

Корозійна стійкість оболонок твелів виробництва компанії «Westinghouse» під час експлуатації в умовах водно-хімічного режиму ВВЕР-1000. Визначення енергії активації корозії цирконієвого сплаву та верифікація розрахункової моделі

- **Зуйок Валерій Анатолійович**, канд. фіз-мат. наук
Науково-технічний комплекс «Ядерний паливний цикл» Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4256-1714>
- **Трет'яков Михайло Віталійович**
Науково-технічний комплекс «Ядерний паливний цикл» Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0062-8984>
- **Рудь Роман Олександрович**
Науково-технічний комплекс «Ядерний паливний цикл» Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків, Україна
- **Куштим Яна Олексіївна**
Науково-технічний комплекс «Ядерний паливний цикл» Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7600-4129>
- **Грицина Віктор Михайлович**
Науково-технічний комплекс «Ядерний паливний цикл» Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4341-007X>
- **Соловйов Юрій Володимирович**
Відокремлений підрозділ «Атомремонтсервіс» Державного підприємства
«Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», м. Славутич, Україна
- **Кулик Євген Ігорович**
Відокремлений підрозділ «Атомремонтсервіс» Державного підприємства
«Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», м. Славутич, Україна

У статті наведено результати комплексу робіт з визначення корозійної стійкості оболонок твелів тепловидільних збірок виробництва компанії «Westinghouse», виготовлених зі сплаву ZIRLO®, під час експлуатації протягом чотирьох паливних кампаній у реакторах ВВЕР-1000 АЕС України. Отримано та систематизовано масив експериментальних результатів з визначення товщини оксидної плівки за висотою оболонки твелів та показано, що максимальна товщина оксиду після четвертого року експлуатації знаходиться в межах 13...25 мкм. Під час проведення візуального контролю оболонок твелів оцінено їх корозійний стан та встановлено зв'язок зовнішнього вигляду їх поверхні з товщиною оксидної плівки. Отримані результати вимірювань товщини оксидної плівки на поверхні твелів нижче максимальної межі (60 мкм), встановленої на етапі проєктування та під час отримання дозволу на експлуатацію палива в активній зоні, та значно нижче максимальної проєктної межі (<101,5 мкм) для оболонок, виготовлених зі сплаву ZIRLO®. Згідно з результатами вимірювань, проведених на енергоблоці №3 ВП ПАЕС та енергоблоці №5 ВП ЗАЕС, можна стверджувати, що виготовлені зі сплаву ZIRLO® оболонки твелів мають високу корозійну стійкість під час експлуатації в умовах водно-хімічного режиму першого контуру реакторів ВВЕР-1000 АЕС України.

Енергію активації корозії сплаву ZIRLO® визначено на підставі результатів вимірювання товщини оксиду оболонок твелів на енергоблоці № 3 ВП ПАЕС та енергоблоці № 5 ВП ЗАЕС, а також, розрахованих параметрів експлуатації в умовах активної зони ВВЕР-1000. Значення енергії активації корозії сплаву ZIRLO® становить 27280 кал/моль для ВВЕР-1000, що вище, ніж для західних реакторів типу PWR (27080 кал/моль). Це свідчить про вищу корозійну стійкість такого сплаву в реакторах ВВЕР-1000.

Ключові слова: ВВЕР-1000, енергія активації, корозія, сплав ZIRLO®, твел, тепловидільна збірка, товщина оксидної плівки.

© Зуйок В. А., Трет'яков М. В., Рудь Р. О., Куштим Я. О., Грицина В. М., Соловійов Ю. В., Кулик Є. І., 2023

Вступ

На сьогодні в країнах Європейського Союзу (ЄС) та Україні налічується 33 діючих водо-водяних енергетичних реактори (ВВЕР). Забезпечення реакторів АЕС новим ядерним паливом є початковою стадією ядерного паливного циклу, яка багато в чому визначає можливість країн, які експлуатують АЕС, регулювати та розвивати атомну енергетику. Залежність від одного постачальника палива становить великий ризик для цих країн та потенційну небезпеку для сусідніх країн ЄС та України, які імпортують електроенергію. Переважно, світовий ринок ядерного палива представлений щонайменше двома кваліфікованими постачальниками. Це має важливе значення не тільки для забезпечення безпеки, а й задля конкуренції, яка стимулює технологічні вдосконалення та зменшення витрат [1].

На АЕС України з реакторами ВВЕР-1000 експлуатується паливо виробництва російської компанії АТ «ТВЭЛ» (ТВЗА), а з 2005 року дослідно-промислово експлуатується паливо виробництва компанії «Westinghouse» (ТВ3-W/WR). Процес ліцензування ядерного палива нового виробника, щонайменше, передбачає наявність необхідних даних щодо використання всіх конструкційних матеріалів палива цього типу, їх сумісність між собою та з конструкційними матеріалами активної зони. Конструкційні матеріали, які використовують західні виробники палива та внутрішньо-корпусних пристроїв, здебільшого, апробовані в активній зоні реакторів типу

PWR за параметрів водно-хімічного режиму, розробленого для реакторів цього типу.

Водно-хімічний режим першого контуру (ВХР-1) є одним з важливих факторів, які впливають на надійну, економічну та безпечну експлуатацію АЕС. Водна хімія грає важливу роль у процесі рівномірної та ерозійної корозії, корозійного розтріскування під напруженням нержавіючих сталей, переносу активованих продуктів корозії по контуру та їх осадженні на поверхнях устаткування та палива, утворення радіоактивних відходів. З дня введення в експлуатацію перших блоків АЕС і дотепер залишається актуальною задача створення і підтримання таких фізико-хімічних властивостей теплоносія, які запобігають або послаблюють вплив корозійних явищ [2].

У теплоносії першого контуру (ТПК) на АЕС України з реакторами ВВЕР застосовується слаболужний відновлювальний аміачно-калієвий ВХР-1 з борним регулюванням реактивності, що забезпечує високу корозійну стійкість конструкційних матеріалів першого контуру та запобігає утворенню відкладів на теплопередавальних поверхнях палива. ВХР-1 реакторів PWR та ВВЕР має певні відмінності (таблиця 1). У ВВЕР для нейтралізації борної кислоти та отримання необхідного рН теплоносія використовується гідроксид калію, на відміну від PWR, де для цього використовується гідроксид літію. Також у реакторах ВВЕР розчинений кисень, що утворюється внаслідок радіолізу води, придушується дозуванням гідроксиду амонію в ТПК ВВЕР та газоподібного водню в ТПК PWR. Підтримання водневого показника ТПК в установлених межах

Таблиця 1 – Специфікація ВХР-1 ВВЕР та PWR [3]-[6]

Параметр	ВВЕР-1000	PWR
Аміак, мг/кг	>5	-
Кисень, мг/кг	<0,005	<0,005
Водень, мг/кг (мл/кг)	2,2 – 4,5 (20-40)	2,3 – 4,6 (25-50)
Сульфати, мг/кг	<0,2	<0,005
Фториди, мг/кг	<0,1	<0,05
Бор, мг/кг	0 – 1250	0 – 1200
Хлориди, мг/кг	<0,05	<0,05
Li мг/кг	-	0,2 – 2,2
Калій, літій, натрій, ммоль/кг	0,05 – 0,35	-
pH (300 °C)	5,8 – 10,3	6,9 – 7,4

необхідно для зменшення швидкості корозійних процесів як щодо конструкційних матеріалів усього першого контуру, так і щодо конструкційних матеріалів тепловидільної збірки (ТВЗ), основним з яких є цирконієвий сплав (оболонка твелів, дистанціонуючі решітки (ДР), направляючі канали).

У ТВЗА виробництва російської компанії АТ «ТВЭЛ» оболонки твелів виготовлені зі сплаву E110, а в ТВЗ-W/WR виробництва компанії «Westinghouse» – зі сплаву ZIRLO®. У літературі немає доступних даних щодо корозійної стійкості сплаву ZIRLO® в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000. Можна припустити, що експлуатація сплаву ZIRLO® в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000 може призвести до збільшення швидкості його корозії та утворення більш товстих оксидних плівок унаслідок більш високої концентрації фторидів та хлоридів.

Товщина оксидної плівки є важливим показником, який характеризує стан оболонки, тому що вона впливає, щонайменше, на механічні характеристики та теплопровідність, а також на наводнення оболонки [7], [8].

