

Н. О. Кануннікова, д-р філософії, ст. наук. співроб., О. В. Шестопалов, канд. техн. наук, професор, А. О. Сакун, д-р філософії, доцент,
А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, О. В. Матющенко, аспірант

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ КОРОЗІЇ У КОНТУРАХ ВВЕР-1000 ТА ПІДХОДИ ДО ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: ВВЕР-1000, екологічна безпека, корозія, оксидні плівки, корозійні продукти, теплоносії, водяна пара, перегрів.

Вступ. Екологічна безпека атомної енергетики визначається не лише системами радіаційного контролю та бар'єрною концепцією захисту, але й матеріалознавчими процесами, які в довгостроковій перспективі здатні модифікувати експлуатаційні умови, підвищувати частоту регламентних технологічних операцій і, як наслідок, збільшувати обсяги вторинних відходів. Корозія обладнання в середовищах теплоносіїв є одним з таких процесів, оскільки супроводжується утворенням корозійних продуктів, їх переносом по контуру, депозицією у вигляді відкладень та необхідністю їх вилучення з технологічних середовищ (очищення, фільтрація, сорбція). У результаті зростає навантаження на системи водопідготовки та очищення, а під час ремонтів і промивок формуються додаткові потоки забруднених вод, фільтрувальних матеріалів та шламів, що потребують регламентованого поводження.

На рис. 1 представлено послідовну блок-схему утворення та накопичення відходів у системі охолодження/очищення контуру (ланцюг відходоутворення) від вихідного металевого матеріалу до твердих радіоактивно забруднених відходів (шламів).

Процес починається з вихідного матеріалу (металу), який циркулює в трубопроводах/контурі. Під впливом корозійних процесів продукти корозії мігрують по контуру, накопичуються та осідають на поверхнях, що призводить до необхідності періодичного вилучення забруднень за допомогою фільтрів або сепараторів. Вилучені тверді частинки (шлами) збираються у спеціальні ємності (бочки) як тверді радіоактивно забруднені відходи. Паралельно в системі утворюються дві основні екологічні загрози:

1. у першому контурі – накопичення радіоактивно забруднених сорбентів;
2. у другому контурі – генерація хімічно забруднених стоків після проведення хімічних промивок.

Критичний перегрів (температури до 1200 °С) суттєво прискорює деградацію конструкційних матеріалів через різке зростання швидкості окиснення, що призводить до втрати бар'єрних властивостей покриттів та додаткового накопичення продуктів розпаду.

Для оцінки ефективності та екологічної безпеки системи застосовуються такі проксі-показники як: маса вилучених шламів; частота проведення хімічних промивок; обсяг використаних реагентів.

Як шлях до мінімізації утворення вторинних відходів запропоновано використання захисних шарів на основі оксиду хрому, які стабілізують поверхню, знижують мобільність продуктів корозії, зменшують інтенсивність деградації матеріалів та, відповідно, скорочують обсяги утворюваних твердих і рідких радіоактивних відходів.



Рисунок 1 – Схема утворення, міграції та вилучення корозійних продуктів

Для установок ВВЕР-1000 принципово важливим є розділення умов корозійної взаємодії між першим і другим контурами. Перший контур характеризується підвищеними температурою та тиском теплоносія і виконує критичну бар’єрну функцію щодо ізоляції потенційно радіоактивних середовищ. Другий контур працює за нижчих параметрів, проте корозійні процеси й відкладення в ньому впливають на ефективність теплообміну, частоту очищень і обсяг технологічних відходів. Додатковий аспект проблеми проявляється у сценаріях перегріву, коли в середовищі водяної пари швидкість окиснення і деградація захисних шарів можуть різко зростати, підвищуючи ризики втрати бар’єрних властивостей матеріалів та обсягів продуктів окиснення, що підлягають подальшому поводженню.

Метою роботи є узагальнення сучасних уявлень про механізми корозії та стабільність оксидних плівок у системах ВВЕР-1000, аналіз екологічних наслідків утворення й міграції корозійних продуктів, а також огляд технічних і організаційних підходів, релевантних для зниження відходоутворення та технологічних скидів.

