимального значення в критичній зоні внутрішньої поверхні КР за період опромінення ЗС.



ного потоку в місцях розташування зразків. Він проявляється в складності підбору представницької групи ЗС для проведення випробувань (включаючи ті, що реконструюються), яка повинна складатися, як мінімум, з 12 зразків за умови, що значення накопиченого ними флюенсу нейтронів з енергією  $E_n > 0.5 \text{ MeV}$   $\Phi_{0.5}$  будуть відрізнятися від середньогрупового не більше ніж на 10%.

Таким чином, при розробці додаткової програми необхідно забезпечити вирівнювання значень  $\Phi_{0.5}$ , накопиченого зразками за весь час опромінення. Таке завдання ускладнюється ще одним недоліком штатної програми ЗС, який полягає у відсутності достовірної інформації про орієнтацію КЗ по відношенню до центральної осі реактора.

У цій ситуації при розробці додаткової програми необхідно опиратися на загальні закономірності поля нейтронів у місцях розташування ЗС. Беручи до уваги азимутальну залежність функціоналів нейтронного потоку на частини ЗС, що розташовані в одній горизонтальній площині однієї КЗ, найбільш просте рішення виниклої проблеми полягає в повороті КЗ на  $180^\circ$  навколо власної осі при переносі ЗС з верхнього ярусу на нижній так, як це показано на рис. 1.

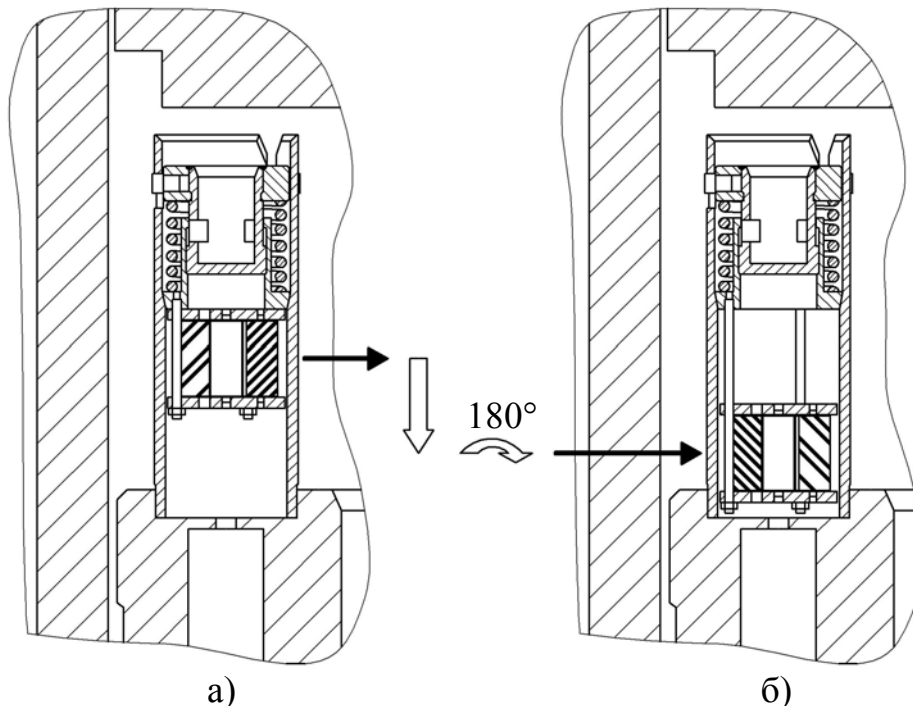


Рис. 1. Схема модернізації одноярусних КЗ: а) розміщення контейнерів зі ЗС в реакторі до модернізації; б) розміщення контейнерів зі ЗС цієї ж КЗ в реакторі після модернізації.

Запропонована схема модернізації вимагає строгого математичного обґрунтування того, що в результаті її виконання вирівнювання флюенсів буде досягнуто. Тому було виконано оцінку розкиду флюенсів на ЗС модернізованих КЗ, обумовленого схемою модернізації, яка показала:

- при ретельній реалізації схеми модернізації досягти повного збігу флюенсів на зразки в принципі неможливо, але значення максимального розкиду не перевищує 3%;

- реалістична похибка у куті орієнтації модернізованої КЗ відносно АКЗ реактора в  $10^\circ$  призводить до розкиду флюенсів, який не перевищує 3%;
- відсутність інформації про розташування ЗС через теоретично можливе повертання контейнерів може при несприятливому збігу обставин призводити до збільшення розкиду флюенсів не більше, ніж на 3%.

Таким чином, запропонована схема модернізації дозволяє практично вирівняти флюенси нейтронів, накопичені зразками однієї збірки.

У той же час, як вирівнювання флюенсів, так і коефіцієнт випередження опромінення ЗС додаткової програми в порівнянні з КР багато в чому залежать від термінів вивантаження штатних одноярусних КЗ для модернізації і модернізованих – для випробувань опромінених зразків. Тому було розроблено методику, яка дозволяє визначати оптимальні терміни цих робіт. В номерах кампаній їх можна обчислити за допомогою формул\*:

$$n_1 = \left[ \frac{\xi}{\xi + 1} \cdot (N_0 - 3) + \frac{1}{\xi + 1} \cdot \left( N - \frac{\bar{\Phi}_N^*}{\bar{\Phi}_1^*} \right) \right] + \delta_1, \quad (1)$$

$$n_2 = \left[ \frac{1}{\xi} \cdot \left( \frac{\bar{\Phi}_N^*}{\bar{\Phi}_1^*} - N + n_1 \right) \right] + n_1 + 1 + \delta_2, \quad (2)$$

де  $\xi = c_{12} \bar{\Phi}_2^* / c_{11} \bar{\Phi}_1^*$ ;  $\delta_1 = 0 \vee 1$ ;  $\delta_2 = 0 \vee 1$ ;

$n_1$  – номер кампанії, після якої слід здійснити вивантаження штатної КЗ для модернізації;

$n_2$  – номер кампанії, після якої слід здійснити вивантаження модернізованої КЗ для проведення випробувань;

$\bar{\Phi}_N^*$  – середній накопичений за  $N$  завершених кампаній флюенс на ЗС верхнього ярусу одноярусної збірки, в якій знаходиться метал критичної зони;

$\bar{\Phi}_1^*$  – прогнозований середній за кампанію флюенс на ЗС металу критичної зони, які розташовані на верхньому ярусі штатної одноярусної збірки;

$\bar{\Phi}_2^*$  – прогнозований середній за кампанію флюенс на ЗС металу критичної зони, які розташовані на нижньому ярусі модернізованої збірки;

$N_0$  – кампанія, до кінця якої флюенс, до якого обґрунтовано опромінення критичної зони КР, упевнено накопичений не буде;

$c_{11}, c_{12}$  – коефіцієнти при перших членах розкладу в ряд Фур'є азимутного розподілу нормованих флюенсів, накопичених ЗС до і після модернізації КЗ, відповідно.