За останні роки завдяки інспекції палива на АЕС України за допомогою обладнання стенду інспекції і ремонту палива (СІРП) у Державному підприємстві «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» накопичено масив експериментальних результатів, який дозволяє охарактеризувати корозійну стійкість оболонки зі сплаву ZIRLO® під час експлуатації в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000.

Мета статті – систематизація масиву експериментальних результатів визначення товщини оксидної плівки на оболонці твелів та її розподілу за висотою ТВЗ-W/WR, інспекцію яких проводили на Відокремленому підрозділі «Південноукраїнська АЕС» (ВП ПАЕС) та Відокремленому підрозділі

«Запорізька АЕС» (ВП ЗАЕС) з 2013 по 2021 роки, та визначення корозійної стійкості оболонок твелів зі сплаву ZIRLO® під час експлуатації в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000; визначення енергії активації корозії оболонок зі сплаву ZIRLO® та верифікація розрахунків згідно з відомими розрахунковими моделями.

1 Методи дослідження та оцінки корозійної стійкості оболонок твелів

1.1 Інспекція ядерного палива

На всіх АЕС у світі в період зупинки реактора під час проведення планово-попереджувального ремонту (ППР) виконується низка операцій з контролю стану ТВЗ, зокрема візуальний огляд і зйомка на відеокамеру та контроль герметичності ТВЗ загалом. Крім того, з використанням стендів інспекції проводиться потвельний ультразвуковий або вихрострумний контроль герметичності оболонок, вимірювання геометричних параметрів ТВЗ [9]. Можливості деяких стендів дозволяють після вилучення твелів проводити вимірювання їх довжини та діаметра, вихрострумний контроль, гамма-сканування, вимірювання товщини оксидної плівки (ТОП) на поверхні оболонок. Такий контроль необхідний для оцінки стану ТВЗ та твелів і відповідає вимогам Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) [10]. Також логічним є співставлення отриманих на АЕС результатів з результатами більш детальних досліджень, проведених у захисних камерах, що дозволяє зробити об'єктивний висновок про стан ТВЗ.

Корозійна стійкість оболонок твелів та інших конструкційних елементів ТВЗ залежить від елементного складу, структури та стану їх поверхні,

відхилень водно-хімічного режиму від нормативів, термодинамічних параметрів теплоносія, середнього вигорання по ТВЗ, режимів експлуатації енергоблока АЕС. Експертна оцінка зовнішнього стану оболонок твелів дає досить об'єктивні результати ступеня їх корозійного ураження. Роздільна здатність сучасних засобів візуального контролю дає можливість виконувати обстеження елементів ТВЗ без використання додаткового обладнання, а лише за допомогою штатних засобів енергоблока. Експертна оцінка корозійного стану виробів з цирконієвого сплаву заснована на прямому взаємозв'язку між зовнішнім виглядом оксидних плівок та їх товщиною. Це неодноразово підтверджено результатами прямих вимірювань товщини методом металографії. Для сплаву ZIRLO®, який експлуатується в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000, відсутні дані щодо взаємозв'язку зовнішнього вигляду з товщиною оксиду.

1.2 Оцінка корозійного стану елементів ТВЗ з цирконієвих сплавів за зовнішнім виглядом

Експертна оцінка корозійного стану оболонок твелів використовує зв'язок зовнішнього вигляду їх поверхні з ТОП. У разі збільшення її товщини колір поверхні оболонок стає світлішим: після чорного стає темно-сірим, сірим і так до білого. Це зумовлено утворенням у плівці мікропор та мікротріщин, а також фазовим складом оксидної плівки.

Перед вимірюванням розподілу ТОП по висоті оболонки твелів проводиться зовнішній огляд ТВЗ від головки до хвостовика. У базовому режимі експлуатації ВВЕР окиснення носить фронтальний характер. ТОП у реакторних умовах після експлуатації протягом чотирьох років складає від 5 мкм до 10 мкм [11]-[13]. Переважно, твели зі схожим середнім вигоранням мають приблизно однаковий типовий корозійний стан. Для всіх строків експлуатації ТОП зростає зі збільшенням висотної координати й сягає максимуму на ділянці, яка відповідає місцю розташування верхньої частини паливного осердя [14], [15]. Якість зображень на фотографіях (контрастність, передача світових півтонів, відблисків тощо) залежить від умов освітлення, фотографування та прозорості води. Чіткість зображення також залежить від наявності або відсутності тонкого шару відкладів.

У разі освітлення внутрішньокамерними дже-релами світла, як і в разі денного освітлення, колір поверхні твелів практично відповідає монохромним тонам (без кольорових компонентів). З огляду на це для опису стану поверхні оболонки твелів використовується така градація за ступенем чорноти поверхні: білий, світло-сірий, сірий, темно-сірий та чорний. Під час оцінювання використовується тільки візуальне сприйняття без вимірювання ступеня за допомогою спеціальних приладів [16].

1.3 Вимірювання ТОП на опроміненій оболонці твелів з використанням вихрострумового методу

Існує декілька способів оцінки корозійної стійкості цирконієвих матеріалів за товщиною оксидної плівки, які умовно можна поділити на руйнівні та неруйнівні. Під час лабораторних досліджень корозії будь-яких матеріалів найбільш часто застосовують неруйнівний метод (зміна маси по відношенню до площі зразка після певного часу автоклавних випробувань) та руйнівний метод (металографічне визначення товщини оксидної плівки). Перший спосіб не є прийнятним для визначення навіть середньої товщини оксиду, оскільки в умовах басейну витримки (БВ) неможливо визначити зміну маси опроміненого твела. Для реалізації другого способу необхідна наявність гарячих камер для роботи з опроміненим паливом.

З метою здійснення контролю технічного стану палива, передбаченого програмою ліцензування палива ТВЗ-W/WR під час його впровадження на АЕС України, компанією «Westinghouse» було спроектовано та виготовлено СІРП, який дозволяє проводити інспекцію та ремонт негерметичного палива.

До складу СІРП входить система вимірювання товщини оксиду, призначена для вимірювання ТОП на оболонці периферійних твелів ТВЗ або на твелах, вилучених з ТВЗ. Вимірювання ТОП здійснюється вихрострумовим методом. Вимірювальна система дозволяє проводити вимірювання ТОП в інтервалі від 0 до 105 мкм з точністю ± 5 мкм. Процес проведення вимірювання ТОП на периферійних твелах по всій їх висоті здійснюється програмно та контролюється відеокамерою. Калібрування системи вимірювання ТОП здійснюється за допомогою еталонних зразків, ТОП яких відома. У набір еталонних зразків входить неокислений зразок та 5 зразків з різною ТОП: 12,4 мкм; 26,1 мкм; 49,2 мкм; 75,9 мкм та 98,9 мкм.

Без розбирання ТВЗ та без вилучення твелів система вимірювання ТОП СІРП дозволяє проводити вимірювання на ділянці твелів між сусідніми ДР по всій висоті ТВЗ. Програмне забезпечення в комбінації з системою переміщення забезпечують вимірювання ТОП при постійній швидкості переміщення вихрострумового зонду в інтервалі від 0,5 мм/с до 5,0 мм/с на ділянці між сусідніми ДР, що дає можливість отримати велику кількість результатів вимірювання, які потім доцільно об'єднувати в групи з необхідним шагом по висоті ТВЗ.

Загальну схему проведення вимірювань ТОП зображено на рисунку 1. Вихрострумовий зонд притискається до поверхні оболонки твелів. Збудлива котушка зонду ініціює вихрові струми в оболонці, а котушка, що приймає, реєструє амплітуду прийнятого сигналу, який пропорційний відстані від зонду до електропровідної поверхні оболонки.

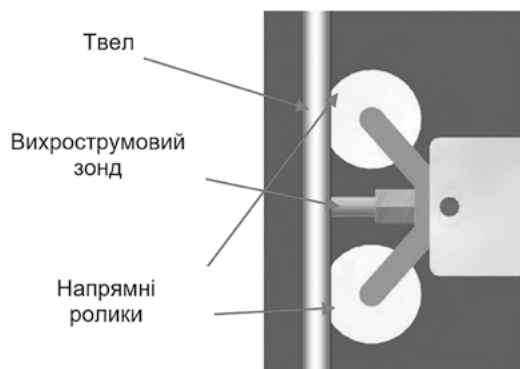


Рисунок 1 – Схема проведення вимірювання ТОП оболонці твелів за допомогою обладнання СІРП

Оскільки матеріал оксидного шару ZrO_2 не є електропровідним, то амплітуда прийнятого сигналу пропорційна ТОП. Амплітуда вихрових струмів залежить від відстані між котушкою та електропровідною поверхнею оболонки. За умови щільного прилягання датчика (зонда) до оболонки твелів, відстань від котушки до оболонки є вимірюваним параметром і є фізичною ТОП на оболонці з урахуванням товщини відкладів на ній. Якщо в процесі вимірювання ТОП на поверхні твелів спостерігаються відклади, то вони можуть вплинути на результати. Здебільшого, за весь строк експлуатації ТВЗ в активній зоні ВВЕР-1000, відклади або зовсім відсутні, або їх товщина мінімальна і не може значно вплинути на точність вимірювань ТОП.