Здійснено огляд літератури за трьома тематичними кластерами: (i) перенос корозійних продуктів і контамінація первинного контуру; (ii) корозія, відкладення та хімічні промивки у вторинному контурі і парогенераторах; (iii) високотемпературне окиснення у водяній парі (до 1200 °C) та покриття бар’єрного типу. Акцент зроблено на механізмах, що визначають мобільність корозійних продуктів, та на екологічних проксі-показниках (частота промивок, маса вилучених відкладень, обсяг промивних середовищ і витратних матеріалів).

Обговорення результатів. Екологічні наслідки корозії у водоохолоджуваних реакторних системах детермінуються утворенням і переносом корозійних продуктів у розчиненій, колоїдній і частинковій фракціях. Для первинного контуру ключовими є механізми депозиції частинок і поверхневі процеси розчинення-осадження, які використовуються для прогнозу накопичення відкладень та контамінації поверхонь [1–4]. Для вторинного контуру вирішальним є формування відкладень у парогенераторах і на теплообмінних поверхнях та пов’язані з ними режими хімічних промивок [5–7].

Для прикладної екологічної інтерпретації пропонується використовувати проксі-показники: (i) масовий потік корозійних продуктів до систем очищення; (ii) інтенсивність депозиції/реосадження та приріст відкладень; (iii) частота промивок і витрати реагентів; (iv) маса вилучених шламів, фільтрів і сорбентів, що переходять у відходи.

На рис. 2 представлено ланцюг формування вторинних радіоактивних відходів у системі охолодження ядерного реактора, з акцентом на процеси в першому та другому контурах, вплив режиму перегріву та механізм захисту поверхонь за допомогою хромвмісних покриттів.

Процес починається з корозії конструкційних матеріалів у теплоносії, що призводить до утворення продуктів корозії. Такі продукти переносяться потоком теплоносія (перенос), осідають (відкладення) на поверхнях обладнання, після чого вилучаються під час очищення (фільтрація, хімічні промивки тощо). У результаті формуються тверді шлами та забруднені стоки, які накопичуються як вторинні радіоактивні відходи.

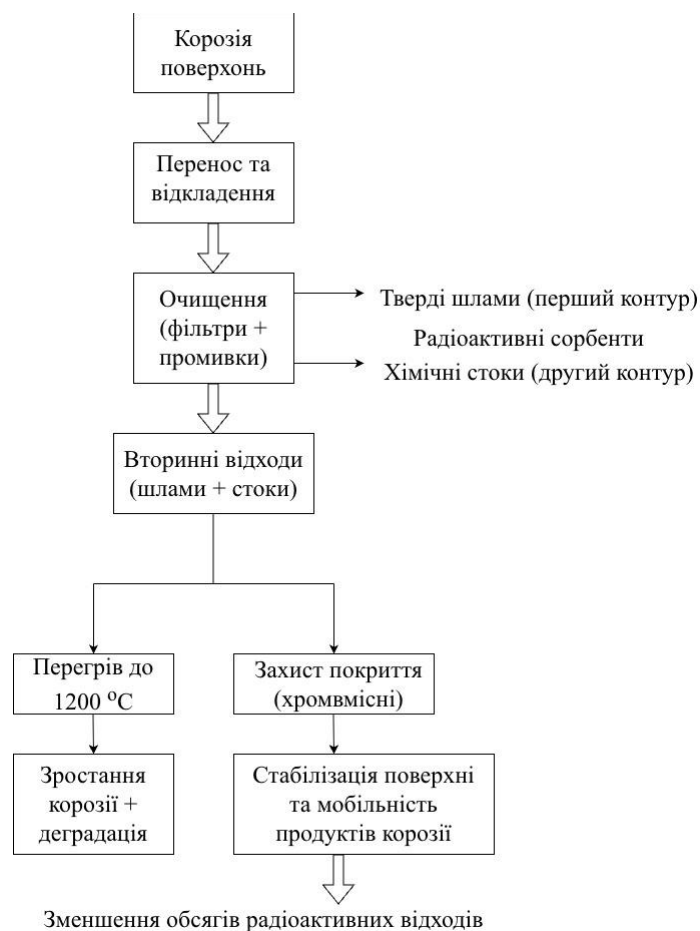


Рисунок 2 – Ланцюг формування вторинних відходів

Як видно з рис. 2 у першому контурі (реакторний контур) відбувається накопичення твердих радіоактивно активованих відходів: продукти корозії осідають на фільтрах, сорбуються та активуються в зоні нейтронного потоку, утворюючи радіоактивні матеріали, придатні для захоронення, що призводить до поступового збільшення обсягу твердих відходів. У другому контурі (парогенератор та вторинний цикл) переважає хімічне забруднення стоків – часті хімічні промивки генерують агресивні технологічні стоки з високим вмістом реагентів, які потребують спеціальної обробки та утилізації.