Реалістична похибка в часі опромінення, в основному пов'язана з фізичною неможливістю вивантаження ЗС в середині кампанії, збільшує розкид флюенса на ЗС приблизно до 1%.

---

\* У формулах квадратні дужки означають цілу частину числа.

Як показав досвід, отриманий при дозиметрії ЗС штатної програми, умови опромінення зразків можуть істотно відрізнятись в різних реакторах ВВЕР-1000. Обумовлено це, швидше за все, конструкційними особливостями кожного конкретного реактора, які можуть вплинути на умови опромінення ЗС. Тому одним з перших етапів розробки додаткової програми ЗС для конкретного реактора має бути проведення дозиметричного експерименту, метою якого є отримання надійної інформації про умови опромінення ЗС в даному реакторі.

**Третій розділ** дисертації присвячено розробці дозиметричного експерименту, метою якого є отримання даних, що характеризують умови опромінення ЗС у конкретному реакторі ВВЕР-1000.

Оскільки результати цього експерименту будуть використовуватися, по суті, для валідації пакету програм MCSS, то відповідно до сучасних уявлень розробка цього експерименту є складовою частиною процесу верифікації та валідації. Наявні методики верифікації та валідації постійно вдосконалюються, у тому числі і ті, які використовуються у дозиметрії КР і ЗС. Тому, перш за все, на початку розділу було наведено останні результати розробки методики верифікації та валідації програмного засобу, що використовується у дозиметрії ЗС, головним з яких є нова схема цього процесу.

Нову схему процесу верифікації та валідації було запропоновано для пакету програм MCSS. В рамках цієї роботи створено унікальну методику верифікації розрахунку, яка ґрунтується на припущенні, що систематичні похибки результатів розрахунків в складних гетерогенних переважно залізо-водних композиціях мають псевдовипадковий характер.

Відповідно до нової схеми верифікації та валідації користувач програмного засобу має можливість (і в деякому розумінні навіть обов'язок) розробки і проведення спеціалізованого валідаційного експерименту, в якому мають бути максимально відтворені усі необхідні умови опромінення ЗС.

Очевидно, що в цьому експерименті в реактор необхідно встановити двох'ярусні відповідні штатним метрологічні КЗ з імітаторами ЗС та зі збільшеною кількістю НАД. Експериментальну інформацію про умови опромінення ЗС слід отримати, як мінімум, у 30°-му секторі симетрії реактора. Тому метрологічні КЗ треба встановити на позиції Л1/Л5, Л2/Л4, Л3.

Наразі тільки детектори з  $^{93}\text{Nb}$ ,  $^{54}\text{Fe}$  і  $^{63}\text{Cu}$  задовольняють вимогам, обумовленим цілями експерименту та умовами опромінення. Ефективні пороги реакцій  $^{93}\text{Nb}(n,n')^{93m}\text{Nb}$ ,  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$  та  $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$  складають приблизно 0.5, 3.0 і 7.0 МеВ відповідно. У той же час, процедура вимірювання активності зазначених реакцій тривала і дорога. Тому було розроблено оптимальну схему установки НАД, тобто визначено як кількість опромінюваних детекторів, мінімально необхідну для досягнення поставлених цілей, так і координати точок, де вони повинні розташовуватись.

Оптимальна схема установки НАД передбачає використання 3-х типів контейнерів (рис. 2): контейнери з імітаторами зразків Шарпі, в яких визначається практично вся необхідна експериментальна інформація (основні контейнери); контейнери з імітаторами зразків Шарпі зі зменшеною кількістю детекторів (неосновні контейнери); центральні контейнери з імітаторами зразків типу "Р".

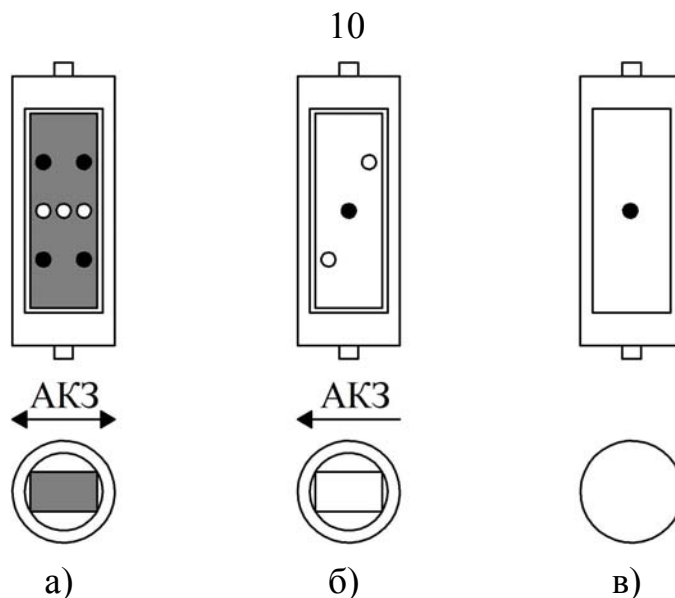


Рис. 2. Схема розміщення НАД в контейнерах: а) основний контейнер з імітатором зразків Шарпі; б) неосновний контейнер з імітатором зразків Шарпі; в) контейнер з імітатором зразків "Р" (центральный контейнер).

Значками на вертикальних "розрізах" імітаторів ЗС позначений склад НАД: ○ – тільки залізо; ● – ніобій, залізо і мідь.

