

О. В. Гриценко¹, В. М. Буканов¹, О. Г. Васильєва¹, В. Л. Демьохін¹, О. М. Пугач^{1*},
В. М. Ревка¹, О. В. Тригубенко², Е. М. Чалий², Ю. В. Чайковський¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Філія «Відокремлений підрозділ «Науково-технічний центр»

акціонерного товариства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», Київ, Україна

*Відповідальний автор: o.m.pugach@gmail.com

МОДЕРНІЗОВАНА ПРОГРАМА ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ МЕТАЛУ КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-1000 ЕНЕРГОБЛОКА АЕС УКРАЇНИ^а

Важливим джерелом інформації про зміну властивостей металу корпусу водо-водяного енергетичного реактора в процесі експлуатації є програма зразків-свідків металу корпусу реактора. Штатна програма, яка виконується на енергоблоках АЕС України забезпечує матеріалознавчий супровід безпечної експлуатації корпусу ВВЕР-1000 до закінчення проектного терміну служби. Тому нормативні документи, діючі в атомно-енергетичному комплексі України, вимагають розробки і реалізації додаткових програм зразків-свідків, які б, насамперед, забезпечували випереджаюче опромінення зразків-свідків порівняно з корпусом реактора. Для вирішення цієї задачі розроблені програми модернізації одноярусних контейнерних збірок зі зразками, які опромінюються на штатних місцях у реакторах ВВЕР-1000. Перехід АЕС України на використання палива виробництва компанії “Westinghouse” призвів до необхідності доопрацювання цих програм. Станом на сьогодні одну з програм модернізації одноярусних контейнерних збірок реалізовано на одному з енергоблоків з реактором ВВЕР-1000.

Ключові слова: ВВЕР-1000, контейнерна збірка, корпус реактора, програма зразків-свідків, понадпроектний період, паливо виробництва компанії “Westinghouse”, флюєнс нейтронів.

1. Вступ

Безпека експлуатації реакторної установки головним чином залежить від надійності захисних бар'єрів, що перешкоджають виходу продуктів реакції поділу в навколишнє середовище. Для реакторів ВВЕР таким захисним бар'єром є корпус реактора (КР). Тому контроль стану металу КР є важливою складовою забезпечення безпечної експлуатації реакторної установки протягом як призначеного терміну служби, так і в понадпроектний період.

В умовах експлуатації АЕС важливим джерелом інформації про стан матеріалів КР є програма зразків-свідків (ЗС) [1].

Дослідження з використанням технології реконструкції ЗС, що опромінювалися в двоярусних контейнерних збірках (КЗ), надають інформацію про зміну властивостей металу КР, яка забезпечує супровід безпечної експлуатації корпусу до закінчення проектного терміну. Разом з тим, штатна програма ЗС не в змозі забезпечити матеріалознавчий супровід експлуатації КР в понадпроектний період. У зв'язку з цим, нормативні документи, що діють в атомно-енергетичному комплексі України [2] вимагають розробки і реалізації додаткових програм, які б, насамперед, забезпечували випереджаюче опромінення ЗС порівняно з КР.

Спеціалістами Інституту ядерних досліджень (ІЯД) НАН України розроблено оригінальний підхід до вирішення цієї проблеми, що базується на модернізації одноярусних контейнерних збірок із ЗС, які зараз опромінюються в реакторах ВВЕР-1000 АЕС України [3]. З використанням цього підходу Державною інспекцією ядерного регулювання (Держатомрегулювання) України розроблено та погоджено програми модернізації одноярусних КЗ для ряду енергоблоків АЕС України.

Дослідження ЗС металу КР ВВЕР-1000 енергоблоку № 1 Південноукраїнської АЕС модернізованої КЗ 5Л2 показали ефективність розроблених програм за умови використання ядерного палива типу ТВЗА російського виробництва [4]. У зв'язку зі збройною агресією з боку РФ проти України АТ «НАЕК «Енергоатом» прийнято рішення відмовитися від закупівель ТВЗА і повністю перейти до використання на АЕС України палива виробництва компанії “Westinghouse” (паливні збірки ТВЗ-WR).

Конструкційні особливості ТВЗ-WR знижують густину потоку нейтронів приблизно у 2,4 раза в місцях розташування ЗС, що ставить під сумнів положення розроблених програм модернізації одноярусних КЗ.