Критичний фактор деградації – режим перегріву (температури до 1200 °С): при таких температурах швидкість окиснення матеріалів різко зростає, що спричиняє швидку деградацію захисних бар'єрів (оксидних плівок), втрату їхньої цілісності та додаткове утворення продуктів корозії. Для мінімізації утворення вторинних відходів запропоновано застосування захисних хромвмісних покриттів: такі шари стабілізують поверхню металу, значно знижують мобільність продуктів корозії, уповільнюють процеси окиснення та деградації, що в підсумку зменшує обсяги як твердих шламів, так і хімічно забруднених стоків. Головний екологічний показник навантаження визначається масою вилучених відходів та частотою проведення хімічних промивок обладнання.

Для переходу від концептуальної до прикладної екологічної оцінки проксі-показники доцільно нормувати та фіксувати у вигляді балансових величин за експлуатаційний інтервал (кампанія/рік/ремонтний цикл) з прив'язкою до виробітку (МВт·год) або тривалості роботи. Масовий потік корозійних продуктів до систем очищення може оцінюватися за матеріальним балансом вилучених твердих фаз (фільтрувальні елементи, сорбенти, шлами) з урахуванням їх маси та, за наявності даних, елементного складу/вмісту оксидної фази. Інтенсивність депозиції/реосадження доцільно інтерпретувати через приріст маси відкладень (перед-/післяремонтні дані, результати очищення теплообмінних поверхонь) і частоту переходу до режимів очищення. Частота промивок та витрати реагентів є прямими індикаторами екологічного навантаження, оскільки визначають обсяг промивних середовищ і склад технологічних стоків. Маса вилучених шламів, фільтрів і сорбентів відображає «кінцеву» стадію ланцюга «корозія → перенос → очищення» та може використовуватися як інтегральний показник корозійно-індукованого відходоутворення при порівнянні альтернативних стратегій водно-хімічного режиму, очищення та поверхневих рішень.

Оксидні плівки контролюють не лише кінетику корозії, але й фазово-дисперсний стан та мобільність продуктів деградації. У літературі виділяють три базові механізми, що керують вторинними потоками: розчинення/перепасивація з утворенням мобільної розчиненої фракції; відшарування/сколювання з переходом продуктів у частинкову фракцію; реосадження у вигляді відкладень при зміні термодинамічних умов [2–4, 6].

З екологічної точки зору ці механізми важливі тим, що визначають інтенсивність вилучення продуктів корозії системами очищення та частоту промивок, формуючи вторинні потоки промивних середовищ, шламів і витратних матеріалів. Окремо підкреслюється роль підходів до видалення відкладень у перехідних режимах, що підсилює значущість керування мобільністю корозійних продуктів [6].

Перший контур ВВЕР-1000 характеризується підвищеними температурою і тиском теплоносія (орієнтовно 16,5 МПа; 350 °С), тому опис переносу корозійних продуктів базується на поєднанні моделей частинкової депозиції та процесів розчинення-осадження (табл. 1). Оглядові роботи демонструють зв'язок між транспортом корозійних продуктів і наростанням контамінації поверхонь у водоохолоджуваних реакторах [1, 2].

