

Реалізація першого етапу модернізації однорядних контейнерних збірок зі зразками-свідками металу корпусу реактора ВВЕР-1000 енергоблока № 1 Південноукраїнської АЕС

- **Гриценко Олександр Васильович**, канд. техн. наук
Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ, Україна
- **Буканов Володимир Миколайович**, канд. фіз.-мат. наук
Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ, Україна
- **Демьохін Владислав Леонідович**, канд. техн. наук
Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ, Україна
- **Пугач Олександр Михайлович**, канд. техн. наук
Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ, Україна
- **Васильєва Олена Георгіївна**, канд. фіз.-мат. наук
Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ, Україна
- **Ревка Володимир Миколайович**, канд. фіз.-мат. наук, старший дослідник
Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ, Україна
- **Чирко Людмила Іванівна**, канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.
Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ, Україна
- **Тригубенко Олександр Вікторович**, канд. техн. наук
Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ, Україна
- **Чайковський Юрій Віталійович**
Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, м. Київ, Україна

Необхідною умовою експлуатації реактора ВВЕР-1000 є контроль стану металу корпусу протягом усього строку служби. Штатна програма зразків-свідків дає змогу контролювати стан його корпусу тільки протягом проектного строку експлуатації. Тому, з метою забезпечення матеріалознавчого супроводу експлуатації корпусу в понадпроектний період розроблено програми модернізації однорядних контейнерних збірок зі зразками-свідками металу корпусів реакторів ВВЕР-1000 АЕС України.

Суть модернізації полягає в перенесенні контейнерів зі зразками-свідками на рівень нижнього ряду штатної дворядної збірки з поворотом на 180°. Так забезпечується випереджаюче приблизно в 2,5 рази порівняно з корпусом опромінення зразків-свідків та вирівнювання флюенсів швидких нейтронів між зразками з метою підбору представницьких груп для випробувань.

Першим етапом програми модернізації однорядних контейнерних збірок реактора енергоблока № 1 Південноукраїнської АЕС передбачено модернізацію збірки 5Л2 зі зразками металу шва № 3. Її було вивантажено після 28-ї паливної кампанії, модернізовано та повернуто в реактор після 29-ї кампанії. Крім того, в межах проведення дозиметричного експерименту з метою дослідження характеристик поля нейтронів у місцях розташування зразків-свідків штатної програми в реактор було завантажено три метрологічні збірки з розширеним набором індикаторів нейтронного потоку.

Після закінчення 35-ї паливної кампанії модернізовану збірку 5Л2 було вивантажено з реактора й доправлено в Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України, де її було розібрано та визначено флюенси швидких нейтронів, накопичені кожним зразком. Крім того, ґрунтуючись зокрема на даних дозиметричного експерименту оцінено похибки визначення флюенсів.

Після опромінення модернізованої контейнерної збірки було отримано 12 штатних зразків Шарпі з близькими флюенсами, що значно перевищують флюенс на корпус. Це, зі свого боку, дозволило провести їх випробування на ударний вигин з дотриманням усіх вимог нормативних документів та виконати достовірну оцінку зсуву критичної температури крихкості металу шва № 3 корпусу реактора енергоблока № 1 Південноукраїнської АЕС у понадпроектний період його експлуатації.

Ключові слова: ВВЕР-1000, зразки-свідки, зсув критичної температури крихкості, контейнерна збірка, корпус реактора, понадпроектний період, флюенс нейтронів.

© Гриценко О. В., Буканов В. М., Демьохін В. Л., Пугач О. М., Васильєва О. Г.,
Ревка В. М., Чирко Л. І., Тригубенко О. В., Чайковський Ю. В., 2022

Вступ

Однією з основних умов забезпечення надійної та безпечної експлуатації корпусу реактора (КР) ВВЕР-1000 є контроль стану його металу протягом усього строку служби. Важливим джерелом інформації про зміну властивостей металу КР в умовах експлуатації енергоблоків АЕС є програма зразків-свідків (ЗС) [1].

У реакторі ВВЕР-1000 шість комплектів ЗС (1Л – 6Л) штатної програми під час опромінення розташовуються біля внутрішньої поверхні шахти реактора в просторі між вигородкою та блоком захисних труб. У трьох перших комплектах ЗС розташовано у двох рядах: один над одним, а в решті – тільки на верхньому.

Дослідження ЗС, що опромінювались у дворядних контейнерних збірках (КЗ), надають інформацію про зміну властивостей металу КР, яка забезпечує супровід безпечної експлуатації корпусу до закінчення проектного строку експлуатації. ЗС однорядних КЗ не в змозі забезпечити матеріалознавчий супровід експлуатації КР у понадпроектний період, оскільки опромінюються за близьких до корпусу умов і, як результат, їх дослідження не дають можливості отримати прогностичні оцінки. Тому за принципами, наведеними в роботі [2], для реакторів ВВЕР-1000 енергоблоків АЕС України було розроблено низку програм модернізації однорядних КЗ [3]–[6].

У цій статті розглянуто практичну реалізацію першого етапу модернізації однорядних КЗ зі ЗС металу КР ВВЕР-1000 енергоблока № 1 Південноукраїнської АЕС (ПАЕС), виконану за умови використання ядерного палива типу ТВЗА.

1. Основні положення програм модернізації однорядних КЗ

У документі [7] зазначено, що з урахуванням принципу неперервності підтвердження безпечної експлуатації КР протягом усього строку

експлуатації, вивантаження кожного наступного комплекту ЗС із необхідним для його досліджень запасом часу повинно випереджати момент експлуатації реактора, для якого отримані обґрунтовані флюенси нейтронів з $E_n > 0,5$ МеВ за результатами досліджень зразків попереднього комплекту. Крім того, відповідно до СОУ НАЕК 087:2015 [8] у підбраній для випробувань групі ЗС значення накопиченого кожним зразком флюенсу може відрізнятися від середньогрупового в межах, що не перевищують $\pm 10\%$ (допускається до $\pm 15\%$).

Суть ідеї модернізації однорядних КЗ полягає в перенесенні контейнерів зі ЗС на рівень нижнього ряду з поворотом на 180° (рисунок 1). Так забезпечується випереджаюче приблизно в 2,5 рази порівняно з корпусом опромінення ЗС та вирівнювання флюенсів між зразками з метою підбору представницьких груп ЗС для випробувань.

У разі потреби під час модернізації збірок може бути виконано додаткові дії:

зміна позиції модернізованої збірки під час завантаження в реактор (наприклад, переміщення з позицій Л2/Л4 на позиції Л1/Л5 підвищує швидкість опромінення ЗС на $\sim 30\%$);

переворот контейнерів кришками вниз, що забезпечує вирівнювання флюенсів за висотою ЗС;

додатковий зсув ЗС за висотою КЗ, який дозволяє точно відрегулювати швидкість їх опромінення.