2 Основні узагальнені результати

2.1 Корозія оболонок твелів ядерного палива виробництва компанії «Westinghouse» під час експлуатації в активній зоні енергоблока № 3 ВП ПАЕС

Наведено результати візуального контролю зовнішнього вигляду ТВЗ ВА2014 та вимірювання розподілу ТОП по всій висоті двох периферійних твелів ТВЗ ВА2014 та двох периферійних твелів ТВЗ ВА2214. ТВЗ проходили інспекцію під час ППР-2019 після чотирьох років експлуатації в активній зоні енергоблока № 3 ВП ПАЕС. Згідно з планом інспекції, в умовах БВ проведено експертну оцінку зовнішнього вигляду поверхні периферійних твелів усіх граней по всій висоті ТВЗ. Фотографії відеокадрів, що мають найбільш виражений типовий вигляд твелів залежно від висотної координати, наведено на рисунках 2–5.

Результати візуального контролю ТВЗ ВА2014 показали, що після четвертого року експлуатації, починаючи від нижньої частини пучка твелів до ДР2, поверхня оболонок твелів має темно-сірий однотонний колір. Починаючи з ДР2 на поверхні оболонок твелів спостерігаються поодинокі дрібні слабкоконтрастні хаотично розташовані світло-

сірі оксидні плями, кількість та розмір яких зростає зі збільшенням висотної координати (рисунок 2). Середня виміряна ТОП на цій висотній ділянці ТВЗ не перевищувала 5 мкм.

На висотній координаті, що відповідає розташуванню ДР5, світло-сірі оксидні плями ще більше укрупнюються і починають зливатися між собою. Спостерігається приблизно однакова відбивна здатність поверхні плям і зон поза ними (рисунок 3). Середня виміряна ТОП на цій висотній ділянці знаходилася в межах від 7 мкм до 10 мкм.

Починаючи з ДР10, ділянки окремих твелів, а на деяких гранях і вся поверхня оболонки твелів, стають суцільного сіро-білого кольору, що є результатом злиття і перекриття плям (рисунок 4). Середня виміряна ТОП знаходилася в межах від 12 мкм до 15 мкм.

Починаючи з висотної координати вище ДР14, поверхня твелів стає суцільного сіро-білого кольору (рисунок 5).

Поверхня оболонок твелів має високу відбивну здатність по всьому периметру ТВЗ і трохи послаблюється зі збільшенням висотної координати. Характер зміни зовнішнього вигляду оксиду залежно від висотної координати (кількість оксидних плям, розміри, зміна кольору, розмітання кордонів тощо) відповідає корозійному стану оболонок після четвертого року експлуатації в активній зоні. Білі смуги, утворені внаслідок відбиття світла, йдуть безперервно вздовж осової лінії твелів. Середня виміряна ТОП знаходилася в межах від 10 мкм до 12 мкм.

Проведено вимірювання розподілу ТОП по всій висоті твелів на оболонках чотирьох периферійних твелів. На рисунку 6 зображено залежність ТОП на поверхні оболонок двох твелів ТВЗ ВА2014 та двох твелів ТВЗ ВА2214 після четвертого року експлуатації від висотної координати ТВЗ. Середня глибина вигорання ТВЗ ВА2014 становила 43693 МВт·доб/тУ, ТВЗ ВА2214 – 43975 МВт·доб/тУ.

Результати наведено в масштабі до 60 мкм, оскільки це значення є максимальним розрахованим на кінець чотирирічного паливного циклу для оболонок зі сплаву ZIRLO®. Для оболонок твелів ТВЗ компанії «Westinghouse», виготовлених зі сплаву ZIRLO®, виконання теплофізичних та механічних критеріїв забезпечується за товщини оксидної плівки, яка не перевищує 101,5 мкм у межах проектного строку експлуатації.

Згідно з рисунком 6 ТОП змінюється залежно від висотної координати твелів. Максимальна товщина оксиду фіксується у верхній частині ТВЗ, але профіль розподілу товщини по висоті твелів може бути різний як для різних ТВЗ, так і для різних твелів однієї ТВЗ. Вірогідно, це може бути пов'язано з профілем енерговиділення, який для периферійних твелів, а саме для них були проведені вимірювання, може відрізнитися від розрахункового.



між ДР1 та ДР2



між ДР2 та ДР3

Рисунок 2 – Зовнішній вигляд оболонок твелів ТВЗ ВА2014, грань № 3

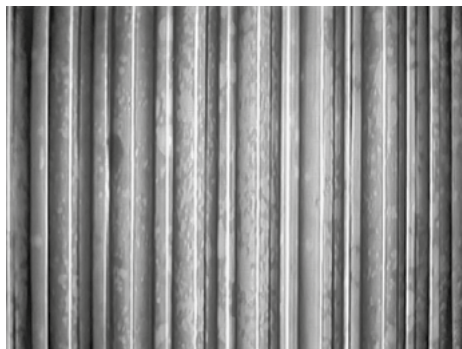


між ДР5 та ДР6

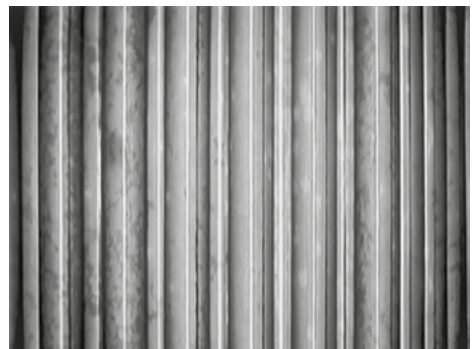


між ДР6 та ДР7

Рисунок 3 – Зовнішній вигляд оболонок твелів ТВЗ ВА2014, грань № 3



між ДР10 та ДР11

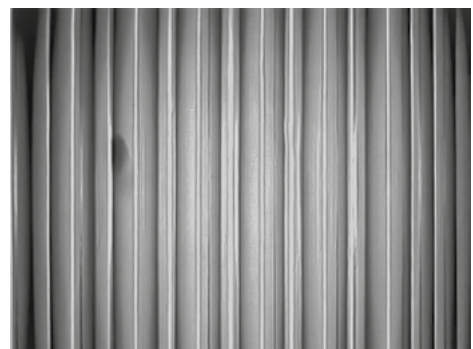


між ДР11 та ДР12

Рисунок 4 – Зовнішній вигляд оболонок твелів ТВЗ ВА2014, грань № 3



між ДР14 та ДР15



між ДР15 та ДР16

Рисунок 5 – Зовнішній вигляд оболонок твелів ТВЗ ВА2014, грань № 3

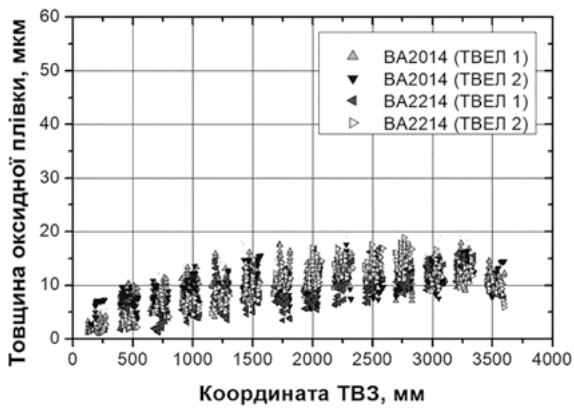


Рисунок 6 – Розподіл ТОП по висоті чотирьох інспектованих твелів двох ТВ3 після четвертого року експлуатації

Після усереднення отриманих значень ТОП одного проміжку між ДР та між сусідніми ДР можна отримати середній профіль розподілу ТОП для твелів (рисунок 7). Для двох твелів ТВ3 ВА2014 профіль без чітко вираженого максимуму, тоді як для двох твелів ТВ3 ВА2214 – з чітко вираженим максимумом у верхній частині ТВ3.