© Автор(и), 2026

Стаття опублікована ІЯД НАН України за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC 4.0

^а Представлено на XXXII Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 26–30 травня 2025 р.

У роботі [5] детально проаналізована зазначена проблема і показана необхідність вдосконалення схеми модернізації штатних одноярусних КЗ із ЗС. При цьому вказано на важливість перед початком модернізації КЗ проведення на кожному енергоблоці дозиметричного експерименту з метою отримання даних стосовно характеристик поля нейтронів у місцях розташування ЗС у реакторі.

2. Основні положення схеми модернізації одноярусних КЗ

Коротко нагадаємо основні положення базової схеми модернізації одноярусних КЗ [3].

Відповідно до СОУ НАЕК 087:2023 [6] значення накопиченого кожним зразком флюенсу нейтронів з $E_n > 0,5 \text{ MeV}$ ($\Phi_{0,5}$) у підібраній для випробувань представницькій групі, яка має складатися із щонайменше 12 ЗС, може відрізнитися від середньогрупового в межах, що не перевищують $\pm 10\%$ (як виняток, допускається до $\pm 15\%$). У подальшому максимальний флюенс нейтронів, отриманий за таких умов, будемо називати обґрунтованим.

Суть ідеї модернізації одноярусних КЗ у межах штатної програми, яка викладена в роботі [3], полягає в перенесенні контейнерів із ЗС на рівень нижнього ярусу з поворотом на 180° . За умови використання ядерного палива типу ТВЗА це повинно було забезпечити випереджаюче приблизно в 2,5 рази порівняно з корпусом опромінення ЗС та вирівнювання флюенсів між зразками з метою підбору представницьких груп ЗС для випробувань.

Виходячи із потреб матеріалознавчого супроводу безпечної експлуатації КР, під час модернізації збірок передбачалося виконання додаткових дій, детально викладених у роботі [3].

Конструктивні допуски на виготовлення внутрішньокорпусних пристроїв реактора можуть спричинити зміну швидкості опромінення ЗС у межах $\pm 20\%$. Отже, дозиметричні експерименти проводять для отримання інформації про умови опромінення зразків у кожному конкретному реакторі.

Результати дозиметричного експерименту та параметри реальних паливних кампаній повинні використовуватися для регулярного уточнення строків вивантаження КЗ з реактора для модернізації та після доопромінення для випробувань.

3. Вдосконалена схема модернізації одноярусних КЗ

Базова програма модернізації одноярусних КЗ передбачає доопромінення модернізованих збірок

у реакторі до моменту вирівнювання флюенсів між зразками. Це автоматично означає, що середні флюенси, накопичені ЗС до та після модернізації, будуть приблизно однаковими. Інакше кажучи, сумарний флюенс буде тим більший, чим пізніше штатні збірки буде вивантажено з реактора для модернізації, але в строк, який дає змогу вчасно доопромінити модернізовані КЗ, тобто до моменту накопичення КР обґрунтованого флюенсу з урахуванням часу на випробування ЗС (1–2 паливні кампанії).

Таким чином, викладена у розділі 2 схема модернізації передбачає максимально довге опромінення штатних КЗ, що в умовах використання ТВЗ-WR є неприпустимим. Тому модернізація штатних КЗ повинна виконуватися щонайшвидше з максимально можливим зсувом ЗС вниз у напрямку активної зони. Крім того, пропонується доповнити базову схему додатковим поворотом модернізованих КЗ на 180° , який здійснюється посередині проміжку часу між моментом вирівнювання накопичених ЗС сумарних флюенсів та вивантаженням КЗ для випробувань. У результаті розбіжність між флюенсами, що виникає в першій половині зазначеного проміжку, компенсується в другій його половині.

Запропонований підхід дає змогу на момент закінчення опромінення суттєво підвищити накопичений ЗС флюенс. Крім того, у разі потреби за рахунок зміни термінів додаткового повороту на 180° можуть бути змінені строки вивантаження модернізованих КЗ для випробувань.

4. Розроблення схеми модернізації одноярусних комплектів 4Л – 6Л енергоблока АЕС України

Враховуючи дозволений Держатомрегулювання України термін експлуатації КР ВВЕР-1000 одного з енергоблоків АЕС України розроблено схему модернізації одноярусних контейнерних збірок комплектів 4Л–6Л.