Конструктивні допуски на виготовлення внутрішньокорпусних пристроїв реактора можуть спричинити зміну швидкості опромінення ЗС у межах $\pm 20\%$. Тому програмами [3] – [6] передбачено проведення дозиметричних експериментів з метою визначення умов опромінення зразків у кожному конкретному реакторі.

Результати дозиметричного експерименту та параметри реальних паливних кампаній використовуються для регулярного уточнення строків вивантаження КЗ з реактора для модернізації та випробувань.

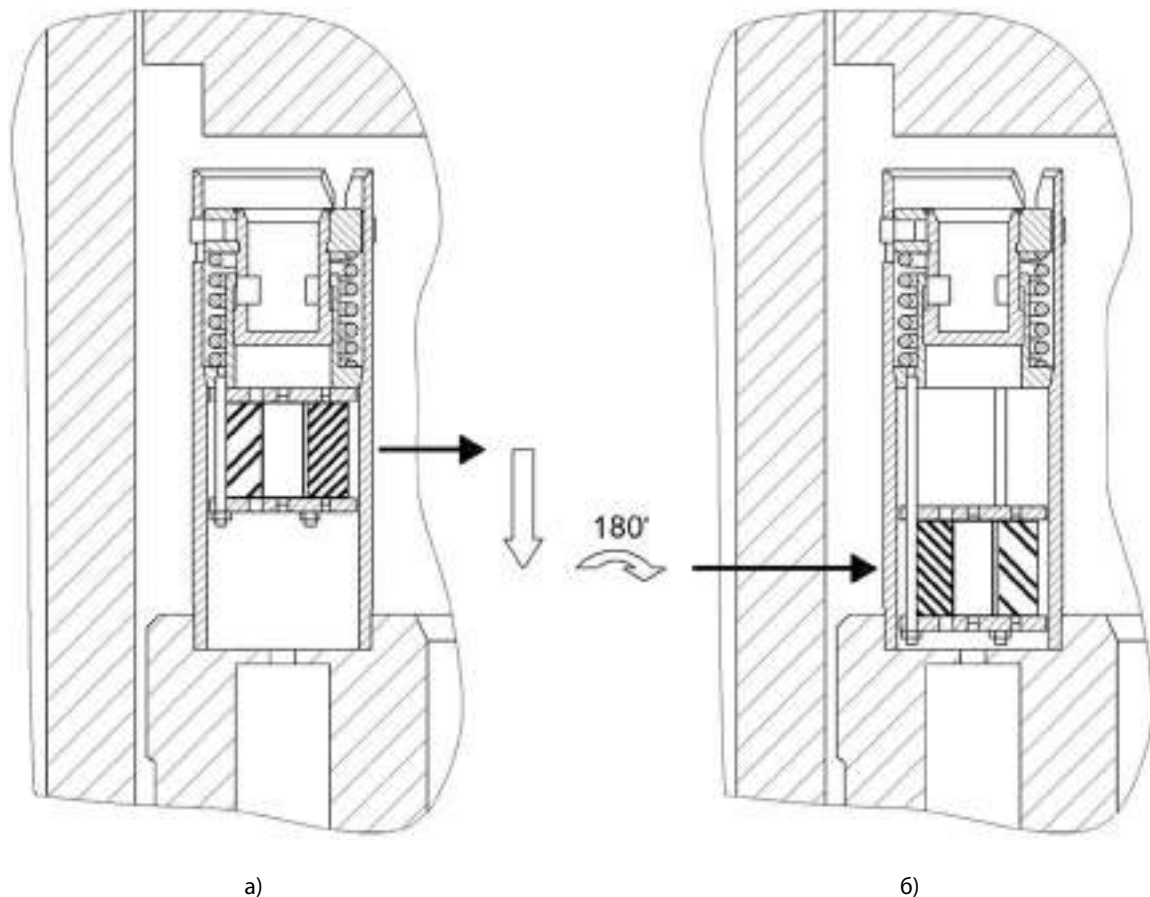


Рисунок 1 – Схема модернізації однорядних КЗ: а) розміщення контейнерів зі ЗС в реакторі до модернізації; б) розміщення контейнерів зі ЗС цієї ж КЗ в реакторі після модернізації

2. Модернізація збірки 5Л2 енергоблока № 1 ПАЕС

Згідно з першим етапом програми [3] здійснено модернізацію збірки 5Л2 зі ЗС металу шва № 3. Під час модернізації виконано усі перераховані у розділі 1 дії, зокрема здійснено додатковий зсув ЗС у напрямку активної зони на 15 мм для збільшення швидкості опромінення зразків ще на ~ 15 %.

Після закінчення 28-ї паливної кампанії з метою модернізації з реактора енергоблока № 1 ПАЕС було вивантажено й доправлено в Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України (ІЯД НАН України) штатну КЗ 5Л2 (рисунок 2).

Як видно з рисунка 2, маркування контейнерів не збереглося, тому для подальшої ідентифікації на них було нанесено мітки. До того ж, мітки було нанесено на шайби (рисунки 3 – 7).

Після розбирання КЗ з метою визначення її орієнтації відносно центральної осі реактора під час опромінення з торців шайб з місць, розташованих напроти контейнерів, було взято проби металу, як це показано на рисунку 8.

На підставі вимірювань активності ^{54}Mn у пробах металу, взятих з торців шайб КЗ, за викладеною в [9] методикою була визначена орієнтація збірки відносно напрямку на максимальне значення питомої активності ^{54}Mn . Крім того, на підставі результатів розрахунку переносу нейтронів до місця розташування штатної КЗ 5Л2 в реакторі енергоблока № 1 ПАЕС для обох шайб було визначено кути між напрямком на максимальне значення питомої активності ^{54}Mn і напрямком на центральну вісь реактора.

У такий спосіб за двома наборами даних було визначено орієнтацію збірки під час опромінення в реакторі. Враховуючи хороше співпадіння значень кутів орієнтації КЗ, отриманих за верхньою і нижньою шайбами, підсумково було взято їх середнє арифметичне (рисунок 9).

Наступним кроком контейнери, вилучені зі штатної збірки, було встановлено в модернізовану збірку кришками вниз з урахуванням положення кожного контейнера до модернізації (рисунок 10). Далі модернізовану збірку 5Л2 було доправлено на ПАЕС та завантажено з поворотом на 180° в позицію 1Л5 реактора енергоблока № 1 після закінчення 29-ї паливної кампанії.