2.2 Корозійна стійкість оболонок твелів ядерного палива виробництва компанії «Westinghouse» під час експлуатації в активній зоні енергоблока № 5 ВП ЗАЕС

Наведено результати візуального контролю зовнішнього вигляду ТВ3 ВС2216 та вимірювання розподілу ТОП по всій висоті двох периферійних твелів ТВ3 ВА2216 та двох периферійних твелів ТВ3 ВА0316. ТВ3 проходили інспекцію під час ППР-2021 після чотирьох років експлуатації в активній зоні енергоблока № 5 ВП ЗАЕС.

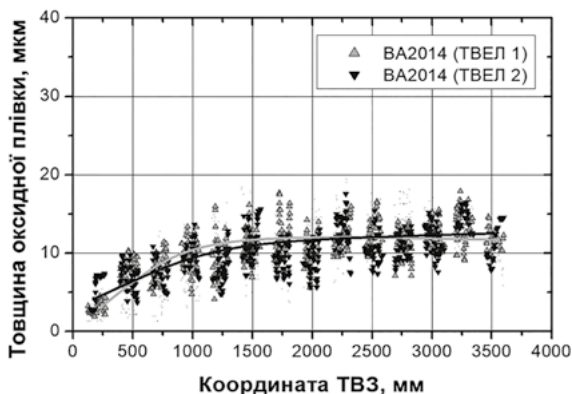
Результати візуального обстеження ТВ3 показали, що характер зміни зовнішнього вигляду оболонок твелів схожий з результатами, отриманими під час інспекції палива на енергоблоці № 3 ВП ПАЕС. Після четвертого року експлуатації, починаючи від нижньої частини пучка твелів і до ДР2, поверхня

оболонок твелів має темно-сірий однотонний колір і спостерігаються дрібні слабкоконтрастні, хаотично розташовані світло-сірі плями, кількість та розмір яких збільшується зі збільшенням висотної координати.

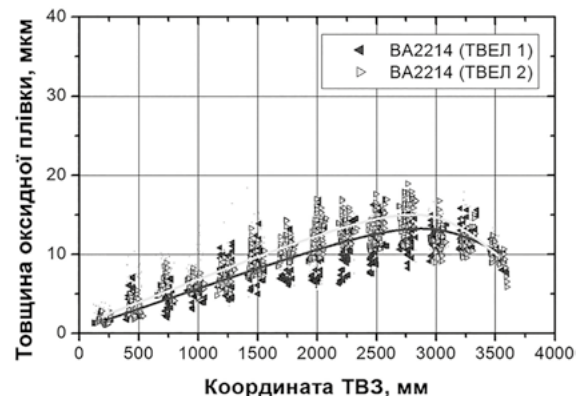
Проведено вимірювання розподілу ТОП по всій висоті твелів на оболонках чотирьох периферійних твелів. На рисунку 8 зображено залежність ТОП на поверхні оболонки двох твелів ТВ3 ВС2216 та двох твелів ТВ3 ВС0316 після четвертого року експлуатації від висотної координати ТВ3. Середня глибина вигорання ТВ3 ВС0316 становила 46493 МВт-доб/тУ, ТВ3 ВС2216 – 46914 МВт-доб/тУ. Товщина оксидної плівки змінюється залежно від висотної координати твелів. Максимальна товщина оксиду спостерігається у верхній частині ТВ3, але профіль розподілу товщини по висоті твелів може бути різним, як це було показано на прикладі результатів, отриманих на енергоблоці № 3 ВП ПАЕС (п. 2.1).

Після усереднення отриманих значень ТОП одного проміжку між ДР та між сусідніми ДР можна отримати середній профіль розподілу товщини для твелів (рисунок 9). Для двох твелів ТВ3 ВС0316, середня глибина вигорання яких становила 49360 МВт-доб/тУ (твел 1) та 49460 МВт-доб/тУ (твел 2), зі зростанням висотної координати до ~1250 мм спостерігається монотонне збільшення ТОП. Подальше збільшення висотної координати не призводить до підвищення ТОП на цих твелах. У разі невеликого усереднення результатів вимірювання можна зафіксувати максимум на висотній координаті 1250 мм. Профіль розподілу ТОП не має чітко вираженого максимуму (рисунок 9 а)).

Для двох твелів ТВ3 ВС2216 з глибинами вигорання 49310 МВт-доб/тУ (твел 1) та 49290 МВт-доб/тУ (твел 2), підвищення ТОП зафіксовано до висотної відмітки ТВ3 ~3000 мм. Подальше збільшення висотної координати до кінця паливного стовпу супроводжується зниженням ТОП (рисунок 9 б)).



а)



б)

Рисунок 7 – Розподіл ТОП по висоті ТВ3 ВА2014 (а) та ТВ3 ВА2214 (б) та ймовірний усереднений профіль розподілу

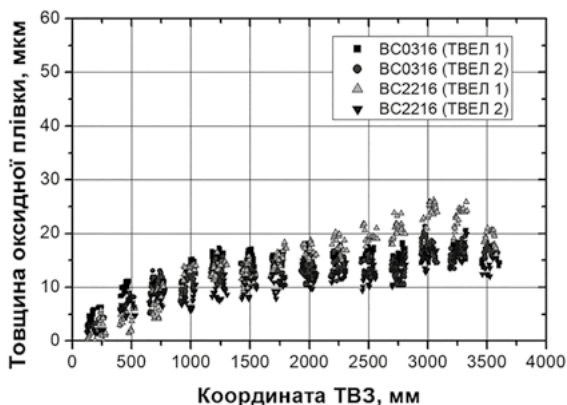


Рисунок 8 – Розподіл ТОП по висоті чотирьох інспектованих твелів двох ТВЗ після четвертого року експлуатації

Для ТВЗ, інспекцію яких проводили на енергоблоці № 5 ВП ЗАЕС, також, як і для ТВЗ, що інспектували на енергоблоці № 3 ВП ПАЕС, розподіл ТОП на поверхні оболонок твелів умовно можна охарактеризувати двома профілями. Один без явно вираженого максимуму як для твелів ТВЗ ВА2014 та BC0316, так і з явно вираженим максимумом у верхній частині ТВЗ (ВА2214, BC2216).

2.3 Вплив часу експлуатації оболонки твелів в активній зоні на зміну ТОП

Збільшення часу експлуатації ядерного палива в активній зоні призводить до зростання ТОП. За фронтальної корозії цирконієвого сплаву ТОП не повинна перевищувати 60 мкм. Це значення товщини оксиду закладалося в розрахунок параметрів палива на етапі проектування та під час отримання дозволу на експлуатацію ядерного палива в активній зоні. З огляду на це, під час інспекції ядерного палива цей параметр завжди контролюється. Для експлуатації палива важливе значення має не профіль розподілу товщини оксидної плівки по висоті оболонки твелів, а саме максимальна тов-

щина оксидної плівки, незважаючи на те, на якій висотній координаті твела вона була зафіксована. Для співставлення результатів, отриманих у різні роки на різних енергоблоках, а також для оцінки (визначення) залишкового запасу цього параметра, будують залежність від середньої глибини вигорання не ТВЗ, а твела, для якого були виконані ці вимірювання.

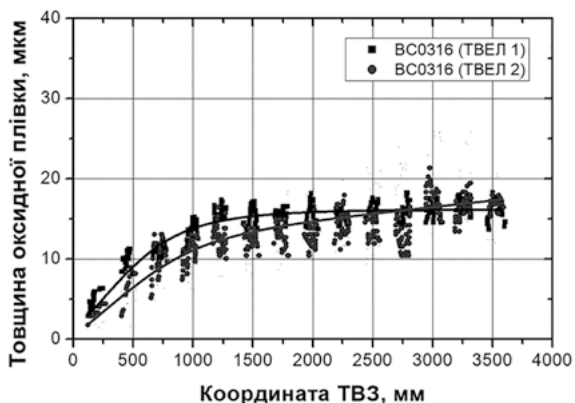
Залежність максимальної ТОП, вимірюваної на поверхні оболонок після експлуатації ТВЗ виробництва компанії «Westinghouse» на ВП ПАЕС та ВП ЗАЕС після чотирьох паливних циклів, від середньої глибини вигорання твела зображено на рисунку 10. Як видно з отриманих результатів, підвищення глибини вигорання супроводжується майже лінійним зростанням ТОП. Максимальна товщина оксиду на оболонці твела після четвертого року експлуатації знаходиться в межах від 13 мкм до 25 мкм.