Схема модернізації може бути дієздатна тільки за умови, що при її розробці досить точно передбачено моменти накопичення корпусом обґрунтованих флюенсів. Таким чином, необхідно спрогнозувати кількість паливних кампаній, протягом яких буде забезпечено матеріалознавчий супровід безпечної експлуатації КР за результатами випробувань ЗС комплектів 4Л–6Л.

При визначенні технічного стану КР Держатомрегулювання України встановлено вимогу враховувати коефіцієнт запасу флюенсу нейтронів на корпус та похибку визначення флюенсів на ЗС. З іншого боку, СОУ НАЕК 087:2023 [6] дозволяє продовження трендових кривих критичних

температур крихкості до значень $\Phi_{0,5}$, які перевищують на 10 % флюенси, обґрунтовані за результатами досліджень ЗС.

Слід уточнити, що коефіцієнт запасу – це міра невизначеності розрахунку флюенсу нейтронів, яка обчислюється відповідно до вимог додатку Е СОУ НАЕК 177:2023 [7] за процедурою, описаною у [8]. При цьому довірча ймовірність того, що реальне значення флюенсу нейтронів на КР не перевищує добуток розрахункового значення флюенсу і коефіцієнта запасу, не нижча за 95 %.

Згідно з розрахунками, проведеними фахівцями ІЯД НАН України коефіцієнт запасу флюенсу нейтронів на межі наплавки і основного металу КР дорівнює 1,18.

Виходячи з оцінок, наведених у [9], похибка визначення флюенсів на ЗС металу КР енергоблока, де здійснена модернізація, становить приблизно 11–12 %.

Згідно з вимогами п. 8.2.8 ПНАЭ Г-7-002-86 [10] похибка визначення накопичених ЗС флюенсів не повинна перевищувати 15 %. Похибка в 11–12 % впевнено задовольняє зазначену вимогу.

Відповідно до положень СОУ НАЕК 087:2023 [6] похибка визначення флюенсів нейтронів на ЗС враховується при оцінці поточної критичної температури крихкості опромінених матеріалів КР.

З урахуванням усього вищевикладеного за допомогою верифікованих програмних комплексів MCPV [11] і MCSS [12] було розраховано схему модернізації одноярусних КЗ комплектів 4Л–6Л ЗС металу КР енергоблока ВВЕР-1000. При цьому слід відзначити таке:

1. Схему розроблено з урахуванням переходу на ядерне паливо компанії “Westinghouse”.

2. Для всіх збірок за винятком 4Л2–4Л5 передбачався майже максимально можливий додатковий зсув контейнерів вниз на 2,8 см.

3. Контейнери збірок з позицій Л3 та Л5 перевертаються кришками вниз, що призводить до зсуву ЗС на 5 мм уверх.

4. Під час визначення параметрів схеми було враховано результати дозиметричного експерименту множенням розрахункових значень $\Phi_{0,5}$ на відношення експериментально отриманих та розрахункових питомих активностей продуктів реакції активації $^{93}\text{Nb}(n, n')^{93\text{m}}\text{Nb}$ [9].

5. У розрахунках моментів накопичення обґрунтованих флюенсів корпусом враховано коефіцієнт запасу 1,18 та можливість екстраполяції трендових кривих зсуву критичної температури крихкості до флюенсів, що на 10 % перевищують флюенси, накопичені ЗС.

6. Під час прогнозування значень флюенсу, що буде обґрунтований у результаті випробувань зразків модернізованих КЗ, проаналізовано флюенси на середині їх нижніх половинок. Показана можливість підбору представницьких груп ЗС, використовуючи технологію реконструкції.

7. Для збірок комплектів 5Л і 6Л передбачено виконання додаткового повороту на 180° , що збільшить сумарний флюенс на ЗС та надасть можливість у разі потреби коригувати строки їх вивантаження для випробувань.

Важливо відзначити, що розраховані терміни вивантаження модернізованих КЗ є попередніми і їх необхідно регулярно уточнювати за результатами моніторингу радіаційного навантаження КР та визначення умов опромінення ЗС.