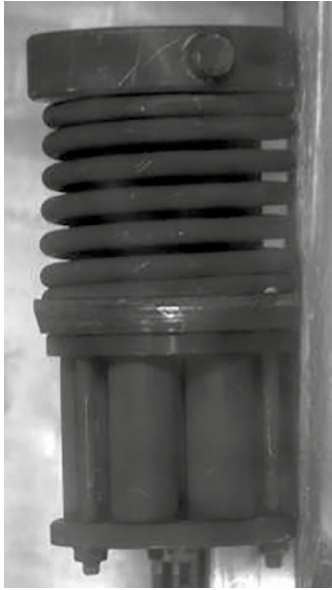


Рисунок 2 – Штатна КЗ 5Л2

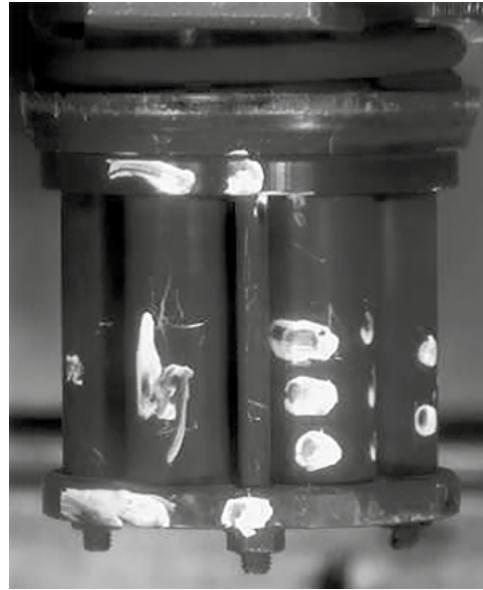


Рисунок 3 – Мітки на КЗ 5Л2 (вид 1)



Рисунок 4 – Мітки на КЗ 5Л2 (вид 2)

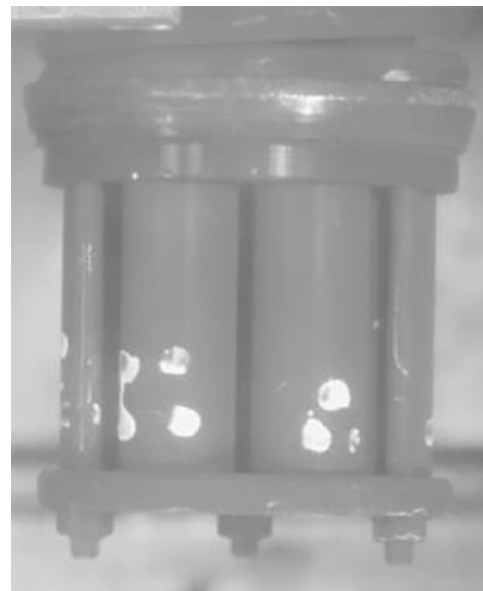


Рисунок 5 – Мітки на КЗ 5Л2 (вид 3)

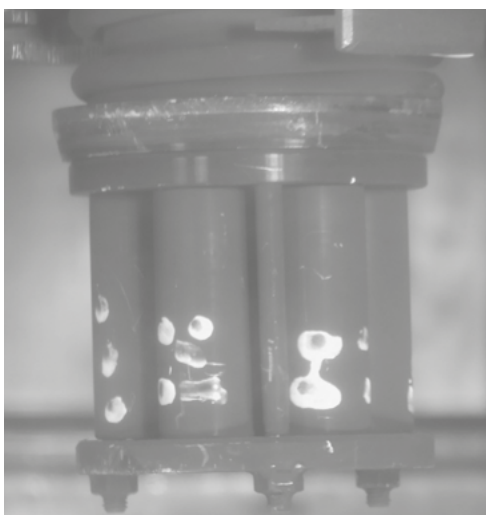


Рисунок 6 – Мітки на КЗ 5Л2 (вид 4)

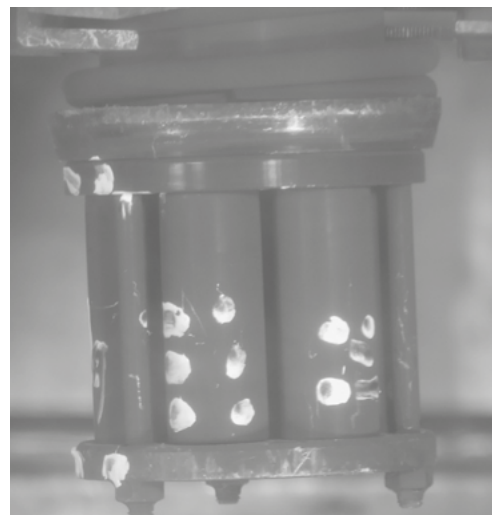


Рисунок 7 – Мітки на КЗ 5Л2 (вид 5)