Очевидно, що основні контейнери потрібно встановити в точки, в яких інформація про умови опромінення метрологічних КЗ найбільше нас цікавить, передусім, у місця максимального і мінімального значення флюенса, яким буде опромінено ці збірки. Виходячи з цих міркувань, було запропоновано загальну схему розстановки контейнерів у метрологічні КЗ, представлену на рис. 3.

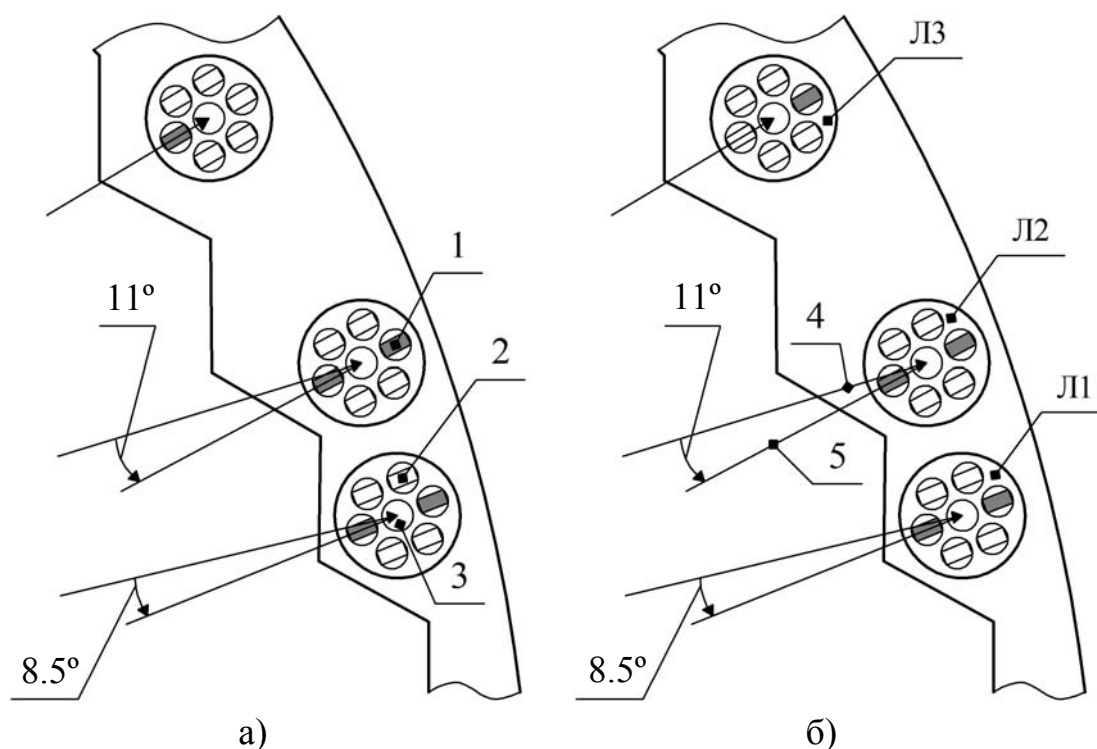


Рис. 3. Схема розстановки контейнерів у метрологічних КЗ: а) – нижній ярус метрологічних КЗ; б) – верхній ярус метрологічних КЗ.

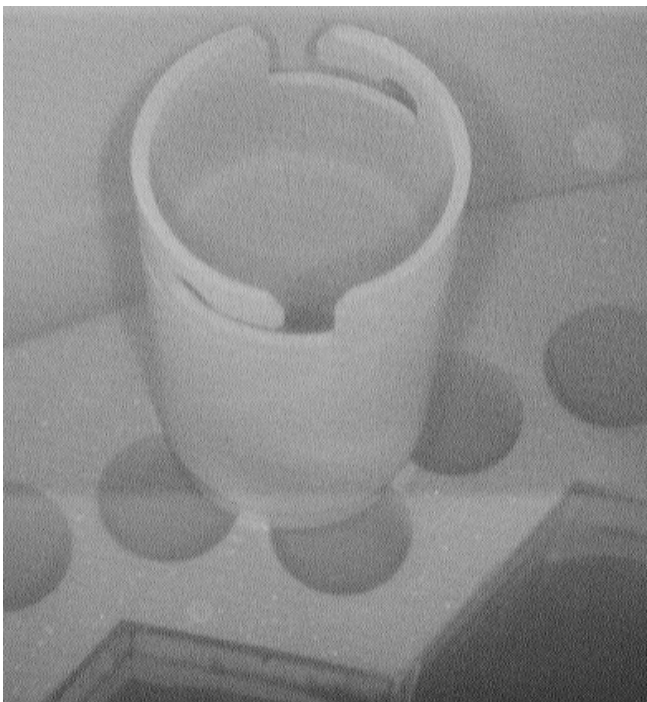
На рисунку позначено: 1 – основний контейнер; 2 – неосновний контейнер; 3 – центральный контейнер; 4 – радіус реактора; 5 – напрямок градієнта  $\Phi_{0.5}$ .

З приведеної схеми видно, що усі метрологічні КЗ зорієнтовані на градієнт нейтронного потоку. Крім того, під час модернізації КЗ передбачається їх установка в реактор під певним кутом відносно його центральної осі реактора. Тому треба знайти спосіб орієнтувати КЗ відносно АКЗ реактора.