Отримані результати вимірювань товщини оксидного шару на поверхні твела нижче максимальної межі (60 мкм), установлені на етапі проектування та під час отримання дозволу на експлуатацію палива в активній зоні реактора ВВЕР-1000, та значно нижче максимальної проектною межі (<101,5 мкм) для оболонок зі сплаву ZIRLO®.

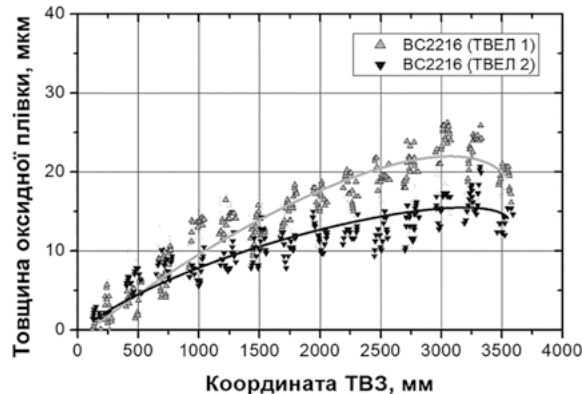
3. Обробка та обговорення результатів дослідження

3.1 Розрахункові моделі

Відомо, що кінетика росту оксидної плівки або зміни маси у разі корозії цирконієвих сплавів описується складною залежністю. На рисунку 11 наведено класичну кінетику корозії для сплаву Zircaloy-4 та показано всі періоди процесу окиснення в часі, розділені переломом (transition) на кривій. Така схема процесу окиснення увійшла в класичну літературу з опису корозії цирконієвих сплавів реакторного призначення [17]-[19].



а)



б)

Рисунок 9 – Розподіл ТОП по висоті ТВЗ BC0316 (а) та ТВЗ BC2216 (б) та ймовірний усереднений профіль розподілу

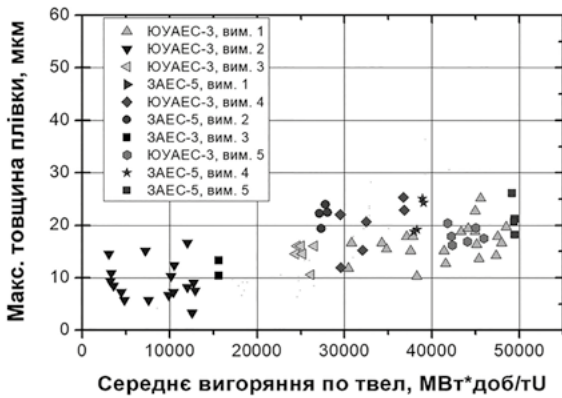


Рисунок 10 – Залежність максимальної ТОП від середньої глибини вигорання твелів

Загалом зміна маси або ТОП описується виразом (1):

$$W^n = K \cdot t, \quad (1)$$

де W – показник корозії (зміна маси або товщини плівки); t – час окиснення; K – коефіцієнт; n – порядок реакції. Для більшості цирконієвих сплавів на допереломній ділянці окиснення n дорівнює 3, а на післяпереломній – 1. Вираз подібного типу задовільно описує кінетику корозії за постійної температури випробування (наприклад, під час корозійних автоклавних випробувань). Для умов ядерного реактора, де температура змінюється залежно від аксіальної координати в активній зоні, необхідно враховувати вплив температури.

Залежність показника корозії від температури окиснення є експоненціальною. Для післяперехідної ділянки окиснення, а саме вона цікавить під час визначення кінетики корозії цирконієвих сплавів у реакторі, зміна показника корозії задовільно описується виразом (2):

$$W = A + K \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \cdot t, \quad (2)$$

де W – показник корозії, здебільшого товщина оксидної плівки, мкм;

t – час, днів;

K – коефіцієнт швидкості;

T – температура на поверхні розділу метал-оксид, К;

R – газова стала, 1,987 кал/(К·моль);

Q – енергія активації, кал/моль;

A – товщина оксидної плівки, яка утворилася на доперехідній ділянці окиснення, мкм.

Сучасні розрахункові моделі, які входять до сучасних комп'ютерних кодів для термомеханічного аналізу ядерного палива, враховують кілька інших параметрів, крім температури, що впливають

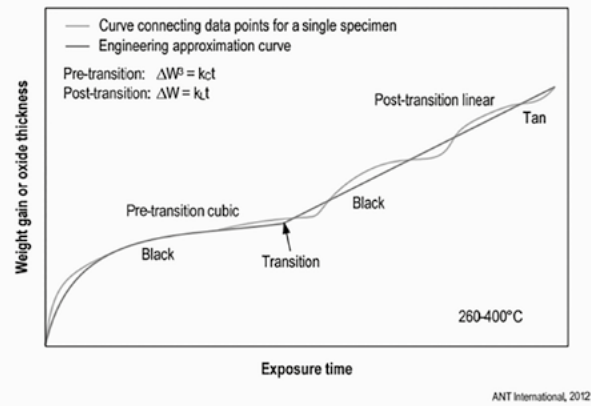


Рисунок 11 – Схематичне зображення корозійної поведінки Zircaloy-4 в діапазоні температур 260-400 °C [19]

на швидкість корозії. Розрахунковий модуль, який визначає товщину оксидної плівки на оболонці твелів для комп'ютерних кодів FRAPCON, FAST, PAD, базується на розрахунковій моделі, запропонованій Garzarolli. Ця модель враховує, що коефіцієнт окиснення (K) є також складною функцією, яка залежить від потоку тепла (q), потоку нейтронів (f) та від теплопровідності (γ) оксидної плівки [20]. Оскільки один із зазначених кодів входить до переліку кодів [21], які дозволено використовувати для проведення подібних розрахунків для АЕС України, то саме для моделі Garzarolli визначали енергію активації корозії сплаву ZIRLO® в умовах ВХР-1 реактора ВВЕР-1000.

3.2 Вихідні дані для розрахунку

Потік тепла та нейтронів переважно залежить від розподілу навантаження (енерговиділення) по висоті твела, профіль якого постійно змінює свою форму від одного горбого (рисунок 12) на початку паливної кампанії до двогорбого на кінець паливної кампанії. З огляду на розподіл лінійного енерговиділення по висоті твела (рисунок 12), опираючись на відому середню глибину вигорання палива,

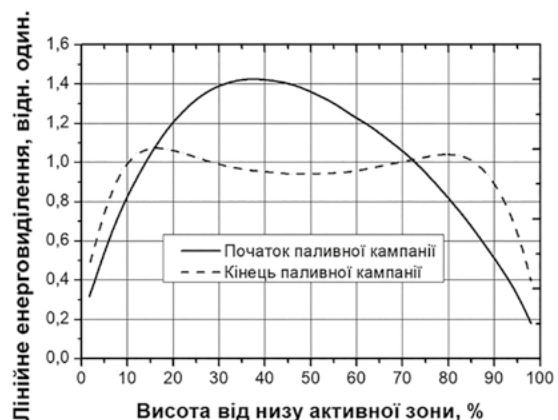


Рисунок 12 – Розподіл лінійного енерговиділення по висоті твела в процесі роботи типового стаціонарного паливного завантаження [22]

визначено розподіл глибини вигорання на кінець паливної кампанії по висоті твела.

На рисунку 13, як приклад, наведено розподіл остаточного (на кінець строку експлуатації) енерговиділення по висоті твела для одного твела (ТВЕЛ 2) ТВЗ ВА2214, інспекцію якого проводили на енергоблоці № 3 ВП ПАЕС, та одного твела (ТВЕЛ 1) ТВЗ ВС2216, інспекцію якого проводили на енергоблоці № 5 ВП ЗАЕС. Але, як буде показано у наступному пункті, подібні розрахунки будуть справедливими і для будь-якого іншого твела – розподіл товщини оксидної плівки по висоті характеризується одностороннім профілем. Розрахунок показав, що максимальна глибина вигорання для обох твелів знаходиться в нижній половині активної зони та становить ~48000 МВт-доб/тУ для ТВЕЛ 2 ТВЗ ВА2214 та майже 55000 МВт-доб/тУ для ТВЕЛ 1 ТВЗ ВС2216.

Максимальний флюенс швидких нейтронів ($E > 0,1\text{МэВ}$) знаходиться на тій самій аксіальній відмітці, що й максимальне вигорання, тобто в нижній половині активної зони, та становить ~8·10²⁵ n/m² для ТВЕЛ 2 ТВЗ ВА2214 та майже 9·10²⁵ n/m² для ТВЕЛ 1 ТВЗ ВС2216.