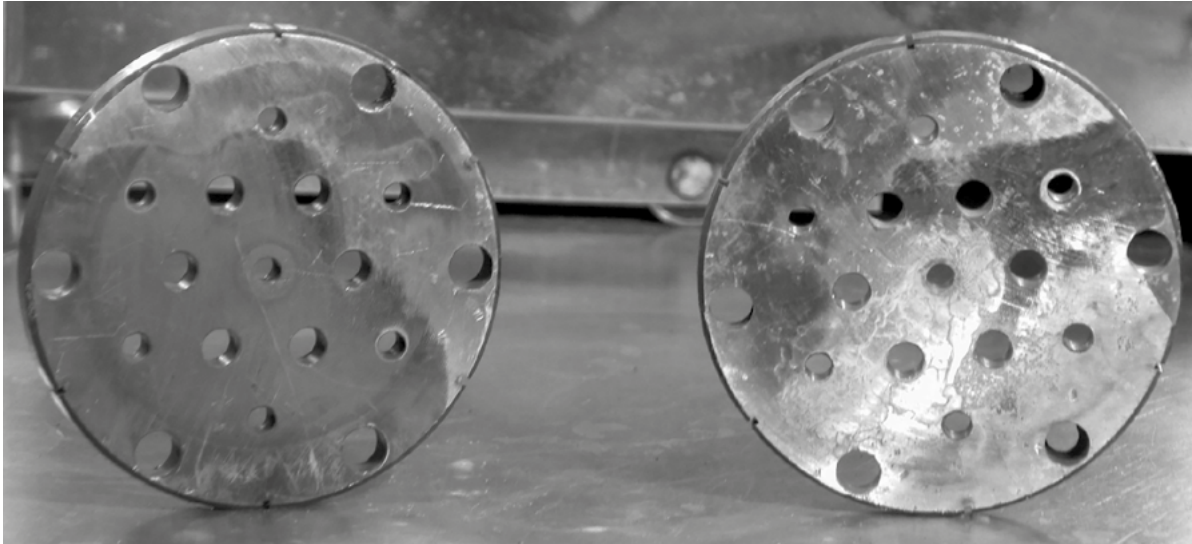


Рисунок 8 – Шайби КЗ 5Л2 з канавками від взятих проб металу

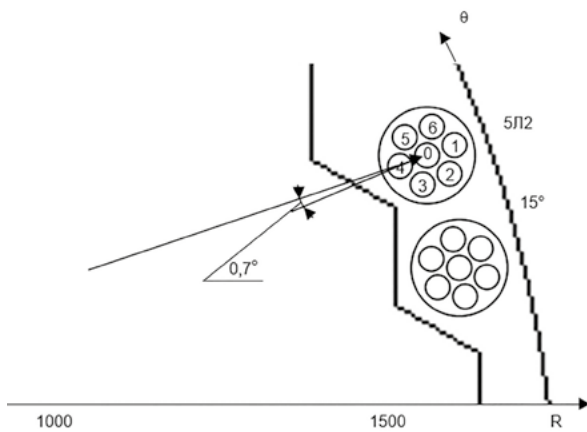


Рисунок 9 – Орієнтація штатної КЗ 5Л2 відносно центральної осі реактора ВВЕР-1000 енергоблока № 1 ПАЕС: номер на контейнері дорівнює кількості міток



Рисунок 11 – Вимір значення кута α , що визначає орієнтацію пазів у трубі для КЗ відносно центральної осі реактора



Рисунок 10 – Модернізована КЗ 5Л2

Таблиця 1 – Значення кута α , що визначає орієнтацію пазів у трубах для штатних КЗ відносно центральної осі реактора ВВЕР-1000 енергоблока № 1 ПАЕС, градуси

Комплект ЗС КЗ	1Л	2Л	3Л	4Л	5Л	6Л
1	122	63	2	122	63	3
2	117	56	177	119	56	176
3	111	62	164	72	46	148
4	93	34	154	96	36	157
5	89	30	151	90	30	150



Рисунок 12 – Пристрій, призначений для встановлення заданої орієнтації КЗ відносно центральної осі реактора

Важливо зауважити, що штатними засобами не передбачено можливість забезпечення з достатньою точністю певної орієнтації КЗ відносно центральної осі під час завантаження її в реактор. Крім того, орієнтація пазів в трубах, призначених для розміщення збірок у реакторі, яка визначає орієнтацію збірок, має стохастичний характер. Тому перед завантаженням модернізованої збірки 5Л2 в реактор було виконано низку робіт для вирішення зазначеної проблеми.

Насамперед, кожену трубу було щонайменше тричі сфотографовано з різних ракурсів та за допомогою методики, наведеної в роботі [2], з достатньо високою точністю ($\pm 3^\circ$) визначено їх орієнтацію відносно центральної осі реактора (таблиця 1 і рисунок 11). Крім того, розроблено та виготовлено пристрій [10], призначений для встановлення заданої орієнтації КЗ відносно центральної осі реактора (рисунок 12). Причому з метою забезпечення можливості застосування пристрою доопрацьовано верхню шайбу модернізованої збірки (рисунок 13).

Для розуміння зазначимо, що під час визначення кута, під яким згідно з лібмом пристрою має бути розташовано КЗ в реакторі, інформація з таблиці 1 використовується як точка початку відліку.

Разом з модернізованою збіркою 5Л2 в реактор ВВЕР-1000 енергоблока № 1 ПАЕС було завантажено три метрологічні КЗ із розширеним набором індикаторів нейтронного потоку [11]. Метрологічні збірки було вивантажено після 30-ї паливної кампанії та виконано відповідні розрахунково-експериментальні дослідження із з'ясування умов опромінення ЗС у цьому реакторі. Водночас уточнено строки вивантаження модернізованої КЗ з реактора [12].

Так, на енергоблоці № 1 ПАЕС було проведено дозиметричний експеримент, результати якого дозволили підвищити надійність та достовірність визначення флюенсів нейтронів на ЗС, зокрема на зразки збірки 5Л2.

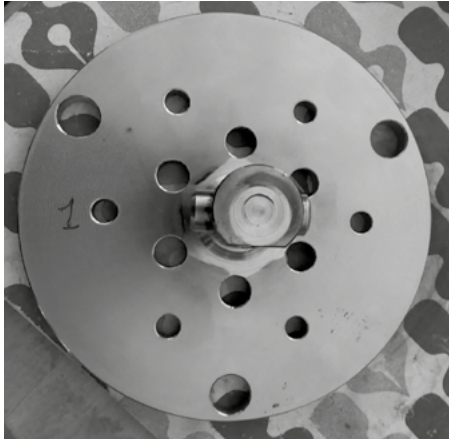


Рисунок 13 – Верхня шайба модернізованої збірки 5Л2: на шайбі позначено положення контейнера з однією міткою

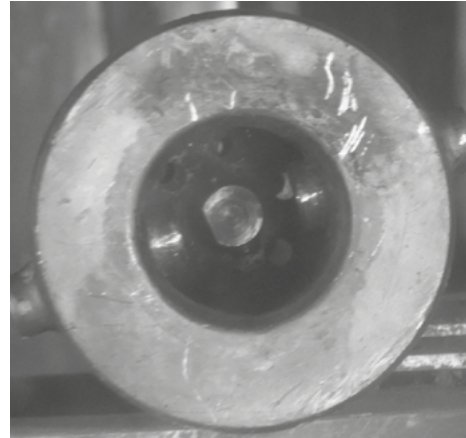


Рисунок 15 – Модернізована К3 5Л2 (вид зверху)