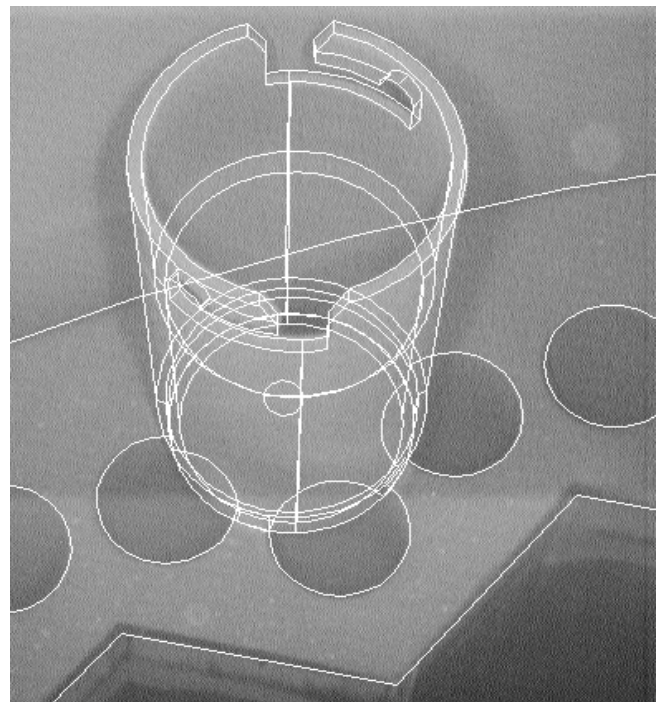
Орієнтація КЗ безпосередньо залежить від орієнтації відносно центральної осі реактора симетричних пазів у трубах, приварених до верхнього торця вигородки. Однак, у більшості випадків труби для установки КЗ зорієнтовані довільно. Це означає, що для успішного проведення дозиметричного експерименту зокрема і для вдалої реалізації додаткової програми ЗС в цілому необхідно визначити орієнтацію симетричних пазів відносно центральної осі даного реактора. Проведений нами аналіз показав, що орієнтація труб повинна бути визначена з точністю не гірше  $\pm 5^\circ$ .

Для визначення орієнтації пазів в трубах було розроблено спеціальну методику, яка дозволяє визначити значення необхідних кутів за допомогою фотозйомки цих труб. Ця методика полягає у наступному.

Спочатку за допомогою телевізійної системи на перевантажувальній машині проводиться фотозйомка труб для установки КЗ. Далі в системі автоматизованого проектування створюється тривимірна цифрова модель, яка включає елементи конструкції, які видно на отриманих фотографіях. Основними елементами для побудови тривимірної моделі є: труби з симетричними пазами для фіксації КЗ, дроселюючі шайби й частина вигородки. Модель вигородки достатньо представити лише верхнім кільцем. У цій моделі слід врахувати вузькі та широкі канали і вертикальні пази центрування вигородки відносно шахти реактора. Потім за допомогою системи автоматизованого проектування виконується накладення контуру розробленої тривимірної моделі на фотографії (рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Фотографія (а), отримана за допомогою телевізійної системи на перевантажувальній машині МП-1000, і накладення контуру тривимірної моделі на фотографію (б).

Суть накладення контуру моделі на фотографії полягає у тому, що фотографія встановлюється в системі автоматизованого проектування як фон і далі виконується наведення віртуальної камери на модель. Ця робота виконується в перспективній проекції, що істотно збільшує точність наведення. Наведення віртуальної камери здійснюється по орієнтирах на фотографії. Такими орієнтирами є внутрішня гранована поверхня вигородки, її вертикальні канали та пази, верхні торці труб. Потім за допомогою засобів системи автоматизованого проектування вимірюється кут, що визначає орієнтацію симетричних пазів у трубах відносно центральної осі реактора.

Представлена методика вже випробувана на реакторах ВВЕР-1000 на енергоблоках №1 ЮУАЕС, №3 і №4 РАЕС. Результати перевірки надійності цієї методики дозволяють з високою вірогідністю припустити, що значення визначених з її допомогою кутів відрізняються від істинних не більше ніж на  $\pm 3^\circ$ .

Для орієнтування метрологічних і модернізованих КЗ по відношенню до АКЗ реактора спільно з фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України було розроблено спеціальний пристрій (ключ), макет і креслення головного виду якого представлено на рис. 5. Цей ключ було успішно випробувано на енергоблоках №1 ЮУАЕС і №3 РАЕС.