За допомогою комп'ютерного коду для термомеханічного аналізу ядерного палива (FRAPCON) розраховано розподіл температури оксиду по висоті оболонки твела на початку та на кінець строку експлуатації. За однакових умов охолодження, для твелів з більшою глибиною вигорання (ТВЕЛ 1 ВС2216) температура вище на 5 К (рисунк 14). У розрахунковій моделі не враховувалося, що оболонки твелів, для яких проводили вимірювання ТОП, знаходилися у периферійних рядах твелів або в куті ТВЗ.

3.3 Визначення енергії активації та верифікація розрахункової моделі

Для вихідних умов, основні з яких наведено на рисунках 13 та 14, для отриманих експериментально профілів розподілу ТОП (рисунки 7 та 9), для відомої розрахункової моделі Garzarolli [20], визначено енергію активації корозії сплаву ZIRLO® в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000. Для результату, отриманого на оболонці ТВЕЛ 2 ТВЗ ВА2214, енергія активації становить 27350 кал/моль, а для ТВЕЛ 1 ТВЗ ВС2216 – 27210 кал/моль. На рисунку 15 наведено експериментальні результати, які було отримано під час інспекції палива на АЕС та розраховано з використанням оптимальної енергії активації для кожного з твелів. Середня енергія активації корозії сплаву ZIRLO® в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000 становить 27280 кал/моль.

Усереднене значення енергії активації корозії (27280 кал/моль) сплаву ZIRLO® в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000 вище, ніж для реакторів типу PWR (27080 кал/моль). Це свідчить про вищу корозійну стійкість цього сплаву в умовах ВВЕР-1000, ніж в умовах PWR (таблиця 2).

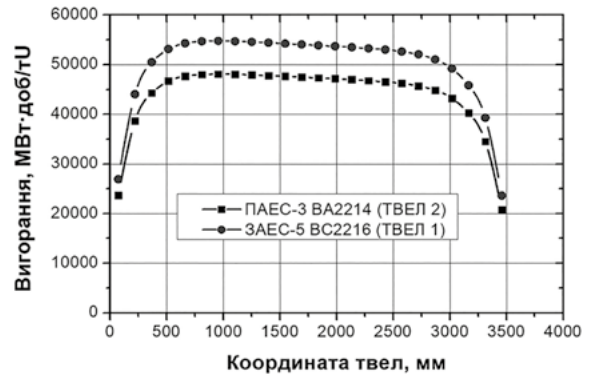
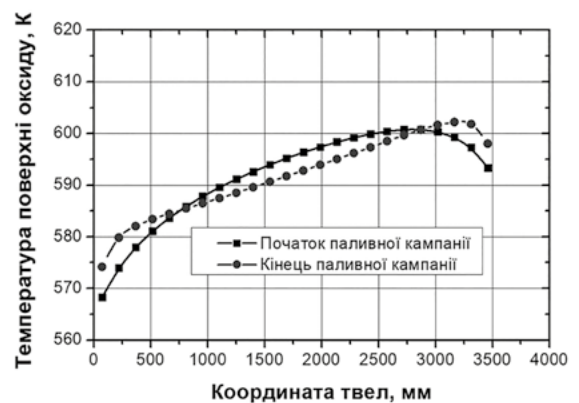
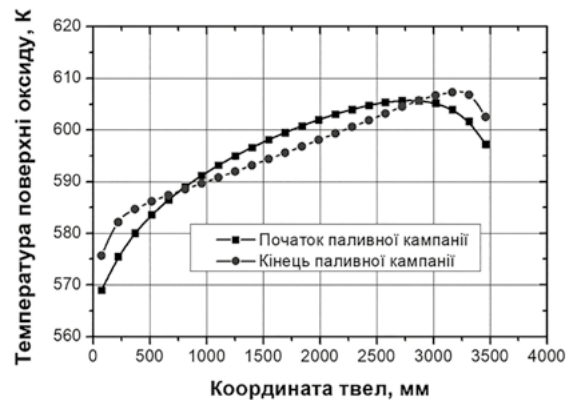


Рисунок 13 – Розподіл остаточного вигорання по висоті ТВЕЛ 2 ТВЗ ВА2214 та ТВЕЛ 1 ТВЗ ВС2216



a)

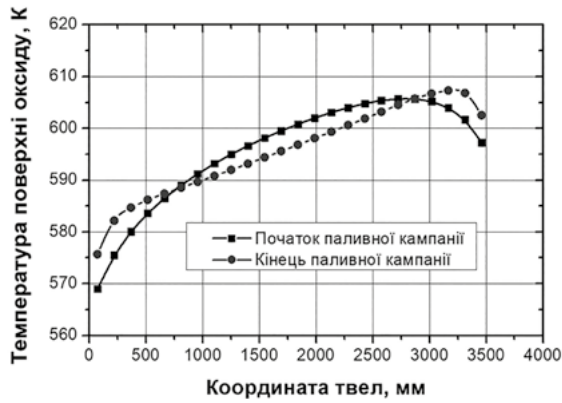


б)

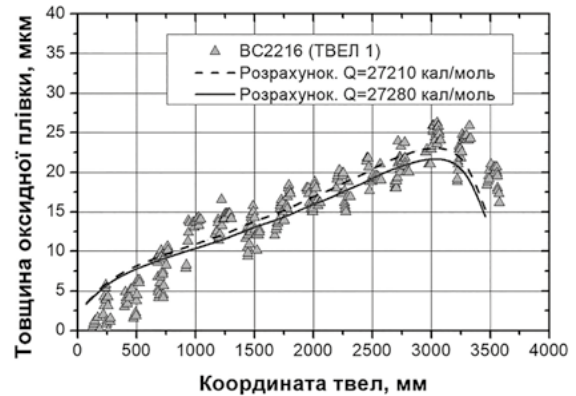
Рисунок 14 – Розподіл температури оксиду по висоті ТВЕЛ 2 ТВЗ ВА2214 (а) та ТВЕЛ 1 ТВЗ ВС2216 (б)

Таблиця 2 – Енергія активації корозії сплавів ZIRLO в умовах ВХР реактора PWR

Матеріал оболонки	Енергія, кал/моль
ZIRLO	27080 [FRAPCON]
Optimized ZIRLO	27354 [FRAPCON, FAST]
ZIRLO®	27080 [FAST]



a)



б)

Рисунок 15 – Виміряні та розраховані значення розподілу ТОП по висоті оболонки ТВЭЛ 2 ТВЗ ВА2214 (а) та ТВЭЛ 1 ТВЗ ВС2216 (б)

Для сплаву Optimized ZIRLO енергія активації корозії (таблиця 2) вища порівняно зі сплавами ZIRLO і ZIRLO® та вища порівняно з результатами, отриманими у цій статті.

Отримані значення енергії активації дозволяють провести розрахунок кінетики зміни ТОП від часу експлуатації (або глибини вигорання палива). Як експериментальні дані використано результати вимірювання ТОП, отримані під час інспекцій палива на ВП ПАЕС (рисунок 16 а) та ВП ЗАЕС (рисунок 16 б) в період 2013-2021 рр. На відміну від залежності максимальної ТОП від середньої глибини вигорання твелів, наведеної на рисунку 11, для побудови залежності, наведеної на рисунку 16, використовували експериментальні результати, отримані на висотній відмітці твелів 3000 мм (висотна відмітка, на якій для більшості твелів виміряно найбільшу ТОП). Для тієї самої висотної відмітки проведено розрахунок ТОП у разі використання енергії активації 27280 кал/моль.

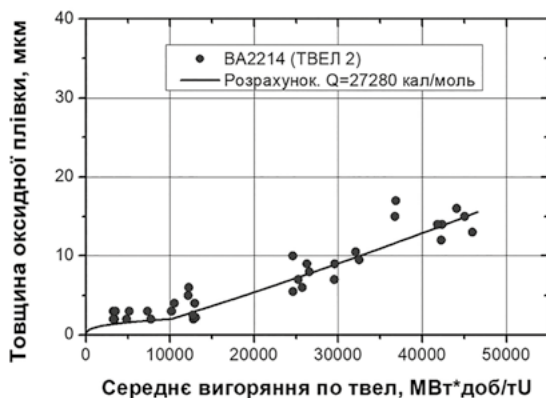
Розраховану енергію активації корозії сплаву ZIRLO® в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000 можна вважати прийнятною для розрахунку товщини оксидної

плівки для комп'ютерних кодів, які спираються на модель Garzarolli [20].