Таблиця 1 – Екологічні аспекти корозії та показники експлуатації на контурі ВВЕР-1000

Технологічний контур	Параметри середовища	Ключові механізми	Екологічні наслідки
Перший контур ВВЕР-1000	Тиск $\approx 15,7$ – $16,5$ МПа; Температура ≈ 290 – 350 °С	Розчинення-осадження, контамінація поверхонь, частинкова депозиція	Акумуляція продуктів корозії, контамінація поверхонь (^{60}Co); відходи: відпрацьовані сорбенти, фільтрувальні матеріали, шлами
Другий контур ВВЕР-1000	Тиск $\approx 6,4$ МПа; Температура ≈ 280 °С	Формування відкладень на теплообмінних поверхнях, забивання рециркуляційних парогенераторів	Погіршення теплопередачі; відпрацьовані промивні розчини (реагенти), технологічні стоки
Режим високо-температурного перегріву	Водяна пара; Температура до 1200 °С і вище	Прискорене окиснення цирконієвих сплавів, кінетичні переходи, відшарування та сколювання оксидних шарів	Швидке накопичення продуктів деградації, зміна морфології оксидів, складність локалізації та поводження з продуктами

Моделювання депозиції частинок у первинному контурі (зокрема, в рамках OSCAR-подібних підходів) дозволяє кількісно пов'язати умови потоку з імовірністю осадження та накопиченням відкладень [3]. Моделювання uptake активованих продуктів (наприклад, Co-60) на конструкційних матеріалах/сплавах підкреслює роль поверхневих процесів розчинення-осадження у формуванні контамінації [4]. Практичний наслідок для екологічної оцінки – можливість інтерпретувати зниження мобільності корозійних продуктів як шлях зменшення маси вилучених продуктів системами очищення та обсягу витратних матеріалів.

Разом з тим, застосування OSCAR-подібних підходів у прикладній екологічній постановці має принципові обмеження. По-перше, невизначеність розподілу корозійних продуктів між розчищеною, колоїдною та частинковою фракціями істотно впливає на прогноз депозиції та ефективність вилучення в системах очищення; це створює чутливість результатів до вихідних припущень щодо дисперсності й агрегативної стабільності частинок. По-друге, локальні термогидравлічні умови (зони змішаного кипіння/турбулентності, градієнти температури, ділянки зі зниженою швидкістю потоку) можуть формувати «гарячі точки» відкладення, які погано описуються усередненими параметрами. По-третє, моделі uptake/контамінації поверхонь суттєво залежать від опису поверхнево-хімічних стадій розчинення-осадження та стану оксидних плівок; за відсутності валідації на конкретних експлуатаційних даних інтерпретацію результатів доцільно обмежувати якісними трендами (напряму зміни мобільності/депозиції), а не абсолютними величинами.

ВВЕР-специфічний аспект пов'язаний з оптимізацією водно-хімічного режиму первинного контуру, який розглядається як інструмент керування переносом і вторин-

ним відкладенням корозійних продуктів [8]. У контексті ВВЕР-1000 принциповим є те, що екологічно значущі «вторинні потоки» формуються не лише величиною корозійної швидкості, а й режимами підтримання хімічної стабільності теплоносія та ефективністю вилучення продуктів корозії із циркуляції. Тому при перенесенні узагальнених PWR-моделей транспорту необхідно відокремлювати універсальні механізми (частинкова депозиція, розчинення-осадження, перехід між фракціями) від параметрів, що визначаються конкретною практикою водно-хімічного режиму та очищення на ВВЕР-1000. З прикладної точки зору це означає, що порівняння екологічного ефекту різних підходів (зміна режиму, поверхневі рішення, оптимізація очищення) слід проводити не за «корозійною швидкістю» як такою, а за зміною мобільності корозійних продуктів, їх акумуляцією у системах очищення та частотою переходу до промивок/ремонтних очищень як подій, що генерують стоки й відходи.

У вторинному контурі ВВЕР-1000 (орієнтовно 6,4 МПа; 280 °С) екологічно критичним механізмом виступає накопичення відкладень на теплообмінних поверхнях і в парогенераторах, що погіршує теплопередачу і провокує застосування хімічних промивок. Критичні огляди систематизують чинники, які визначають склад і морфологію відкладень та їх вплив на режими обслуговування [5].

Проблема забивання/засмічення рециркуляційних парогенераторів відкладеннями розглядається як окремий клас відмов, для якого наведено механістичні пояснення та підходи до контролю [6]. Порівняння превентивних і «лікувальних» хімічних очищень демонструє, що стратегія промивок впливає на структуру магнетитових відкладень і сумарні потоки промивних середовищ [7]. З позицій екологічного менеджменту це означає, що частота промивок, витрати реагентів і маса шламів мають виступати базовими показниками оцінки.