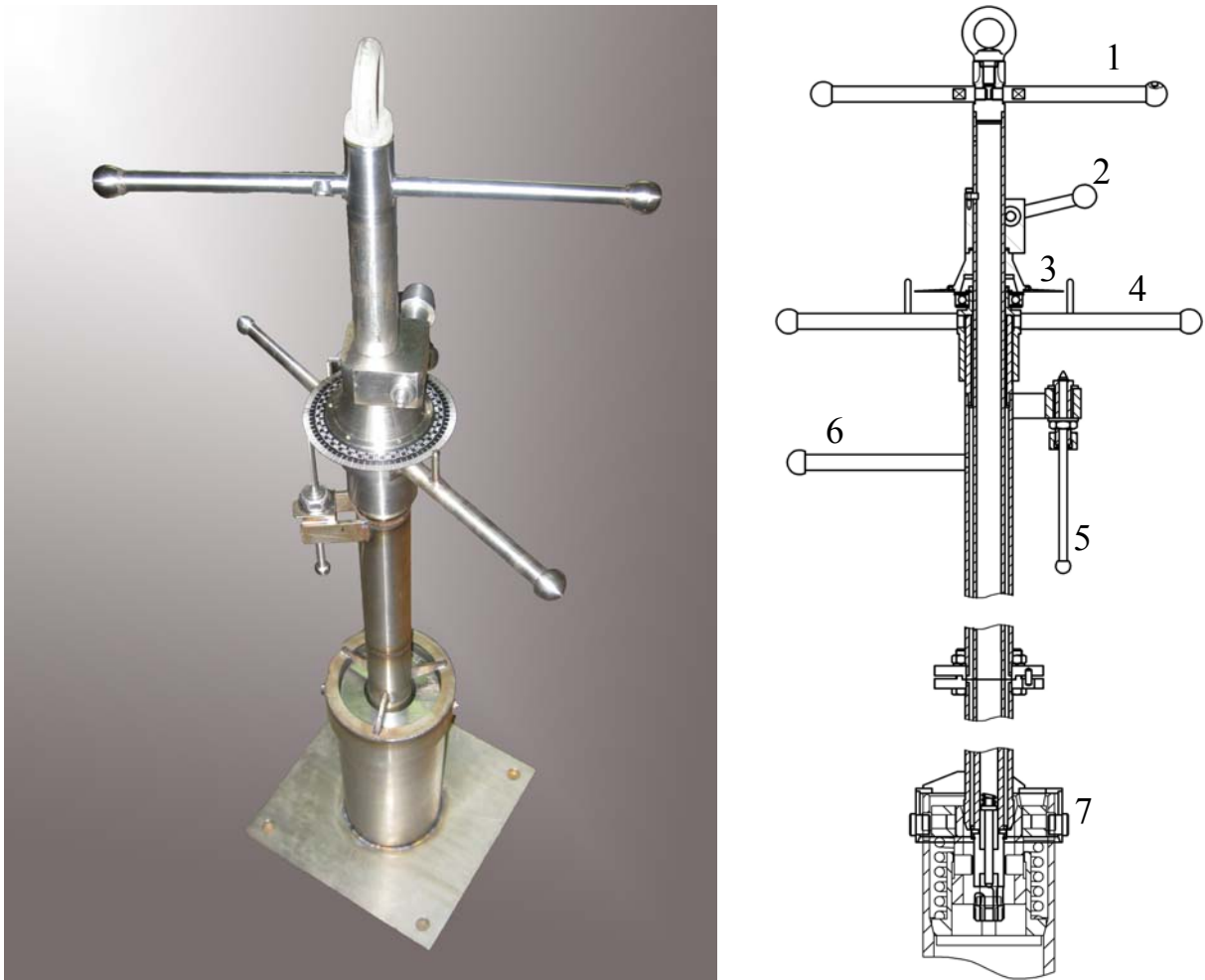


Рис. 5. Макет ключа для орієнтування КЗ відносно АКЗ реактора (а) і його основні елементи (б) : 1 – ручки внутрішньої труби, 2 – ручка затиску, 3 – лімба, 4 – ручки для витягування внутрішньої труби, 5 – вказівник кута, 6 – ручка зовнішньої труби, 7 – кільце.



**Четвертий розділ** дисертації присвячено розробці етапів модернізації одноярусних КЗ зі ЗС металу КР енергоблоку №1 ЮУАЕС. Також в цьому розділі представлено результати першого етапу цієї роботи.

Передусім на основі результатів випробувань ЗС штатної програми та моніторингу радіаційного навантаження КР визначено орієнтовні строки початку робіт з розробки додаткових програм ЗС для ряду енергоблоків АЕС України з реакторами ВВЕР-1000. Виявилось, що найбільш критична ситуація з термінами склалася для енергоблоку №1 ЮУАЕС. Тому для цього енергоблоку відповідно до поточного стану програми ЗС було розроблено детальний поетапний план модернізації одноярусних КЗ.

Дії, які виконуються при модернізації одноярусних КЗ для досягнення оптимальних умов опромінення ЗС, можна розділити на базові й додаткові. Базові дії передбачається виконувати при модернізації всіх КЗ, додаткові – залежно від ситуації для кожної конкретної збірки.

Базові дії (рис. 1):

1. Переміщення контейнерів зі ЗС на рівень нижнього ярусу штатної двох'ярусної КЗ. Ця дія призведе до збільшення середньої швидкості набору флюенса зразками приблизно в 2.5 рази.

2. Поворот збірки на  $180^\circ$  відносно її положення до модернізації. Це призведе до вирівнювання флюенсів між ЗС.

Додаткові дії:

1. Переворот контейнерів зі ЗС кришками донизу (зазвичай вони розташовані кришками догори). Ця дія, по суті, аналогічна повороту збірки на  $180^\circ$  і зрештою призведе до вирівнювання флюенсів по висоті ЗС. При цьому необхідно врахувати, що через різницю товщини кришки і денця робочі частини ЗС розташовані не в центрі контейнера по висоті.

2. Зміна позиції збірки після модернізації. Наприклад, збірки, які до модернізації опромінювалися на позиціях Л2/Л4, можуть бути переставлені на позиції Л1/Л5. Ця дія для даного прикладу призведе до додаткового збільшення середньої швидкості набору флюенса зразками приблизно на 30%.

3. Додаткове зміщення по висоті контейнерів зі ЗС. За допомогою цієї дії можливе плавне регулювання середньої швидкості набору флюенса для того, щоб максимально наблизити умови опромінення зразків до оптимальних. Попередній аналіз конструкції штатних двох'ярусних КЗ показав, що контейнери зі ЗС можуть бути додатково зміщені на  $\sim 3$  см вниз.

Враховуючи вищевикладені ідеї, було розроблено схему модернізації одноярусних КЗ зі зразками металу КР енергоблоку №1 ЮУАЕС, що складається з трьох етапів (табл. 1). У результаті аналізу можливих варіантів для кожної одноярусної збірки був підібраний оптимальний набір додаткових дій при модернізації, розраховані терміни вивантаження/завантаження, а також зроблені прогностичні оцінки флюенсів, що наберуть ЗС. Основні результати виконаної роботи, представлені в табл. 1, показують, що у випадку проведення модернізації за запропонованою схемою буде забезпечено надійний контроль стану металу КР енергоблоку №1 ЮУАЕС у понадпроектний період.

Таблиця 1  
Базова схема модернізації одноярусних КЗ, які опромінюються в реакторі ВВЕР-1000 енергоблоку №1 ЮУАЕС

Етап модернізації	КЗ	Дії з КЗ при модернізації					Номер кампанії, після якої виконується відповідна операція			Прогнозні оцінки	
		Перенос контейнерів зі ЗС на нижній ярус і поворот збірники на 180°	Переворот контейнерів кришками вниз	Переміщення модернізованої збірники в позицію Л1 або Л5	Додатковий зсув ЗС на 1 см вниз	Вивантаження КЗ для модернізації	Вивантаження КЗ в реактор	Завантаження модернізованої КЗ	Вивантаження модернізованої КЗ для випробувань	$\Phi_{0.5}, 10^{19}$ нейтр./см <sup>2</sup>	$N_0$
I	5Л2	+	+	+	+	+	28	29	36	4.43	52
	4Л1	+	-	-	-	-	32	33	45	6.86	80
II	4Л2	+	+	+	+	+	39	40	50	6.42	76
	4Л3	+	+	+	-	-	39	40	49	5.13	
	4Л4	+	+	+	+	+	39	40	50	6.40	
III	5Л3 6Л3	+	+	+	+	+	60	61	73	7.78	91
	5Л4	+	+	-	-	-	37	38	52	7.87	
	4Л5	+	+	-	-	-	37	38	52	7.87	



У рамках реалізації першого етапу модернізації одноярусних КЗ на енергоблоці №1 ЮУАЕС після закінчення 28-ї паливної кампанії з реактора була вивантажена КЗ 5Л2 і доставлена в Інститут ядерних досліджень НАН України.