5. Модернізація штатних одноярусних КЗ із ЗС металу КР ВВЕР-1000

Під час планово-попереджувального ремонту з реактора ВВЕР-1000 енергоблока АЕС України було вивантажено й доправлено до ІЯД НАН України для модернізації штатні КЗ із ЗС комплекту 4Л.

За процедурою, досить детально описаною у роботі [4], збірки 4Л2–4Л5 було розібрано, визначено умови їхнього опромінення та модернізовано (рис. 1–4). Відзначимо, що на модернізовані КЗ нанесено технологічне маркування, необхідне для ідентифікації, коректного розміщення контейнерів у збірках та подальшого завантаження в реактор зі задалегідь визначеною орієнтацією. Далі модернізовані КЗ було доправлено до АЕС та виконано роботи з їх завантаження з поворотом на 180° у штатні місця реактора. Збірки встановлено на штатні місця, як це показано на рис. 5. Крім того, було вивантажено й доправлено до ІЯД НАН України для модернізації штатні КЗ із ЗС комплекту 5Л.



Рис. 1. Модернізована КЗ 4Л2. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

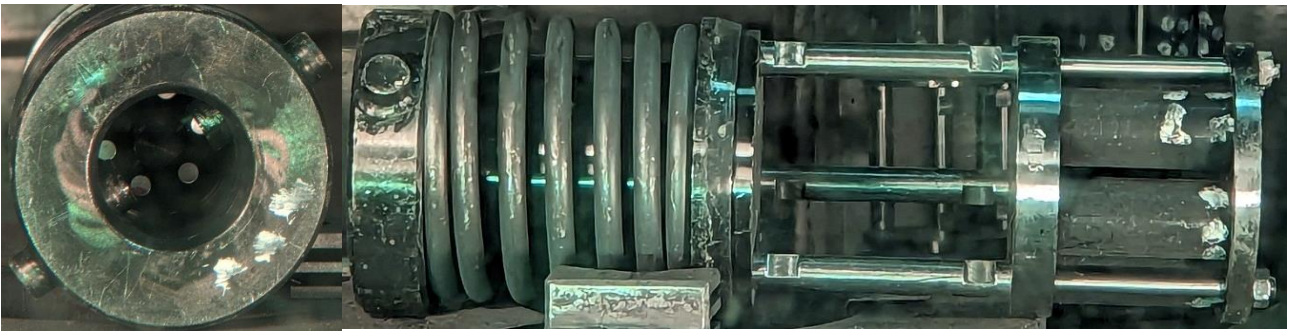


Рис. 2. Модернізована КЗ 4Л3. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

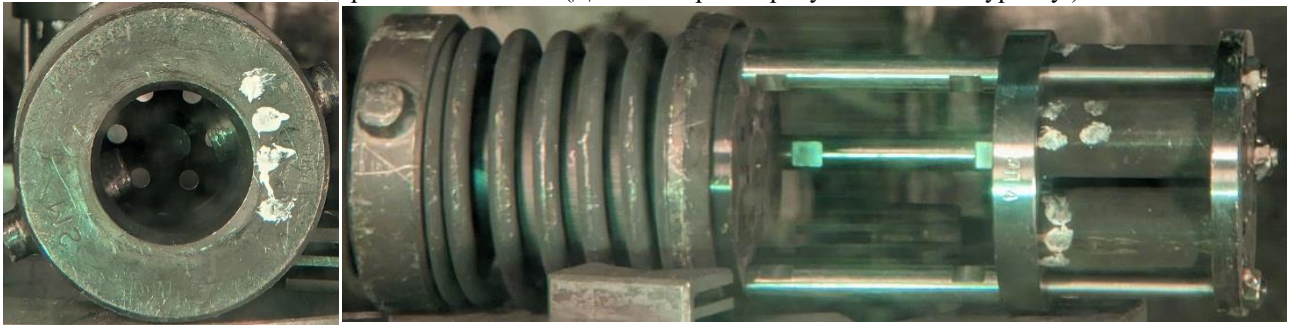


Рис. 3. Модернізована КЗ 4Л4. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