Вторинні потоки, пов'язані з корозійно-індукованими очищеннями, доцільно розглядати як окремий об'єкт екологічної оптимізації, оскільки вони формують основну «матеріальну» частину навантаження: промивні середовища з реагентами, тверді фази (магнетитові шлами та відкладення), а також витратні матеріали систем очищення (фільтрувальні елементи, сорбенти/іонообмінні матеріали). Відмінність цих потоків полягає не лише у масі/обсязі, а й у складності поводження, яка зростає із підвищенням дисперсності твердих фаз та їх здатності до повторного переносу і вторинного осадження. Саме тому технологічні рішення, що зменшують мобільність продуктів корозії та їх схильність до реосадження, потенційно знижують сумарні обсяги промивок і масу вилучених твердих фаз, тобто дають екологічний ефект, який можна відстежувати через запропоновані проксі-показники.

Високотемпературне окиснення у водяній парі (до 1200 °С) відрізняється від корозії у водному теплоносії за кінетикою росту оксидів і характером деградації бар'єрних шарів. Огляд корозії цирконієвих сплавів, що застосовуються у паливних оболонках, підкреслює роль температури та парового середовища у прискоренні окиснення та зміні механізмів руйнування [10].

Для хромвмісних бар'єрних систем описано кінетичні переходи та механізми відмови покриттів при окисненні у парі при 1200 °С і вище, що дозволяє інтерпретувати стабільність покриття як фактор, який впливає на масу і морфологію продуктів деградації [11–15]. В оглядовому екологічному контексті це доцільно пов'язувати з потенційною складністю локалізації та поводження з продуктами окиснення при перегріві.

Мінімізація екологічних наслідків корозії потребує поєднання: (і) керування водно-хімічним режимом для зниження мобільності корозійних продуктів та інтенсив-

ності реосадження; (ii) матеріалознавчих і поверхневих рішень для стабілізації оксидних шарів; (iii) оптимізації очищення і промивок з позицій зменшення обсягів реагентів, промивних середовищ і шламів. Для вторинного контуру стратегія промивок (превентивні проти лікувальних) безпосередньо впливає на сумарні стоки [7].

Хромвмісні покриття доцільно розглядати як перспективні бар'єрні системи для підвищення термохімічної стабільності поверхні та зменшення інтенсивності утворення і переносу продуктів деградації. Узагальнено дані щодо поведінки хромвмісних покриттів на нержавіючих сталях при паровому окисненні, включно з режимами 1200 °С, а також наведено аналіз механізмів відмови та кінетики процесів [11–20]. Водночас покриття бар'єрного типу не слід розглядати як універсальну заміну керуванню воднохімічним режимом та оптимізації очищення. Їх ефективність в експлуатаційній логіці визначається сукупністю факторів: адгезією і дефектністю шару, стабільністю у довготривалих водних режимах, стійкістю до термомеханічних впливів, а також тим, чи змінюють вони саме «мобільність» продуктів корозії (розчинені/колоїдні/частинкові форми) і схильність до депозиції. Тому екологічно коректне обґрунтування доцільності покриттів має виконуватися у зв'язці з іншими важелями мінімізації: порівнянням стратегій промивок (превентивні/лікувальні), умов формування відкладень та режимів очищення, а критерієм успішності має бути не лише зниження швидкості окиснення/корозії, а й статистично значиме зменшення проксі-показників (частоти промивок, витрат реагентів, маси вилучених шламів і витратних матеріалів) [21, 22].

Екологічна ефективність такого підходу в оглядовій постановці має оцінюватися через вплив на проксі-показники: зменшення мобільності корозійних продуктів у водних режимах, зниження схильності до депозиції/реосадження та, у високотемпературних режимах, через обмеження швидкості накопичення продуктів окиснення і потенційної дисперсності фази деградації.