Після цього було визначено орієнтацію цієї збірки під час опромінення в реакторі за спеціальною розрахунково-експериментальною методикою, яка базується на вимірюваннях активності  $Mn^{54}$  в пробах металу, узятих з торців шайб збірки.

Для успішної установки в реактор модернізованої і метрологічних КЗ було розроблено схему їх розміщення на штатних місцях. Також з цією метою було виконано ревізію труб для установки цих збірок.

Далі було виконано модернізацію КЗ 5Л2 і здійснена її установка в реактор. Одночасно було розпочато роботу з проведення дозиметричного експерименту, в якому на період однієї паливної кампанії у реактор встановлено три метрологічні КЗ.

Варто зазначити, що результати розробки як додаткової програми контролю технічного стану металу КР ВВЕР-1000 за допомогою ЗС в цілому, так і додаткової програми ЗС для енергоблоку №1 ЮУАЕС зокрема, обговорювались на нарадах за участю фахівців ДП НАЕК "Енергоатом" і отримали підтримку.

Основні результати цього розділу використані під час розробки "Робочої програми модернізації однорядних опромінюваних контейнерних збірок зі зразками-свідками металу корпусу реактора енергоблоку №1 ВП ЮУАЕС". Програма погоджена з Держатомрегулювання України і зараз продовжуються роботи з її поетапної реалізації.

## ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена створенню науково-технічних основ додаткової програми ЗС для забезпечення контролю технічного стану металу корпусу ВВЕР-1000 у понадпроектний період експлуатації. В якості основи додаткової програми запропоновано використати ЗС штатних одноярусних КЗ комплектів 4Л-6Л після їх відповідної модернізації.

Аналіз результатів дисертаційної роботи дозволяє зробити наступні основні висновки:

1. Виконано аналіз номенклатури ЗС одноярусних КЗ з точки зору забезпечення контролю металу КР у понадпроектний період експлуатації. Показано, що тип і кількість ЗС будь-якого одноярусного комплекту відповідає вимогам нормативних документів з точки зору коректного визначення ступеня радіаційного окрихчування металу КР ВВЕР-1000.

2. На підставі аналізу умов опромінення одноярусних КЗ розроблено схему їх модернізації, суть якої полягає в переносі контейнерів зі ЗС з верхнього ярусу на нижній з одночасним поворотом усієї збірки на  $180^\circ$  навколо власної осі.

3. Отримано формули для розрахунку оптимальних термінів вивантаження штатних одноярусних КЗ для модернізації і модернізованих – для випробувань опромінених ЗС.

4. Показано, що одним з перших етапів розробки додаткової програми ЗС є проведення дозиметричного експерименту для визначення характеристик поля нейтронів в місцях розташування ЗС штатної програми в конкретному реакторі.

5. Розроблено основні положення дозиметричного експерименту, в якому пропонується на період однієї паливної кампанії встановити в реактор три двох'ярусні метрологічні КЗ, які оснащені оптимальною кількістю НАД за спеціально розробленою схемою їх розміщення. Такі збірки були встановлені в реактори на енергоблоках №1 ЮУАЕС і №3 РАЕС.

6. Розроблено основні положення методики верифікації та валидації, яка включає розробку спеціалізованого для валидації експерименту, призначеного для визначення значень функціоналів нейтронного потоку, що характеризують умови опромінення ЗС в реакторах ВВЕР-1000.

7. З метою оптимізації схеми розміщення в реакторі ЗС додаткової програми розроблено методику визначення орієнтації пазів в трубах на вигородці, призначених для розміщення КЗ. Ця методика була перевірена на енергоблоці №4 РАЕС, де орієнтація труб відносно центральної осі реактора відома з високою інструментальною точністю.

8. Разом з фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України розроблено обладнання для орієнтування модернізованих і метрологічних КЗ відносно АКЗ реактора.

9. На підставі результатів випробувань ЗС штатної програми і моніторингу радіаційного навантаження КР визначено орієнтовні терміни початку реалізації додаткових програм ЗС для ряду енергоблоків АЕС України з реакторами ВВЕР-1000. Показано, що найбільш критична ситуація склалася для реактора енергоблоку №1 ЮУАЕС, тому для нього розроблено детальну схему модернізації одноярусних КЗ.

10. Основні результати дисертаційної роботи використано при розробці "Робочої програми модернізації однорядних опромінюваних контейнерних збірок із зразками-свідками металу корпусу реактора енергоблоку №1 ВП ЮУАЕС", яка затверджена на АЕС, погоджена з Держатомрегулювання України і наразі ведуться роботи з її поетапній реалізації.

11. У рамках реалізації першого етапу робочої програми виконана модернізація КЗ 5Л2 зі ЗС металу шва КР і здійснена її установка в реактор. Одночасно було розпочато роботу з проведення дозиметричного експерименту, в якому на період однієї паливної кампанії в реактор встановлено три метрологічні КЗ.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### ***Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:***

1. Некоторые этапы разработки дополнительной программы образцов-свидетелей для реактора ВВЭР-1000 [Текст] / А. В. Гриценко, В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов, Е. Г. Васильева // Ядерна та радіаційна безпека. – 2011. – Вип. 2(50). – С. 29–34.
2. Демехин В. Л. Оценка разброса флюенсов нейтронов на образцы-свидетели металла корпуса ВВЭР-1000 дополнительной программы [Текст] / В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов // Ядерна та радіаційна безпека. – 2012. – Вип. 2(54). – С. 21–22.
3. Демехин В. Л. Методика определения сроков выгрузки контейнерных сборок дополнительной программы образцов-свидетелей металла корпуса ВВЭР-1000 [Текст] / В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов // Ядерна та радіаційна

безпека. – 2012. – Вип. 3(55). – С. 10–12.