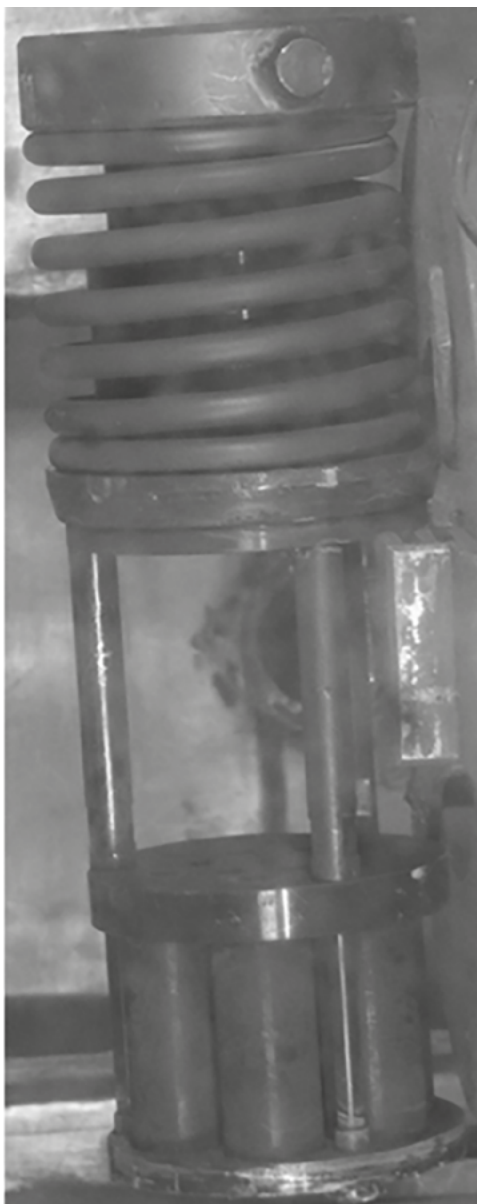


Рисунок 14 – Модернізована К3 5Л2 після доопромінення

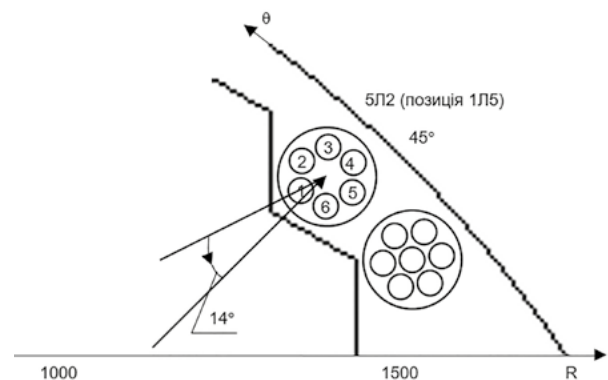


Рисунок 16 – Орієнтація модернізованої К3 5Л2 відносно центральної осі реактора ВВЕР-1000 енергоблока № 1 ПАЕС: номер на контейнері дорівнює кількості міток

3. Визначення сумарних флюенсів нейтронів, накопичених ЗС збірки 5Л2

Після закінчення 35-ї паливної кампанії модернізовану К3 5Л2 (рисунки 14, 15) було вивантажено з реактора й доправлено в ІЯД НАН України.

Орієнтуючись на положення хвостовика верхньої шайби (рисунки 13, 15) було відновлено мітки, нанесені на контейнери перед розбиранням штатної збірки 5Л2 (рисунки 3 – 7, 10). Далі за наведеною в розділі 2 методикою було визначено орієнтацію модернізованої збірки 5Л2 під час доопромінення в реакторі енергоблока № 1 ПАЕС (рисунок 16).

На базі інформації про орієнтацію штатної та модернізованої К3 5Л2 (рисунки 9, 16) за допомогою пакета програм MCSS [13] було визначено попередні розрахункові сумарні флюенси на ЗС цієї збірки.

З метою оцінки похибки флюенсів нейтронів, накопичених зразками збірки 5Л2, після проведення їх механічних випробувань з отриманих половинок на відстані 6 мм від торця зразка було зрізано фольги розмірами 10 мм × 10 мм × 0,3 мм (рисунок 17).

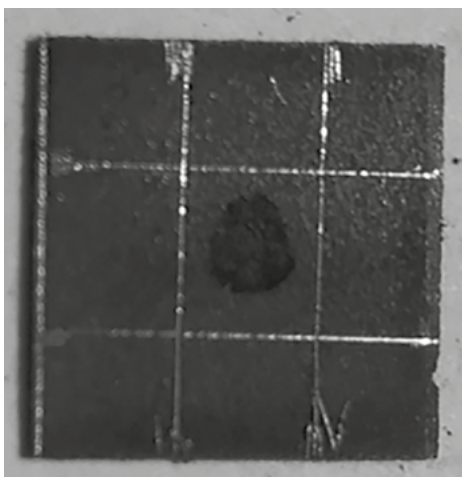


Рисунок 17 – Фольга, зрізана з половинки ЗС після його механічних випробувань

На підставі вимірювань активності ^{54}Mn у зрізаних фольгах та з урахуванням даних дозиметричного експерименту за методикою [14] було оцінено похибки визначення сумарних флюенсів нейтронів з $E_n > 0,5$ МеВ, накопичених зразками збірки 5Л2. Водночас було скориговано їх розрахункові значення на базі наявних експериментальних даних [15].

Остаточні результати визначення сумарного флюенсу для трьох рівнів кожного контейнера наведено у таблиці 2. Похибка окремого значення не перевищує 6 %.

З огляду на невизначеність орієнтації пари ЗС в одному контейнері під час опромінення ([13], Додаток Б), похибка значення флюенсу на будь-якій висоті окремого зразка становить приблизно 7 %.

Аналіз величини максимально можливого відхилення сумарного флюенсу, накопиченого робочою частиною зразка або його верхньою чи нижньою половиною, від середнього по збірці показав, що навіть у теоретично найгіршому варіанті значення відхилення менші за 10 % для усіх рівнів усіх зразків.

Зауважимо, що обґрунтоване за результатами досліджень ЗС збірки 5Л2 значення флюенсу нейтронів з $E_n > 0,5$ МеВ (наведено у розділі 4) забезпечило можливість контролю стану металу шва № 3 в понадпроектний строк експлуатації. За попередніми оцінками [15] зазначений флюенс буде накопичено швом № 3 КР ВВЕР-1000 енергоблока № 1 ПАЕС протягом 51-ї паливної кампанії.

4. Результати механічних випробувань ЗС збірки 5Л2

У модернізованій збірці 5Л2 опромінювалися ЗС металу зварного шва КР. У циліндричних контейнерах розміщувалися стандартні зразки Шарпі (10 мм × 10 мм × 55 мм), призначені для оцінки зсуву критичної температури крихкості ΔT_F внаслідок опромінення. Всього було випробувано на ударний вигин 12 штатних зразків Шарпі. За результатами випробувань визначена перехідна температура T_{KF} опроміненого матеріалу, яка становить 25 °С.