Висновки. Екологічний ефект корозії у ВВЕР-1000 проявляється насамперед через утворення/перенос корозійних продуктів і пов'язані з цим очищення, промивки та вторинні потоки відходів і стоків. Стабільність оксидних плівок визначає мобільність корозійних продуктів (розчинення, відшарування, реосадження) і, відповідно, інтенсивність відкладення та потребу в промивках. Для першого контуру ($\approx 16,5$ МПа; 350 °С) екологічно релевантними є процеси депозиції/контамінації та накопичення продуктів корозії у системах очищення й відкладення. Для другого контуру ($\approx 6,4$ МПа; 280 °С) ключовим є вплив відкладень у парогенераторах і на теплообмінних поверхнях на частоту хімічних промивок і обсяги промивних середовищ та шламів. У режимах перегріву окиснення у водяній парі до 1200 °С може супроводжуватися прискореним накопиченням продуктів деградації та зміною їх морфології, що впливає на складність локалізації та поводження. Хромвмісні покриття є перспективним бар'єрним підходом для зниження мобільності продуктів корозії та потенційного зменшення корозійно-індукованого відходоутворення; їх доцільно оцінювати через проксі-показники переносу, відкладення і частоти промивок.

Література

1. Burrill K. A. Corrosion product transport in water-cooled nuclear reactors Part I Pressurized water operation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1977. No. 55(1). P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450550110>.

2. Lin C. C. A review of corrosion product transport and radiation field buildup in boiling water reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2009. No. 51(2). P. 207–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.05.005>.
3. Cherpın C., Dacquait F. Modeling particle deposition in the primary circuit of pressurized water reactors for the OSCAR code. *Annals of Nuclear Energy*. 2024. No. 199. 110364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110364>.
4. Dacquait F., Francescotto J., Tévisse E., Genin J.-B., You D., Cherpın C., Broutin F. Simulation of Co-60 uptake on stainless steel and alloy 690 using the OSCAR v1.4 code integrating an advanced dissolution-precipitation model. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. No. 405. 112190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112190>.
5. Xie Y., Zhang J. Corrosion and deposition on the secondary circuit of steam generators A critical review. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016. No. 53(10). P. 1455–1466. DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2016.1152923>.
6. Yang G., Pointeau V., Tévisse E., Chagnes A. A review on clogging of recirculating steam generators in Pressurized-Water Reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2017. No. 97. P. 182–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.01.010>.
7. Goujon C., Pauporté T., Bescond A., Mansour C., Delaunay S., Bretelle J.-L. Effects of curative and preventive chemical cleaning processes on fouled steam generator tubes in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2017. No. 323. P. 120–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.022>.
8. Jeon S.-H., Song G. D., Hur D. H. Micro-Galvanic Corrosion of Steam Generator Materials within Pores of Magnetite Flakes in Alkaline Solutions. *Metals*. 2018. No. 8(11). 899. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8110899>.
9. Hur D. H., Song G. D., Jeon S.-H., Lee H.-J. On the Use of NaOH Solution to Simulate the Crevice Conditions of a Nuclear Steam Generator. *Materials*. 2022. No. 15(23). 8471. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238471>.
10. Motta A. T., Couet A., Comstock R. J. Corrosion of zirconium alloys used for nuclear fuel cladding. *Annual Review of Materials Research*. 2015. No. 45(1). P. 311–343. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-020951>.
11. Ma H.-B., Yan J., Zhao Y.-H., Liu T., Ren Q.-S., Liao Y.-H., Zuo J.-D., Liu G., Yao M.-Y. Oxidation behavior of Cr-coated zirconium alloy cladding in high-temperature steam above 1200 °C. *npj Materials Degradation*. 2021. No. 5. 7. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00155-8>.
12. Deng J., Geng D., Sun Q., Song Z., Sun J. Steam oxidation of Cr-coated zirconium alloy claddings at 1200 °C Kinetics transition and failure mechanism of Cr coatings. *Journal of Nuclear Materials*. 2023. No. 586. 154684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154684>.
13. Brachet J.-C., Rouesne E., Ribis J., Urvoy S., et al. High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys Kinetics and process. *Corrosion Science*. 2020. No. 167. 108537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108537>.
14. Han X.-C., Xue J.-X., Peng S.-M., Zhang H.-B. An interesting oxidation phenomenon of Cr coatings on Zry-4 substrates in high temperature steam environment. *Corrosion Science*. 2019. No. 156. P. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.05.017>.
15. Brachet J.-C., Le Saux M., Bischoff J., Palancher H., Chosson R., et al. Evaluation of Equivalent Cladding Reacted parameters of Cr-coated claddings oxidized in steam at 1200 °C in relation with oxygen diffusion/partitioning and post-quench ductility. *Journal of Nuclear Materials*. 2020. No. 533. 152106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152106>.