4. Демехин В. Л. Оценка ошибки результатов расчетов функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус ВВЭР-1000 [Текст] / В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов // Ядерна фізика та енергетика. – 2012. – Т. 13, № 1. – С. 56–61.
5. Демехин В. Л. Верификация и валидация: процесс VS процедура [Текст] / В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов // Ядерна фізика та енергетика. – 2013. – Т. 14, № 2. – С. 150–153.
6. Dosimetry of VVER-1000 Reactor Pressure Vessel and Surveillance Specimens as a part of PLiM at Ukrainian NPPs: Full paper [Electronic resource] / V. N. Bukanov, V. L. Diemokhin, O. V. Grytsenko, V. V. Ilkovych, O. G. Kasatkin, A. M. Pugach, S. M. Pugach, O. G. Vasylieva, I. M. Vyshnevskiy // International Conference on Nuclear Power Plant Life Management (PLiM) for Long Term Operations (LTO), Salt Lake City, Utah, USA, 14–18 May 2012 (IAEA-CN-194). – IAEA, 2012. – IAEA-CN-194-090. – 8 p. – Mode of access: URL: [www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/43/070/43070881.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/070/43070881.pdf). – Last access: 09.02.2015. – Title from the screen.
7. Dosimetry of VVER-1000 Reactor Pressure Vessel and Surveillance Specimens as a part of PLiM at Ukrainian NPPs: Presentation [Electronic resource] / V. N. Bukanov, V. L. Diemokhin, O. V. Grytsenko, V. V. Ilkovych, O. G. Kasatkin, A. M. Pugach, S. M. Pugach, O. G. Vasylieva, I. M. Vyshnevskiy // International Conference on Nuclear Power Plant Life Management (PLiM) for Long Term Operations (LTO), Salt Lake City, Utah, USA, 14–18 May 2012 (IAEA-CN-194). – IAEA, 2012. – 28 p. – Mode of access: URL: [www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/43/130/43130417.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/130/43130417.pdf) – Last access: 09.02.2015. – Title from the screen.
8. VVER-1000 Pressure Vessel and Surveillance Specimen Dosimetry for Lifetime Extension in Ukraine [Electronic resource] / V. N. Bukanov, V. L. Diemokhin, O. V. Grytsenko, V. V. Ilkovych, O. G. Kasatkin, A. M. Pugach, S. M. Pugach, O. G. Vasylieva // International Nuclear Safety Journal. – 2015. – Vol. 4, No. 1. – P. 11-17. – Mode of access: URL: [www.nuclearsafety.info/international-nuclear-safety-journal/index.php/INSJ/article/view/52/pdf](http://www.nuclearsafety.info/international-nuclear-safety-journal/index.php/INSJ/article/view/52/pdf). – Last access: 16.04.2015. – Title from the screen.

***Праці апробаційного характеру:***

9. Dosimetry of VVER-1000 Reactor Pressure Vessel and Surveillance Specimens at Ukrainian NPPs [Text] / V. N. Bukanov, V. L. Diemokhin, O. V. Grytsenko, A. M. Pugach, S. M. Pugach, O. G. Vasylieva, V. V. Ilkovych // 4th Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Kyiv, 03–07 September 2012. Book of Abstracts. – K. : INR, 2012. – P. 121.
10. Additional Surveillance Program for Operation Support of the WVER-1000 Reactor Pressure Vessel during the Overdesign Period [Text] / V. N. Bukanov, O. V. Grytsenko, V. L. Diemokhin, E. G. Vasylieva, V. V. Ilkovich // 3rd Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Kyiv, 07–12 June 2010. Book of Abstracts. – K., INR, 2010. – P. 122.
11. Ількович В. В. Забезпечення достовірності результатів дозиметрії зразків-свідків і корпусів реакторів ВВЕР [Текст] / В. В. Ількович, В. Л. Демьохін,

- В. М. Буканов // XIX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 24–27 січня 2012. Тези доповідей. – К., НАН України, Ін-т ядер. дослід., 2012. – С. 87.
12. Development of Surveillance Specimen Dosimetry Experiment at Unit 3 of Rivne NPP [Text] / V. N. Bukanov, V. L. Diemokhin, O. V. Grytsenko, V. V. Ilkovych, O. G. Vasylieva // 4th Int. Conf. "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy", Kyiv, 03–07 September 2012. Book of Abstracts. – K., INR, 2012. – P. 121.
13. Модернізація штатних одноярусних контейнерних збірок з метою забезпечення контролю металу корпусів реакторів ВВЕР-1000 у надпроектний період експлуатації [Текст] / В. М. Буканов, О. В. Гриценко, В. Л. Дем'яохін, О. Г. Васильєва, В. В. Ількович, О. Г. Касаткін // XX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 28 січня – 1 лютого 2013. Тези доповідей. – К., НАН України, Ін-т ядер. дослід., 2013. – С. 80–81.
14. Реалізація першого етапу модернізації штатних одноярусних контейнерних збірок на енергоблоці № 1 Южно-Української АЕС з метою забезпечення контролю металу корпусу реактора в надпроектний період експлуатації [Текст] / В. М. Буканов, В. В. Ількович, О. В. Гриценко, В. Л. Дем'яохін, О. Г. Васильєва // XXII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 26 – 30 січня 2015. Тези доповідей. – К., НАН України, Ін-т ядер. дослід., 2015. – С. 95-96.

## АНОТАЦІЯ

**Ількович В.В. Розробка науково-технічних основ додаткової програми контролю металу корпусу ВВЕР-1000 за допомогою зразків-свідків.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14 – Теплові та ядерні енергоустановки. – Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, 2015.

Дисертація присвячена розробці основних положень додаткової програми зразків-свідків металу корпусу реактора ВВЕР-1000, що базується на модернізації одноярусних контейнерних збірок штатної програми. Отримано математичні співвідношення для розрахунку термінів як вивантаження з реактора одноярусних контейнерних збірок для модернізації, так і подальшого вивантаження модернізованих збірок для проведення випробувань опромінених зразків-свідків. Розроблено дозиметричний експеримент, який необхідно виконати на початку реалізації додаткової програми зразків-свідків для конкретного енергоблоку з метою визначити характеристики поля нейтронів в місцях розташування модернізованих контейнерних збірок. З метою оптимізації схеми розміщення зразків-свідків додаткової програми у реакторі ВВЕР-1000 розроблено методику визначення орієнтації пазів у трубах, в яких розміщуються контейнерні збірки штатної програми. На основі результатів випробувань зразків-свідків штатної програми та моніторингу радіаційного навантаження корпусу реактора визначено орієнтовні строки початку робіт з реалізації додаткових програм зразків-свідків для ряду енергоблоків АЕС України з реакторами ВВЕР-1000. Розроблено детальну поетапну програму модернізації одноярусних контейнерних збірок на реакторі енергоблоку №1 Южно-Української АЕС. Відповідно до першого етапу програми було модернізовано контейнерну збірку 5Л2. Одночасно

було розпочато роботу з проведення дозиметричного експерименту, в якому на період однієї паливної кампанії у реактор встановлено три метрологічні контейнерні збірки.