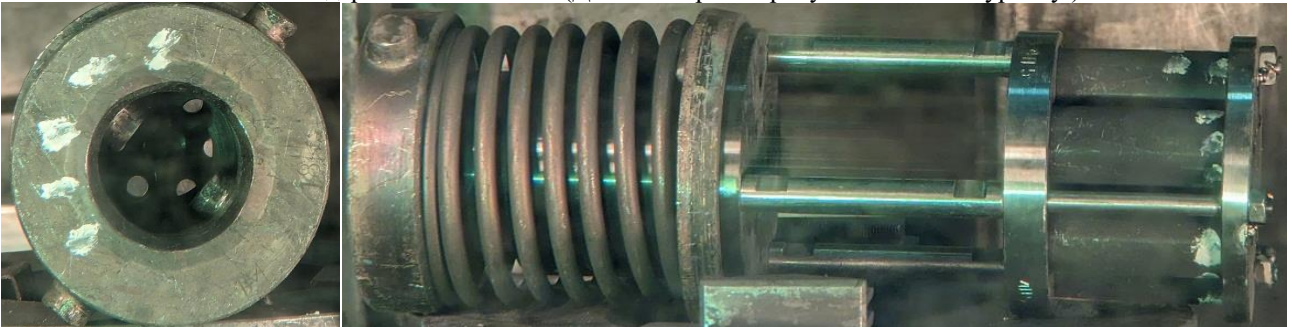


Рис. 4. Модернізована КЗ 4Л5. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

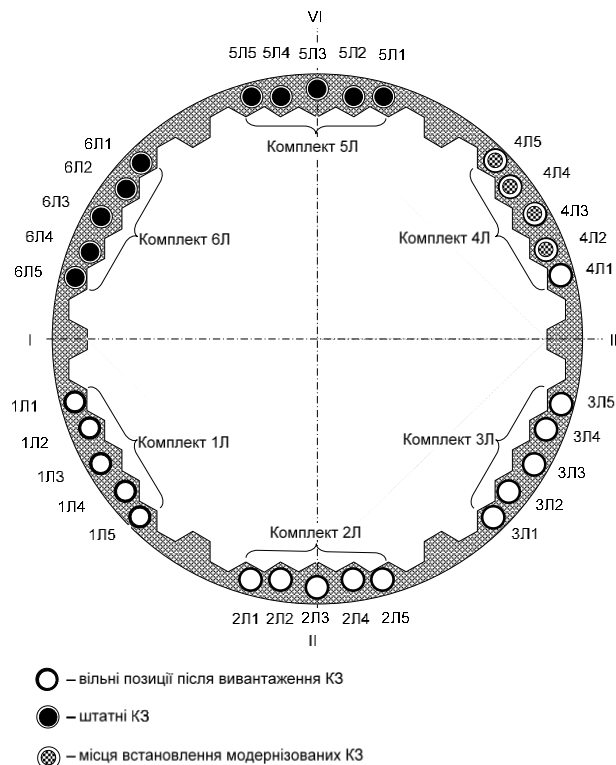


Рис. 5. Схема розміщення КЗ у реакторі ВВЕР-1000.



Рис. 6. Імітатор штатної труби для розміщення КЗ та макет пристрою, призначений для встановлення заданої орієнтації збірки. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Перш ніж встановлювати контейнери із ЗС комплекту 5Л та 4Л1 у модернізовані збірки, було проведено механічні випробування працездатно-

сті їх байонетних механізмів за допомогою імітатора штатної труби для розміщення КЗ на вигородці та макету пристрою, призначеного для встановлення заданої орієнтації збірки відносно центральної осі реактора (рис. 6).

Модернізовані КЗ із ЗС комплекту 5Л та модернізовану збірку 4Л1 (рис. 7–12) було доправлено до АЕС та після закінчення поточної паливної кампанії завантажено з поворотом на 180° у штатні місця реактора. При цьому КЗ із ЗС комплекту 6Л не було вивантажено, оскільки їхню модернізацію було визнано недоцільною внаслідок того, що дослідження зразків комплекту 5Л мають забезпечити досить тривалий матеріалознавчий супровід експлуатації КР. Тим не менш, комплект 6Л слід модернізувати, інакше через певний час у результаті значного відставання від корпусу за швидкістю накопичення флюенсу його буде фактично втрачено для програми ЗС, оскільки, як показує практика, вимоги до матеріалознавчого супроводу з часом посилюються. При цьому не виключено виникнення необхідності в додаткових дослідженнях, які будуть потребувати додаткової кількості ЗС, які накопичили флюенси, що значно перевищують радіаційне навантаження КР.