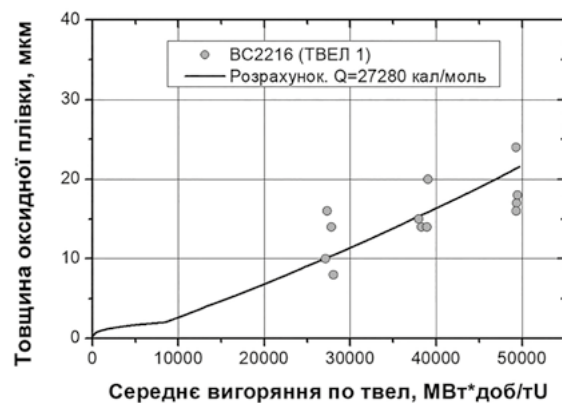
Для подальшого підвищення точності визначення енергії активації корозії або інших параметрів моделі, що описує кінетику корозії оболонок твелів, необхідно провести інспекцію палива, де буде виміряно не периферійні ряди твелів, а твели з центральних рядів. Для твелів з центральних рядів ТВЗ більш точно можна розрахувати енерговиділення та температуру оболонки. Обладнання СІРП дозволяє виконати обстеження твелів центральних рядів ТВЗ, але за більш тривалий час, ніж для периферійних та кутових твелів, оскільки це потребує демонтажу головки ТВЗ та вилучення твелів з ТВЗ для проведення дослідження.

Висновки

1. Проведено комплекс робіт з визначення корозійної стійкості паливних оболонок ТВЗ компанії «Westinghouse» зі сплаву ZIRLO® під час експлуатації протягом чотирьох паливних кампаній в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000 України.



a)



б)

Рисунок 16 – Виміряні та розраховані значення розподілу ТОП по висоті оболонки ТВЭЛ 2 ТВЗ ВА2214 (а) та ТВЭЛ 1 ТВЗ ВС2216 (б)

2. Отримано та під час виконання роботи систематизовано масив експериментальних результатів з визначення ТОП по висоті оболонки твелів та показано, що максимальна товщина оксиду на оболонці твелів після четвертого року експлуатації перебуває в межах від 13 мкм до 25 мкм.

3. На підставі візуального контролю оболонок твелів зроблено експертну оцінку їх корозійного стану та встановлено зв'язок зовнішнього вигляду їх поверхні з товщиною оксидної плівки.

4. Отримано результати вимірювань товщини оксидної плівки на поверхні твелів нижче максимальної межі (60 мкм), встановленої на етапі проектування і під час отримання дозволу на експлуатацію палива в активній зоні та значно нижче максимальної проєктної межі (<101,5 мкм) для оболонок зі сплаву ZIRLO®.

5. Згідно з результатами вимірювань, проведених на енергоблоці № 3 ВП ПАЕС та енергоблоці № 5 ВП ЗАЕС, можна стверджувати, що паливні оболонки ТВЗ виробництва компанії «Westinghouse» зі сплаву ZIRLO® мають високу корозійну стійкість під час експлуатації в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000 України.

6. На підставі результатів вимірювання товщини оксиду для одного твела на енергоблоці № 3 ВП ПАЕС та одного твела на енергоблоці № 5 ВП ЗАЕС і розрахованих параметрів їх експлуатації визначено енергію активації корозії оболонок зі сплаву ZIRLO® в умовах ВХР-1 ВВЕР-1000, яка становить 27280 кал/моль.

7. Отримано усереднене значення енергії активації корозії для оболонок твелів зі сплаву ZIRLO® (27280 кал/моль) в умовах ВВЕР-1000, яке вище за значення енергії активації для цього сплаву в умовах PWR (27080 кал/моль), що свідчить про його кращу стійкість в умовах роботи ВВЕР-1000.

8. З використанням отриманого значення енергії активації проведено розрахунки розподілу ТОП по висоті оболонок твелів після четвертого року експлуатації та товщини оксиду від часу експлуатації / глибини вигорання за розрахунковою моделлю [20], які показали високу співставність результатів розрахунків та отриманих під час вимірювання.

9. Наведено рекомендації, виконання яких потрібно для подальшого підвищення точності визначення енергії активації корозії сплаву ZIRLO®, які полягають у проведенні вимірювань на оболонках твелів не периферійної, а центральної зони ТВЗ.

2. Крицкий В. Г., Родионов Ю. А., Березина И. Г., Зеленина Е. В., Гаврилов А. В., Щукин А. П., Федоров А. И., Щедрин М. Г., Галанин А. В. Формирование и удаление отложений в 1-ом контуре АЭС с ВВЭР. С.-Пб «Береста», 2011. 308 с.

3. IAEA Doc 7241/n on Advisory Group Meeting for Safety Aspects of Hater Chemistry in Light Water Reactors, September. Vienna : IAEA, 1986.

4. Adamson R., Garzarolli F., Cox B., Strasser A., Rudling P. Corrosion mechanisms in zirconium alloys. Skultuna : ANT International, 2007.

5. СОУ-Н ЯЕК 1.013:2014. Теплоносій першого контуру ядерних енергетичних реакторів типу ВВЕР-1000. Технічні вимоги і способи забезпечення якості. Настанова. Затверджено наказом МЕНУ від 29.12.2014 № 909 та наказом НАЕК від 22.01.2014 № 70-р.

6. Water Chemistry of WWER Nuclear Power Plants. Vienna: IAEA. 2008.

7. Luscher W. G., Geelhood K. J., Porter I. E. Material Property Correlations: Comparisons between FRAPCON-4.0, FRAPTRAN-2.0, and MATPRO. PNNL-19417 Rev. 2. September 2015.

8. Geelhood K. J., Luscher W. G., Goodson C. E. MatLib-1.1: Nuclear Material Properties Library. PNNL-32772. April 2022.

9. Зуйко В. А., Красноруцький В. С., Грицина В. М., Рудь Р. О., Трет'яков М. В., Куштим Я. О., Грудницький В. В., Зігунов В. В., Слепцов О. М., Касперович І. Л., Соловйов Ю. В., Медінцов В. В., Глушенков Р. С. Досвід обстеження опроміненого ядерного палива на АЕС України за допомогою стенду інспекції і ремонту палива. *Ядерна та радіаційна безпека*, 2022. № 3(95), С.48-63. doi: 10.32918/nrs.2022.3(95).05.

10. Poolside Inspection, Repair and Reconstitution of LWR Fuel Elements. Technical Committee Meeting. Bad Zurzach, Switzerland, 1997, (IAEA-TECDOC-1050). Vienna, IAEA, 1998.

11. Nikulina A. V. Zirconium-niobium alloys for core elements of pressurized water reactors. *Metal Science and Heat Treatment*. 2003. Vol. 45. P. 287–292.

12. Маркелов В. А., Новиков В. В., Коньков В. Ф. и др. Развитие работ по разработке сплавов циркония для оболочек твэлов и деталей ТВС. *V Научно-практическая конференция математических обществ России «Цирокний: металлургия, свойства, применение»*. Ершово, Москва, 24-28 ноября 2008 г.

13. Новиков В. В. Эксплуатационная надежность топлива реакторов ВВЭР и РБМК. *Научно-техническая конференция «Опыт разработки и эксплуатации усовершенствованного ядерного топлива. Повышение надежности ТВС»*, М., 2003.

14. Обоснование продления до 50 лет сроков хранения под водой отработавших сборок реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 в ХОТ АЭС «Козлодуй» / Этап 2. Комплексные испытания и исследования: Отчет. Инв. № 3589. С.-Пб : ОАО «ГИ ВНИПИЭТ», 2006. 166 с.

15. Kritsky V. G., Berezina I. G., Rodionov Y. A. Deposition of Steels Corrosion Products on Cladding Surfaces and Corrosion of Zirconium. *Water chemistry and clad corrosion/deposition including fuel failures: Proceedings of a technical meeting held in Kiev, Ukraine, 2010 (IAEA-TECDOC-CD-1692)*. Vienna: IAEA, 2013. P. 123-134.

Список використаної літератури

1. Kirst, M., Benjaminsson, U., Öneby, C. Diversification of the VVER Fuel Market in Eastern Europe and Ukraine. *ATW*. 2015. vol. 60, issue 3. P.171-172.