Для оцінки T_{KF} температурна залежність ударної в'язкості KCV була апроксимована функцією гіперболічного тангенсу відповідно до вимог [8]. Результати статистичної обробки показують, що температурна залежність KCV добре характеризується апроксимуючою функцією (рисунок 18). Невеликий розкид значень KCV навколо лінії регресії (стандартне відхилення $SD = 11$ Дж·см²) та близькість коефіцієнта детермінації до одиниці ($R^2 = 0,92$) є умовами, за яких значення перехідної температури T_{KF} вважається надійним.

Середній флюенс нейтронів з $E_n > 0,5$ МеВ на робочі частини для групи з 12 випробуваних штатних зразків дорівнює $43,2 \times 10^{22}$ м² з максимальним відхиленням від середнього значення для кожного зразка 3 %. Незначний розкид значень флюенсу нейтронів свідчить про однорідність опромінення і задовольняє нормативні вимоги СОУ НАЕК 087:2015 щодо надійної оцінки зсуву

Таблиця 2 – Сумарні значення флюенсу нейтронів на ЗС збірки 5Л2, опромінені в реакторі ВВЕР-1000 енергоблока № 1 ПАЕС

Маркування контейнера	Індекси ЗС	Середина нижніх половинок ЗС	Робочі частини ЗС	Середина верхніх половинок ЗС
		Флюенс нейтронів з $E_n > 0,5$ МеВ, м ²		
•	13ГV, 13ДV	$46,5 \times 10^{22}$	$44,2 \times 10^{22}$	$42,8 \times 10^{22}$
••	15ЕV, 15ЖV	$44,3 \times 10^{22}$	$43,0 \times 10^{22}$	$42,4 \times 10^{22}$
•••	15ГV, 15ДV	$43,1 \times 10^{22}$	$43,3 \times 10^{22}$	$44,1 \times 10^{22}$
••••	13ЕV, 13ЖV	$43,0 \times 10^{22}$	$44,0 \times 10^{22}$	$45,2 \times 10^{22}$
•••••	14ГV, 14ДV	$42,0 \times 10^{22}$	$41,8 \times 10^{22}$	$42,3 \times 10^{22}$
••••••	14ЕV, 14ЖV	$44,8 \times 10^{22}$	$42,9 \times 10^{22}$	$41,8 \times 10^{22}$

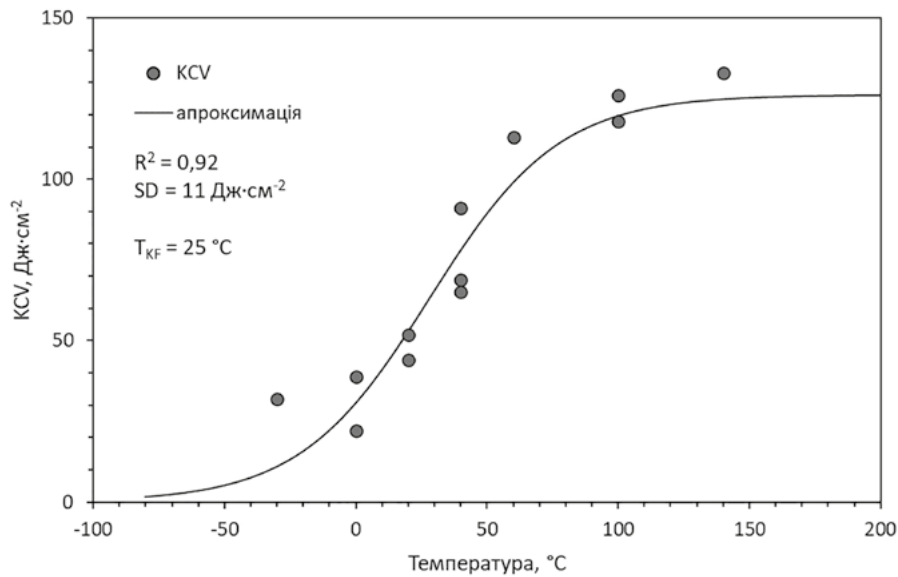


Рисунок 18 – Температурна залежність ударної в’язкості металу зварного шва КР енергоблока № 1 ПАЕС (модернізована збірка 5Л2)

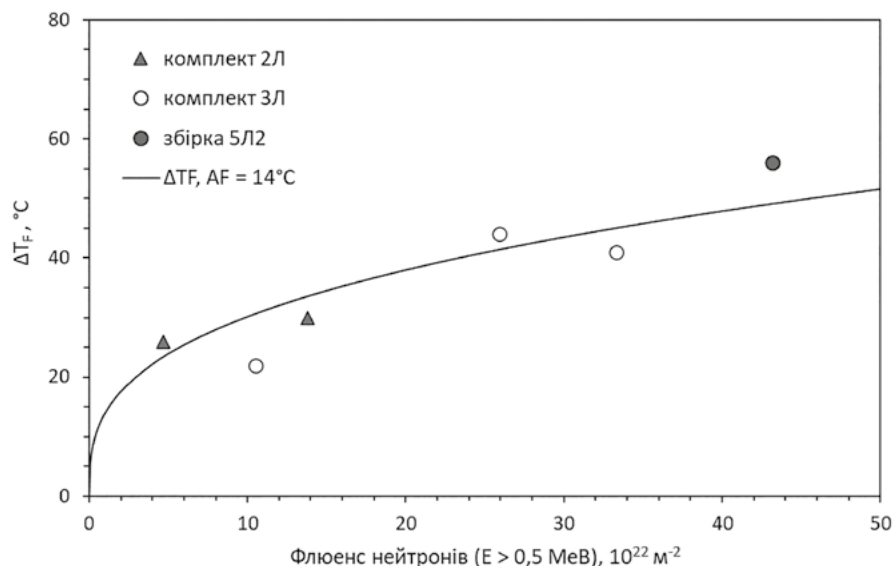


Рисунок 19 – Залежність зсуву критичної температури крихкості від флюенсу нейтронів для металу зварного шва КР енергоблока № 1 ПАЕС (модернізована збірка 5Л2)

критичної температури крихкості [8]. Отже, виконану за результатами випробувань оцінку ΔT_f можна вважати достовірною за критеріями кількості зразків у групі і однорідності опромінення. У цьому разі рівномірно опромінену групу штатних зразків отримано як результат модернізації однорядної КЗ.