Рис. 7. Модернізована КЗ 5Л1. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

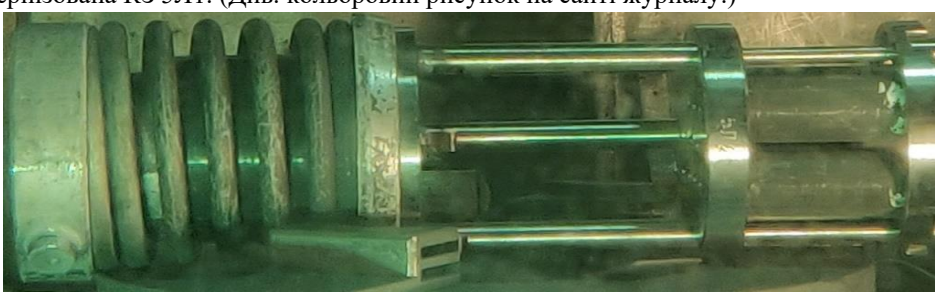


Рис. 8. Модернізована КЗ 5Л2. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

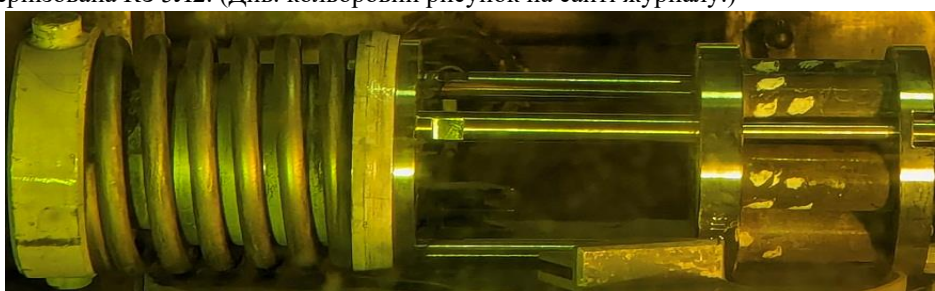


Рис. 9. Модернізована КЗ 5Л3. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)



Рис. 10. Модернізована КЗ 5Л4. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

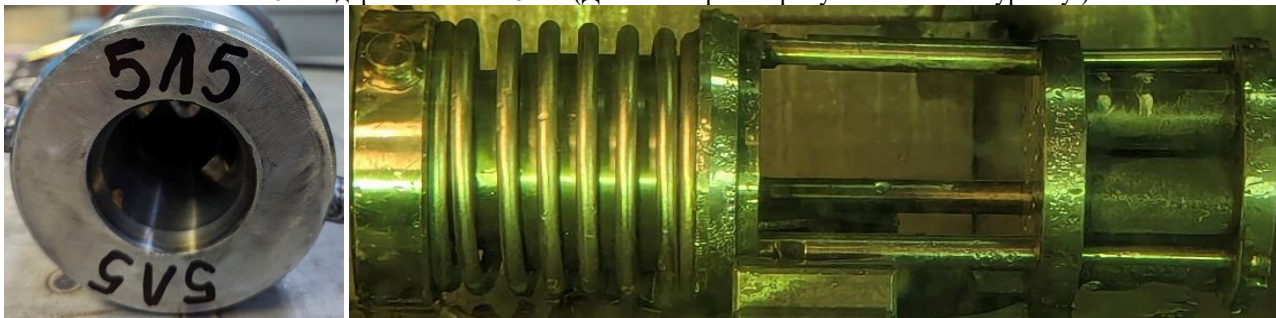


Рис. 11. Модернізована КЗ 5Л5. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