**Ключові слова:** корпус реактора, зразки-свідки, контейнерна збірка, дозиметрія зразків-свідків, флюенс нейтронів.

## АННОТАЦІЯ

**Илькович В.В. Разработка научно-технических основ дополнительной программы контроля металла корпуса ВВЭР-1000 с помощью образцов-свидетелей.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 – Тепловые и ядерные энергоустановки. – Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, 2015.

Диссертация посвящена разработке общих положений дополнительной программы образцов-свидетелей металла корпуса реакторов ВВЭР-1000, основанной на модернизации одноярусных контейнерных сборок штатной программы.

Выполнен анализ номенклатуры образцов-свидетелей штатных одноярусных контейнерныхборок, который показал, что тип и количество образцов любого одноярусного комплекта соответствует требованиям нормативных документов с точки зрения корректного определения степени радиационного охрупчивания металла корпуса реактора ВВЭР-1000.

Разработана схема модернизации одноярусных контейнерныхборок, которая заключается в переносе контейнеров с образцами-свидетелями с верхнего яруса на нижний с поворотом всей сборки на  $180^\circ$  вокруг собственной оси. В таком случае следует ожидать не только необходимого ускорения облучения образцов-свидетелей, но и выравнивания накопленных ими флюенсов.

Выполнена оценка разброса флюенсов на образцы-свидетели модернизированных контейнерныхборок, обусловленного схемой модернизации. Показано, что предлагаемая схема позволит обеспечить выравнивание флюенсов, накопленных образцами одной сборки.

Разработана методика, которая позволяет определять оптимальные сроки выгрузки штатных одноярусных контейнерныхборок для модернизации и модернизированных – для испытаний облученных образцов-свидетелей.

Показано, что необходимым этапом разработки основных положений дополнительной программы образцов-свидетелей является проведение дозиметрического эксперимента с целью определения характеристик поля нейтронов в местах расположения образцов-свидетелей в конкретном реакторе. В этом эксперименте предложено установить в реактор аналогичные штатным двухъярусные контейнерные сборки со специальным дозиметрическим обеспечением, которое позволяет получить практически полную информацию об условиях облучения образцов-свидетелей.

Разработана методика определения ориентации труб, предназначенных для установки штатных контейнерныхборок в реактор, относительно активной зоны. Данная методика уже опробована на реакторах ВВЭР-1000 на энергоблоках №1 Южно-Украинской АЭС, №3 и №4 Ровенской АЭС. Результаты проверки надежно-

сти данной методики позволяют с высокой вероятностью предполагать, что значения определенных с ее помощью углов отличаются от истинных не более чем на  $\pm 3^\circ$ .

Совместно со специалистами Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработано устройство (ключ) для ориентирования метрологических контейнерных сборок относительно активной зоны реактора.

На основе результатов испытаний образцов-свидетелей штатной программы и мониторинга радиационной нагрузки корпуса реактора определены ориентировочные сроки начала работ по разработке дополнительных программ образцов-свидетелей для ряда энергоблоков АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000. Показано, что наиболее критическая ситуация сложилась для реактора энергоблока №1 Южно-Украинской АЭС. Разработана детальную поэтапную программу модернизации одноярусных контейнерных сборок для этого энергоблока.

В соответствии с первым этапом программы была модернизирована контейнерная сборка 5Л2. Одновременно было начато проведение дозиметрического эксперимента, в котором на период одной топливной кампании в реактор установлены три метрологические контейнерные сборки.

**Ключевые слова:** корпус реактора, образцы-свидетели, контейнерная сборка, дозиметрия образцов-свидетелей, флюенс нейтронов.

#### ABSTRACT

**Ilkovych V.V. Development of Scientific and Technical Fundamentals of Additional Surveillance Program for VVER-1000 Reactors.** – Manuscript.

Thesis for a scientific degree of technical sciences by speciality 05.14.14 – Thermal and nuclear power facilities – Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine, Kyiv, 2015.

The thesis is devoted to the development of scientific and technical fundamentals of additional surveillance program for VVER-1000 reactor based on modernization of one-floor container assemblies. Technique to determine optimal unloading terms of regular one-floor container assemblies for the modernization and the modernized container assemblies for tests of the irradiated surveillance specimens is developed. Dosimetry experiment for determination of neutron field characteristics at the places of surveillance specimen locations of the concrete reactor is developed. Orientation determination technique of pipes intended for container assemblies installation with respect to central axis of the reactor is developed and validated. Terms of realization start of additional surveillance programs for some Ukrainian NPP units with VVER-1000 reactors is estimated using pressure vessel and surveillance specimen dosimetry results. The detailed stage-by-stage plan of modernization of one-floor container assemblies is developed for unit 1 of South-Ukrainian NPP. According to this plan the one-floor container assembly 5L2 was modernized and loaded into reactor. At the same time realization of the dosimetry experiment was begun. Irradiation during one fuel cycle of three metrological container assemblies with extended sets of the neutron activation detectors is carrying out in this experiment.

**Keywords:** reactor pressure vessel, surveillance specimens, container assembly, dosimetry of surveillance specimens, neutron fluence.

Підписано до друку 26.12.2015 р. Формат 60x90<sup>1</sup>/16  
Ум. друк. арк. 0,9. Обл-вид. арк. 0,9.  
Наклад 100 прим. Замовлення № 151  
Віддруковано на різнографі в видавничому центрі “Принт-центр”  
03056, м. Київ, вул. Політехнічна, 35  
Тел./факс: 332-41-10, 486-50-88, 277-40-16  
<http://www.printc.com.ua>. E-mail [printcentr@ukr.net](mailto:printcentr@ukr.net)