Для штатних збірок існує проблема неоднорідності умов опромінення ЗС. Ця проблема зумовлена невдалою конструкцією КЗ, де зразки накопичують різний флюенс нейтронів. Унаслідок неоднорідності опромінення розкид флюенсу нейтронів від середнього значення у групі зразків Шарпі може досягати $\pm 30\%$. Такий розкид у разі перевищує нормативні вимоги і тому оцінка окрих-

чування металу КР за результатами випробувань штатних ЗС на ударний вигин розглядається як недостовірна. Досвід модернізації збірки 5Л2 свідчить, що тепер за допомогою нового підходу з’явилася можливість вирівнювати флюенс для штатних зразків Шарпі і тим самими забезпечити відповідність нормативним вимогам щодо надійного визначення перехідної температури T_{KF} опроміненого металу КР.

Визначене за результатами випробувань зразків модернізованої збірки 5Л2 значення ΔT_f було порівняно з іншими даними зі ЗС щодо радіаційного окрихчування металу зварного шва КР енергоблока № 1 ПАЕС (рисунок 19).

Для порівняння були використані достовірні значення ΔT_F для штатних комплектів 2Л і 3Л, отримані завдяки застосуванню технології реконструкції. Групи зразків Шарпі, реконструйовані з половинок випробуваних ЗС штатних комплектів, були підібрані у такий спосіб, щоб розкид флюенсу нейтронів для зразків у групі відповідав нормативним вимогам.

На рисунку 19 видно, що проектна модель радіаційного окрихчування у вигляді функції $\Delta T_F = A_F \cdot F^{1/3}$ (де A_F – коефіцієнт радіаційного окрихчування, F – флюенс нейтронів у одиницях 10^{22} м^{-2}), яка використана для регресійного аналізу, задовільно характеризує експериментальну залежність. Відхилення точки ΔT_F для модернізованої збірки 5Л2 від лінії регресії становить 7°C , що знаходиться в межах температурного запасу $M = 11^\circ\text{C}$, який використовується для оцінки критичної температури крихкості опроміненого матеріалу КР згідно зі стандартом СОУ НАЕК 087:2015 [8]. Аналіз даних свідчить, що значення ΔT_F для модернізованої збірки 5Л2 узгоджуються із результатами попередніх досліджень з погляду закономірності збільшення критичної температури крихкості залежно від флюенсу нейтронів.

Крім того, модернізація однорядної КЗ 5Л2 має ще один важливий результат. Завдяки перевороту контейнерів кришками вниз було досягнуто вирівнювання флюенсів за висотою ЗС. Це означає, що верхні і нижні половинки випробуваних зразків Шарпі (всього 24 штуки) накопичили середній флюенс нейтронів $43,5 \times 10^{22} \text{ м}^{-2}$ з максимальним розкидом 7 %, що практично не відрізняється від флюенсу нейтронів на робочі частини для штатних ЗС. Отже, можна додатково виготовити зразки механіки руйнування із застосуванням технології реконструкції для оцінки зсуву референсної температури T_0 .

Висновки

1. Розроблено низку програм модернізації однорядних КЗ зі ЗС металу КР українських АЕС, призначених для забезпечення контролю стану корпусу у понадпроектний період експлуатації.

2. На конкретному прикладі показано ефективно вирівнювання флюенсу нейтронів у групі штатних зразків Шарпі завдяки виконаній модернізації однорядної КЗ, що дало можливість достовірно оцінити зсув критичної температури крихкості металу шва КР енергоблока № 1 ПАЕС у понадпроектний період експлуатації.

Отже, на практиці доведено ефективність та надійність розроблених програм модернізації однорядних КЗ за умови використання ядерного палива типу ТВЗА.

Список використаної літератури

1. Образцы-свидетели. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1152.75.00.000 ТО. 60 с.
2. Гриценко А. В., Демехин В. Л., Илькович В. В., Буканов В. Н., Васильева Е. Г. Некоторые этапы разработки дополнительной программы образцов-свидетелей для реактора ВВЭР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2011. № 2(50). С. 29-34. doi: 10.32918/nrs.2011.2(50).06.
3. Рабочая программа модернизации однорядных облучаемых контейнерных сборок с образцами-свидетелями металла корпуса реактора энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС ПМ.1.0019.0073. ОП ЮУАЭС. 2012. 22 с.
4. Программа модернизации однорядных контейнерных сборок с образцами-свидетелями металла корпуса реактора энергоблока № 3 ОП ЮУАЭС ПМ.3.0019.0123. ОП ЮУАЭС. 26 с.
5. Программа модернизации облучаемых контейнерных сборок с образцами-свидетелями металла корпуса реактора энергоблока № 2 ОП ЗАЭС 02.РО.00.ПМ.205-14/Н. ОП ЗАЭС. 27 с.
6. Программа модернизации облучаемых контейнерных сборок с образцами-свидетелями металла корпуса реактора энергоблока № 4 ОП ЗАЭС 04.РО.УС.ПМ.276-17/Н. ОП ЗАЭС. 29 с.
7. Типовая программа контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям ПМ-Т.0.03.120-18. ГП «НАЭК «Энергоатом». 2018. 34 с.
8. СОУ НАЕК 087:2015 Инженерная, научная и техническая поддержка. Методика определения радиационного охрупчивания металла корпусов реакторов по результатам испытаний образцов-свидетелей. Киев. 2015. 25 с.
9. Буканов В. Н., Гриценко А. В., Демехин В. Л., Васильева Е. Г., Пугач С. М. Оценка эффективности внедрения технологии реконструкции в практику испытаний образцов-свидетелей. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2005. Т. 8, Вып. 4. С. 20-23.
10. Bukanov V. N., Diemokhin V. L., Grytsenko O. V., Ilkovych V. V., Kasatkin O. G., Pugach A. M., Pugach S. M., Vasylieva O. G. VVER-1000 Pressure Vessel and Surveillance Specimen Dosimetry for Lifetime Extension in Ukraine. *International Nuclear Safety Journal*. 2015. Vol. 4, No. 1. pp. 11-17. URL: www.nuclearsafety.info/international-nuclear-safety-journal/index.php/INSJ/article/view/52/pdf.
11. Реализация комплекса работ по модернизации однорядных контейнерных сборок с образцами-свидетелями металла корпуса реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС: Отчет по этапу № 8 / ИЯИ НАН Украины. Инв. № 340/38-194. К., 2016. 43 с.
12. Реализация комплекса работ по модернизации однорядных контейнерных сборок с образцами-свидетелями металла корпуса реактора энергоблока №1 ОП ЮУАЭС: Отчет по этапу № 9 / ИЯИ НАН Украины. Инв. № 340/38-201. Київ, 2016. 25 с.
13. СОУ 73.1-23724640-001-2011 Система якості. Дозиметрія зразків-свідків металу корпусу реактора ВВЕР-1000 / ІЯД НАНУ. К., 2011. 30 с.