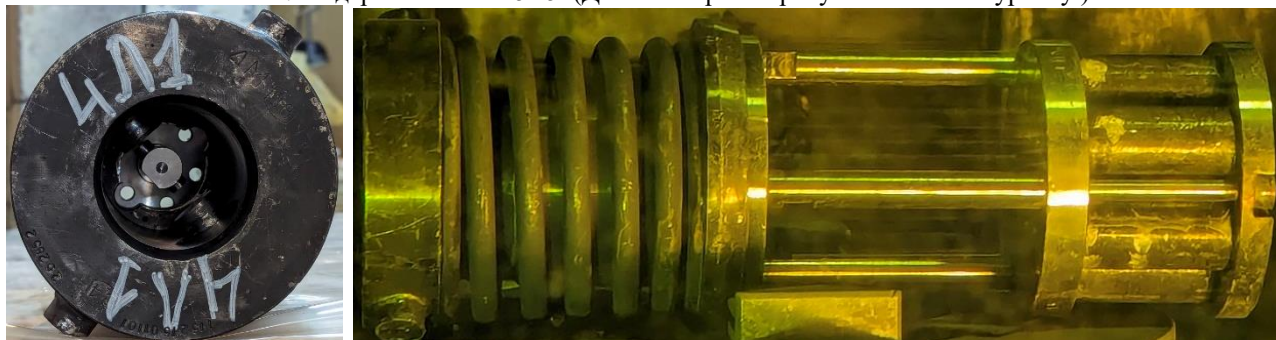


Рис. 12. Модернізована КЗ 4Л1. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

6. Висновки

Перехід українських АЕС на ядерне паливо виробництва компанії “Westinghouse” спричинив різке зниження швидкості опромінення ЗС металу КР ВВЕР-1000, що створило певні труднощі при забезпеченні контролю стану корпусу в понадпроектний період експлуатації.

Запропоновано вдосконалену схему модернізації штатних одноярусних КЗ, яка враховує перехід на ТВЗ-WR та задовольняє вимоги нормативно-технічної документації.

Вдосконалену схему модернізації штатних одноярусних КЗ із ЗС металу КР ВВЕР-1000 реалізовано на одному з енергоблоків АЕС України. Попередня розрахункова оцінка показує, що ЗС комплекту 4Л забезпечують матеріалознавчий супровід безпечної експлуатації КР протягом більше, ніж 65 паливних кампаній, а комплекту 5Л – більше 85 паливних кампаній.

Усі штатні одноярусні КЗ слід модернізувати щонайшвидше з метою забезпечення максимально ефективного та надійного матеріалознавчого супроводу безпечної експлуатації КР у понадпроектний період.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Образцы-свидетели. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1152.75.00.000 ТО. 60 с. / Surveillance specimens. Technical description and operating instructions. 1152.75.00.000 TO. 60 p. (Rus)
2. Типова програма контролю властивостей металу корпусів реакторів ВВЕР-1000 за зразками-свідками ПМ-Т.0.03.120-23 (ДП «НАЕК «Енергоатом», 2023) 39 с. / Standard Program for monitoring
3. А.В. Гриценко и др. Некоторые этапы разработки дополнительной программы образцов-свидетелей для реактора ВВЭР 1000. [Ядерна та радіаційна безпека 2\(50\) \(2011\) 29.](#) / A.V. Gritsenko et al. Some