16. Li Z., Wang X., Chen H., Zhang R., Wei T., Yao L., Wang P. Review on performance of chromium-coated zirconium and its failure mechanisms. *Frontiers in Nuclear Engineering*. 2023. No. 2. 1212351. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1212351>.

17. Tang Y., Liao J., Yun D. Understanding the high-temperature corrosion behavior of zirconium alloys. *Frontiers in Materials*. 2024. No. 11. 1381818. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1381818>.

18. Chen L., et al. Microstructure and high-temperature oxidation behaviour of anti-oxidation coating on zirconium alloys: An overview. *International Journal of Damage Mechanics*. 2024. (online). DOI: <https://doi.org/10.1177/02670844231214692>.

19. Trivedi K., Rane R., Mandapaka K. K., Lamba T. K., Joseph A., Roychowdhury S. High-Temperature and High-Pressure Steam Oxidation Behavior of TiN Coating Developed on Zircaloy-4 using Cylindrical Magnetron Sputtering Role of Thickness and Microstructure. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. No. 34(21). P. 24980–24996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11718-0>.

20. He H., Liu Y., Wang S., Zhang T., Chai X., Liu X. Review on corrosion-related unidentified deposit of pressurized water reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. No. 441. 114095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114095>.

21. Shtefan V. V., Kanunnikova N. A. Oxidation of AISI 304 steel in Al- and Ti-containing solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020. No. 56. P. 379. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205120020239>.

22. Shtefan V., Kanunnikova N., Zuyok V. Comparative evaluation of microstructure and electrochemical, high-temperature corrosion rates of titanium- and aluminum-modified black chromium coatings on AISI 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2025. No. 497. 131706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131706>.

Bibliography (transliterated)

1. Burrill K. A. Corrosion product transport in water-cooled nuclear reactors Part I Pressurized water operation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1977. No. 55(1). P. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450550110>.

2. Lin C. C. A review of corrosion product transport and radiation field buildup in boiling water reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2009. No. 51(2). P. 207–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2008.05.005>.

3. Cherpin C., Dacquait F. Modeling particle deposition in the primary circuit of pressurized water reactors for the OSCAR code. *Annals of Nuclear Energy*. 2024. No. 199. 110364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110364>.

4. Dacquait F., Francescato J., Tévisse E., Genin J.-B., You D., Cherpin C., Broutin F. Simulation of Co-60 uptake on stainless steel and alloy 690 using the OSCAR v1.4 code integrating an advanced dissolution-precipitation model. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. No. 405. 112190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112190>.

5. Xie Y., Zhang J. Corrosion and deposition on the secondary circuit of steam generators A critical review. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016. No. 53(10). P. 1455–1466. DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2016.1152923>.

6. Yang G., Pointeau V., Tévisse E., Chagnes A. A review on clogging of recirculating steam generators in Pressurized-Water Reactors. *Progress in Nuclear Energy*. 2017. No. 97. P. 182–196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.01.010>.

7. Goujon C., Pauporté T., Bescond A., Mansour C., Delaunay S., Bretelle J.-L. Effects of curative and preventive chemical cleaning processes on fouled steam generator tubes

in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2017. No. 323. P. 120–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.022>.

8. Jeon S.-H., Song G. D., Hur D. H. Micro-Galvanic Corrosion of Steam Generator Materials within Pores of Magnetite Flakes in Alkaline Solutions. *Metals*. 2018. No. 8(11). 899. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8110899>.

9. Hur D. H., Song G. D., Jeon S.-H., Lee H.-J. On the Use of NaOH Solution to Simulate the Crevice Conditions of a Nuclear Steam Generator. *Materials*. 2022. No. 15(23). 8471. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238471>.