14. Пугач О. М., Пугач С. М., Демьохін В. Л., Буканов В. М., Гриценко О. В. Похибка визначення флюенсу швидких нейтронів на зразки-свідки металу корпусу реактора ВВЕР. *Ядерна фізика та енергетика*. 2021. Т. 22, № 1. С. 42-47. doi: 10.15407/jnpae2021.01.042.

15. Випробування зразків-свідків модернізованої збірки 5Л2 металу КР енергоблока № 1 ВП ЮУАЕС: Звіт за етапом 3 / ІЯД НАН України. Інв. № 340/38-351. К., 2021. 33 с.

12. Implementation of a set of activities on the modernization of single-row container assemblies with surveillance specimens of the reactor pressure vessel metal of the SUNPP Unit 1. Report on stage No. 9/INR NAS of Ukraine, No. 340/38-201, Kyiv, 2016, 25 p.

13. SOU 73.1-23724640-001-2011. Quality system. Dosimetry of the surveillance specimens of VVER-1000 reactor vessel metal. Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2011, 30 p.

14. Pugach, O., Pugach, S., Diemokhin, V., Bukanov, V., Grytsenko, O. (2021). Uncertainty determination of fast neutron fluence onto WVER pressure vessel metal surveillance specimens. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 22 (1), 42 – 47. doi: 10.15407/jnpae2021.01.042.

15. RPV metal surveillance specimens testing of the modernized assembly 5L2 of the SUNPP Unit 1. Report on stage 3/INR NAS of Ukraine, No. 340/38-351, Kyiv, 2021, 33 p.

References

1. Surveillance specimens. Technical description and instruction for use. 1152.75.00.000 TO, 60 p.

2. Grytsenko, O., Diemokhin, V., Ilkovich, V., Bukanov, V., Vasylieva, O. (2011). Some development stages of the additional surveillance program for WVER-1000 reactor. *Nuclear and Radiation Safety*, 2(50), 29–34. doi: 10.32918/nrs.2011.2(50).06.

3. Working modernization program for single-row irradiated container assemblies with surveillance specimens of reactor pressure vessel metal of SUNPP Unit 1 PM.1.0019.0073. SUNPP, 2012, 22 p.

4. Modernization program for single-row container assemblies with surveillance specimens of reactor pressure vessel metal of SUNPP Unit 3 PM.3.0019.0123. SUNPP, 26 p.

5. Modernization program for irradiated container assemblies with surveillance specimens of reactor pressure vessel metal of ZNPP Unit 2 02.PO.00.PM.205-14/H. ZNPP, 27 p.

6. Modernization program for irradiated container assemblies with surveillance specimens of reactor pressure vessel metal of ZNPP Unit 4 04.PO.YC.PM.276-17/H. ZNPP, 29 p.

7. Standard program of monitoring the properties of VVER-1000 reactor pressure vessels metal using surveillance specimens PM-T.0.03.120-18. NNEGC "Energoatom", 2018, 34 p.

8. SOU NAEK 087:2015. Methodology for radiation embrittlement determination of the reactor pressure vessel metal based on the surveillance specimen test results. Kyiv, 2015, 25 p.

9. Bukanov, V., Grytsenko, O., Diemokhin, V., Vasylieva, E., Pugach, S. (2005). Efficiency estimation of reconstruction technology implementation into surveillance specimens testing. *Nuclear and Radiation Safety*, 4, 20–23.

10. Bukanov, V., Diemokhin, V., Grytsenko, O., Ilkovich, V., Kasatkin, O., Pugach, A., Pugach, S., Vasylieva, O. (2015). VVER-1000 pressure vessel and surveillance specimen dosimetry for lifetime extension in Ukraine. *International Nuclear Safety Journal*, 4(1), 11-17. Retrieved from: www.nuclearsafety.info/international-nuclear-safety-journal/index.php/INSJ/article/view/52/pdf

11. Implementation of a set of activities on the modernization of single-row container assemblies with surveillance specimens of the reactor pressure vessel metal of the SUNPP Unit 1. Report on stage No. 8/INR NAS of Ukraine, No. 340/38-194, Kyiv, 2016, 43 p.

Implementation of the First Stage Modernization for Single-Row Container Assemblies with Surveillance Specimens of VVER-1000 Reactor Pressure Vessel Metal of SUNPP Unit 1

O. Grytsenko, V. Bukanov, V. Diemokhin, O. Pugach, O. Vasylieva, V. Revka, L. Chyrko, O. Trygubenko, Yu. Chaikovskiy

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

A mandatory condition for the operation of the VVER-1000 reactor is to monitor pressure vessel metal state throughout its lifetime. The regular surveillance specimens program allows monitoring pressure vessel state only during the design lifetime. Therefore, in order to provide materials research support for pressure vessel operation within lifetime extension, modernization programs for single-row container assemblies with surveillance specimens of reactor pressure vessel metal from Ukrainian VVER-1000 NPPs have been developed.

The idea of the modernization is to transfer the containers with surveillance specimens to the lower row level of the regular two-row assembly with a rotation by 180°. This provides approximately 2.5 times advanced irradiation of the surveillance specimens in comparison with pressure vessel's level and equalizing fast neutron fluences between the specimens in order to select representative groups for testing.

The first stage of the modernization program for single-row container assemblies of SUNPP-1 reactor envisages modernization of the 5L2 assembly with specimens of weld metal No. 3. It was unloaded after the 28th fuel campaign, modernized and returned to the reactor after the 29th campaign. In addition, three metrological assemblies with an extended set of neutron flux indicators were loaded into the reactor as a part of the dosimetric experiment to study neutron field characteristics at the locations of surveillance specimens of the regular program.

After the end of the 35th fuel campaign, the modernized 5L2 assembly was unloaded from the reactor and sent to the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, where it was disassembled and fast neutron fluences accumulated by each specimen were determined. In addition, based particularly on the data of the dosimetric experiment, fluence determination uncertainties were evaluated.

After irradiation of the modernized container assembly, 12 regular Charpy specimens with close fluences that significantly exceed the fluence on pressure vessel were obtained. This, in turn, allowed us to test it for impact bending in compliance with all regulatory requirements and to perform a reliable evaluation of the critical temperature shift of the brittleness for weld metal No. 3 of the SUNPP-1 reactor pressure vessel for lifetime extension period.

Keywords: container assembly, critical temperature shift of the brittleness, lifetime extension period, neutron fluence, reactor pressure vessel, surveillance specimens, VVER-1000.

Отримано 05.06.2022