- stages of developing an additional surveillance specimens program for the VVER-1000 reactor. *Nuclear and Radiation Safety* 2(50) (2011) 29. (Rus)
4. О.В. Гриценко та ін. Реалізація першого етапу модернізації однорядних контейнерних збірок зі зразками-свідками металу корпусу реактора ВВЕР-1000 енергоблока № 1 Південноукраїнської АЕС. *Ядерна та радіаційна безпека* 3(95) (2022) 27. / O. Grytsenko et al. 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. *Nuclear and Radiation Safety* 3(95) (2022) 27. (Ukr)
 5. В.М. Буканов та ін. Формування підходів до реалізації програми зразків-свідків під час впровадження паливних збірок ТВЗ-WR на реакторах ВВЕР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека* 1(101) (2024) 28. / V. Bukanov et al. Development of approaches to surveillance program implementation during the introduction of FA-WR fuel assemblies at VVER-1000 power units. *Nuclear and Radiation Safety* 1(101) (2024) 28. (Ukr)
 6. СОУ НАЕК 087:2023 Інженерна, наукова та технічна підтримка. Методика визначення радіаційного окрихчування металу корпусів реакторів за результатами випробувань зразків-свідків (Київ, ДП «НАЕК «Енергоатом» 2023) 25 с. / Organization Standard of Ukraine NNEGC 087:2023 Engineering, Scientific and Technical Support. Methodology for Determining Radiation Embrittlement of Reactor Pressure Vessel Metals Based on Surveillance Specimen Test Results (Kyiv, State Enterprise National Nuclear Energy Generating Company “Energoatom”, 2023) 25 p. (Ukr)
 7. СОУ НАЕК 177:2023 Інженерна, наукова і технічна підтримка. Методика оцінки крихкої міцності корпусів реакторів ВВЕР (Київ, ДП «НАЕК «Енергоатом», 2023) 45 с. / Organization Standard of Ukraine NNEGC 177:2023 Engineering, Scientific and Technical Support. Methodology for Assessing the Brittle Strength of VVER Reactor Pressure Vessels (Kyiv, State Enterprise “National Nuclear Energy Generating Company “Energoatom”, 2023) 45 p. (Ukr)
 8. В.Л. Демехин и др. Коэффициенты запаса для флюенсов нейтронов при оценке безопасности АЭС. *Ядерна та радіаційна безпека* 1(73) (2017) 30. / V. Diemiokhin et al. Safety factors for neutron fluence in Nuclear Power Plant safety assessment. *Nuclear and Radiation Safety* 1(73) (2017) 30. (Rus)
 9. О.М. Пугач та ін. Похибка визначення флюенсу швидких нейтронів на зразки-свідки металу корпусу реактора ВВЕР. *Ядерна фізика та енергетика* 22(1) (2021) 42. / O.M. Pugach et al. Uncertainty determination of fast neutron fluence onto the WVER pressure vessel metal surveillance specimens. *Nucl. Phys. At. Energy* 22(1) (2021) 42. (Ukr)
 10. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок* (ПНАЭ Г-7-002-86) (Москва: Энергоатомиздат, 1989) 525 с. / Rules for Strength Calculation of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Installations (Rules and Regulations in Nuclear Power Engineering G-7-002-86) (Moskva: Energoatomizdat, 1989) 525 p. (Rus)
 11. *Разработка процедуры верификации методик определения флюенса на стенку КР. Предоставление верификационных отчетов. Ч. 1. Верификация пакета программ МСРВ: Отчет по этапу II НИР НПО «Вектор»* (Київ, 2007) 60 с. / Development of a Verification Procedure for Methodologies Used to Determine Reactor Pressure Vessel Wall Fluence. Submission of Verification Reports. Part 1. Verification of the MCPV Software Package: Report on Stage II of the Research Project of Scientific and Production Association “Vector” (Kyiv, 2007) 60 p. (Rus)
 12. Пакет программ МССС: Верификационный отчет. Ин-т ядерных исслед. НАН Украины. Инв. № 340/38-89 (Київ, 2012) 22 с. / MCSS software package: Verification report. Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine. Inventory No. 340/38 89 (Kyiv, 2012) 22 p. (Rus)

O. V. Grytsenko¹, V. N. Bukanov¹, O. G. Vasylieva¹, V. L. Diemokhin¹, O. M. Pugach^{1*},
V. M. Revka¹, O. V. Trygubenko², E. M. Chalyi², Yu. V. Chaikovskiy¹

¹ Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Affiliate “Separate Subdivision “Scientific and Technical Center”,

Joint Stock Company “National Nuclear Energy Generating Company “Energoatom”, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: o.m.pugach@gmail.com

MODERNIZED SURVEILLANCE PROGRAM OF THE VVER-1000 REACTOR PRESSURE VESSEL METAL OF THE UKRAINIAN NPP UNIT

The surveillance program is an important source of information on the change in the properties of the metal of the water-water power reactor pressure vessel during operation. The regular program carried out at the power units of the Ukrainian NPPs provides material science support for the safe operation of the VVER-1000 pressure vessel until the end of the designated service life. Therefore, regulatory documents in force in the nuclear power industry of Ukraine require the development and implementation of additional surveillance programs, which would, first of all, ensure the earlier irradiation of surveillance specimens compared to the reactor pressure vessel. To solve this problem, the programs for

modernization of single-floor container assemblies with specimens that are irradiated at regular locations in the VVER-1000 reactors have been developed. The transition of Ukrainian NPPs to Westinghouse nuclear fuel requires updating these programs. For now, one of the programs for the modernization of single-floor container assemblies has been implemented at one of the power units with a VVER-1000 reactor.

Keywords: VVER-1000, container assembly, reactor pressure vessel, surveillance program, lifetime extension period, fuel manufactured by the Westinghouse company, neutron fluence.

Надійшла / Received 28.10.2025