16. Звир Е. А., Ионоу В. Б., Павлов С. В. и др. Послереакторное состояние твэлов и ТВС ВВЭР. Атлас. М., 2013, 227 с.

17. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. М., 1994, 256 с.

18. Дуглас Д. Металловедение циркония. М., 1975. 360 с.

19. Hillner E. Zirconium in the Nuclear Industry. ASTM STP 633. 1977, pp. 211-235.

20. Garzarolli F., Jung W., Schoenfeld H., Garde A., Parry G. W., Smerd P. G. Waterside corrosion of Zircaloy fuel rods. US Rep EPRI-NP-2789. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute, 1982.

21. Перечень разрешенных к использованию в ГП «НАЭК «Енергоатом» расчетных кодов для обоснования безопасности ядерных установок по состоянию на 01 февраля 2021 г. Введеный в дію розпорядженням ДП «НАЭК «Енергоатом» від 16.02.2021 № 190-р.

22. Реакторная установка В-320: Техническое описание и информация по безопасности. 320.00.00.00.000 Д61, Глава 31 «Обоснование безопасной эксплуатации реакторной установки В-320 с активной зоной с тепловыделяющими сборками альтернативными на энергоблоках АЭС Украины и Болгарии» (с извещением об изменении № 320.3590). ОКБ «Гидропресс», 2003.

References

1. Kirst, M., Benjaminsson, U., Önnby, C. (2015). Diversification of the VVER fuel market in Eastern Europe and Ukraine. ATW, vol.60, issue 3, March 2015, 171-172.

2. Kritsky V., Rodionov, Yu, Berezina, I., Zelenina, E., Gavrylov, A., Shchukin, A., Fedorov, A., Shchedrin, M., Galanin, A. (2011). Formation and removal of deposits in the primary system of VVER NPPs, Sankt-Peterburg, "Beresta" 2011, 308 p.

3. IAEA Doc 7241/n on Advisory Group Meeting for Safety Aspects of Hater Chemistry in Light Water Reactors, September, (1986).

4. Adamson, R., Garzarolli, F., Cox, B., Strasser, A., Rudling, P. (2007). Corrosion mechanisms in zirconium alloys. Rep., ANT Int.

5. SOU-N YaEK 1.013-2014. Primary coolant of VVER-1000 nuclear power reactors. Technical requirements and methods of quality assurance.

6. IAEA. 2008. Water chemistry of WWER nuclear power plants, Vienna, IAEA.

7. Luscher, W., Geelhood, K., Porter, I. Material property correlations: comparisons between FRAPCON-4.0, FRAPTRAN-2.0, and MATPRO. September 2015, PNNL-19417 Rev. 2.

8. Geelhood, K., Luscher, W., Goodson, C. MatLib-1.1: Nuclear material properties library. April 2022, PNNL-32772.

9. Zuyok, V., Krasnorutskyy, V., Grytsyna, V., Rud, R., Tret'yakov, M., Kyshtym, Ya., Hrudnytsky, V., Zigunov, V., Slyeptsov, O., Kasperovych, I., Solovyov, Yu., Medintsov, V., Glushenkov, R. (2022). Experience of irradiated nuclear fuel examination at Ukrainian NPPs using fuel inspection and repair equipment. *Nuclear and Radiation Safety*, 3(95), 48-63.

10. Poolside Inspection, Repair and Reconstitution of LWR Fuel Elements. Technical Committee Meeting. Bad Zurzach, Switzerland, 1997, (IAEA-TECDOC-1050). Vienna, IAEA, 1998.

11. Nikulina, A. (2003). Zirconium-niobium alloys for core elements of pressurized water reactors. *Metal Science and Heat Treatment*, 45, 287-292.

12. Markelov, V., Novikov, V., Kon'kov, V., Peregud, M., Shyshov, V., Gusev, A. Expansion of activities on the development of zirconium alloys for fuel cladding and fuel assembly parts. V Scientific and Practical Conference of Materials Science Societies of Russia "Zirconium: Metallurgy, Properties, and Applications", Yershovo, Moscow, 24-28 November 2008.

13. Novikov, V. Operational reliability of fuel for VVER and RBMK reactors. Scientific and technical conference "Experience in the development and operation of advanced nuclear fuel. Increasing the reliability of fuel assemblies", Moscow, 2003.

14. Justification of the extension to 50 years for underwater storage of spent assemblies of VVER-440 and VVER-1000 reactors at Kozloduy NPP SFS. Stage 2. Comprehensive testing and research. Report, No. 3589, Saint-Petersburg, OJSC SPII VNIPIET 2006, 166 p.

15. Kritsky V., Berezina, I., Rodionov, Y. Deposition of steels corrosion products on cladding surfaces and corrosion of zirconium. Water chemistry and clad corrosion/deposition including fuel failures. Proceedings of a technical meeting held in Kyiv, Ukraine, 2010. IAEA-TECDOC-1692, IAEA, Vienna, 2013, 123-134.

16. Zvir, E., Ionov, V., Molchanov, V., Pavlov, S., Polenok, V., Shishkin, A. (2013). Post-irradiation condition of VVER fuel rods and fuels assemblies. Atlas, Moscow, 227 p.

17. Zaymovskiy, A., Nikulina, A., Reshetnikov, N. (1994). Zirconium alloys in nuclear power industry. Moscow, 256 p.

18. Douglas, D. (1975). The metallurgy of zirconium. Moscow, 360 p.

19. Hillner, E. (1977). Zirconium in the nuclear industry, ASTM STP 633, 211-235.

20. Garzarolli, F., Jung, W., Schoenfeld, H., Garde, A., Parry, G., Smerd, P. (1982). Waterside corrosion of Zircaloy fuel rods. US Rep EPRI-NP-2789 Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.

21. List of software tools allowed for use in SE NNEGC Energoatom for the safety justification of nuclear installations as of 1 February 2021. Put into effect by Energoatom Order No. 190-r of 16 February 2021

22. Reactor facility V-320: technical description and safety information, 320.00.00.00.000.D61, Chapter 31, "Justification of V-320 Safe Operation with the core with alternative fuel assemblies at Ukrainian and Bulgarian NPPs" (with notification on amendment No. 320.3590), EDO Hidropres, 2003.

Westinghouse Fuel Cladding Corrosion Resistance under Operation in the Conditions of VVER-1000 Primary Water Chemistry. Determination of the Corrosion Activation Energy for Zirconium Alloy and Verification of the Computer Model

**V. Zuyok¹, M. Tretyakov¹, R. Rud¹,
Ya. Kushtym¹, V. Grytsyna¹, Yu. Solovyov²,
Ye. Kulyk²**

¹“Nuclear Fuel Cycle” Science and Technology Establishment of National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”, Kharkiv, Ukraine

²SS Atomremontservis of SE NNEGC Energoatom, Slavutych, Ukraine

The paper presents the results of a range of activities to determine the corrosion resistance of Westinghouse fuel cladding made of ZIRLO[®] alloy during operation for four fuel cycles in VVER-1000 reactors of Ukrainian NPPs. An array of experimental results was obtained and systematized to determine the thickness of the oxide film according to the cladding height of fuel rods, and it was shown that the maximum oxide thickness after the fourth year of operation is within 13...25 μm. The corrosion condition of fuel cladding outer surface was assessed and the relation between the surface

appearance and oxide film thickness was determined during the visual inspection. The obtained results of the oxide film thickness measurements on the surface of fuel cladding made of ZIRLO[®] alloy are below the maximum limit (60 μm) established at the design stage and when obtaining a permit for fuel operation in the core, as well as significantly below the maximum design limit (<101.5 μm) for ZIRLO[®] alloy cladding. According to the results of measurements carried out at PNPP Unit 3 and ZNPP Unit 5, it can be asserted that fuel cladding made of ZIRLO[®] alloy possess high corrosion resistance under the conditions of the Ukrainian VVER-1000 primary water chemistry.

The corrosion activation energy of the ZIRLO[®] alloy was determined upon the results of the oxide thickness measurements for fuel cladding at PNPP Unit 3 and ZNPP Unit 5, as well as calculated operating parameters under the conditions of the VVER-1000 core. The corrosion activation energy value of the ZIRLO[®] alloy is 27280 cal/mol for VVER-1000, which is higher than for Western PWR reactors (27080 cal/mol). This indicates higher corrosion resistance of this alloy in VVER-1000 reactors.

Keywords: activation energy, corrosion, fuel assembly, fuel cladding, oxide film thickness, VVER-1000, ZIRLO[®] alloy.

Отримано 25.01.2023