10. Motta A. T., Couet A., Comstock R. J. Corrosion of zirconium alloys used for nuclear fuel cladding. *Annual Review of Materials Research*. 2015. No. 45(1). P. 311–343. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-020951>.

11. Ma H.-B., Yan J., Zhao Y.-H., Liu T., Ren Q.-S., Liao Y.-H., Zuo J.-D., Liu G., Yao M.-Y. Oxidation behavior of Cr-coated zirconium alloy cladding in high-temperature steam above 1200 °C. *npj Materials Degradation*. 2021. No. 5. 7. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00155-8>.

12. Deng J., Geng D., Sun Q., Song Z., Sun J. Steam oxidation of Cr-coated zirconium alloy claddings at 1200 °C Kinetics transition and failure mechanism of Cr coatings. *Journal of Nuclear Materials*. 2023. No. 586. 154684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154684>.

13. Brachet J.-C., Rouesne E., Ribis J., Urvoy S., et al. High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys Kinetics and process. *Corrosion Science*. 2020. No. 167. 108537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108537>.

14. Han X.-C., Xue J.-X., Peng S.-M., Zhang H.-B. An interesting oxidation phenomenon of Cr coatings on Zry-4 substrates in high temperature steam environment. *Corrosion Science*. 2019. No. 156. P. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.05.017>.

15. Brachet J.-C., Le Saux M., Bischoff J., Palancher H., Chosson R., et al. Evaluation of Equivalent Cladding Reacted parameters of Cr-coated claddings oxidized in steam at 1200 °C in relation with oxygen diffusion/partitioning and post-quench ductility. *Journal of Nuclear Materials*. 2020. No. 533. 152106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152106>.

16. Li Z., Wang X., Chen H., Zhang R., Wei T., Yao L., Wang P. Review on performance of chromium-coated zirconium and its failure mechanisms. *Frontiers in Nuclear Engineering*. 2023. No. 2. 1212351. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1212351>.

17. Tang Y., Liao J., Yun D. Understanding the high-temperature corrosion behavior of zirconium alloys. *Frontiers in Materials*. 2024. No. 11. 1381818. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1381818>.

18. Chen L., et al. Microstructure and high-temperature oxidation behaviour of anti-oxidation coating on zirconium alloys: An overview. *International Journal of Damage Mechanics*. 2024. (online). DOI: <https://doi.org/10.1177/02670844231214692>.

19. Trivedi K., Rane R., Mandapaka K. K., Lamba T. K., Joseph A., Roychowdhury S. High-Temperature and High-Pressure Steam Oxidation Behavior of TiN Coating Developed on Zircaloy-4 using Cylindrical Magnetron Sputtering Role of Thickness and Microstructure. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. No. 34(21). P. 24980–24996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11718-0>.

20. He H., Liu Y., Wang S., Zhang T., Chai X., Liu X. Review on corrosion-related unidentified deposit of pressurized water reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. No. 441. 114095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114095>.

21. Shtefan V. V., Kanunnikova N. A. Oxidation of AISI 304 steel in Al- and Ti-containing solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020. No. 56. P. 379. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205120020239>.

22. Shtefan V., Kanunnikova N., Zuyok V. Comparative evaluation of microstructure and electrochemical, high-temperature corrosion rates of titanium- and aluminum-modified black chromium coatings on AISI 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2025. No. 497. 131706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131706>.

УДК 504.054

Н. О. Кануннікова, д-р філософії, ст. наук. співроб., О. В. Шестопапов, канд. техн. наук, професор, А. О. Сакун, д-р філософії, доцент,
А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, О. В. Матющенко, аспірант

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ КОРОЗІЇ У КОНТУРАХ ВВЕР-1000 ТА ПІДХОДИ ДО ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

Атомна енергетика потребує оцінювання екологічних ризиків, пов'язаних не лише з радіаційними чинниками, а й з матеріалознавчими процесами, що визначають обсяги вторинних відходів. У роботі узагальнено сучасні уявлення про корозію та стабільність оксидних плівок у контурах ВВЕР-1000 і показано, що екологічний ефект корозії реалізується через ланцюг «утворення продуктів → перенос → відкладення → очищення/промивки → формування забруднених стоків і відходів». Для першого контуру ключовими є розчинення та диспергування корозійних продуктів, їх акумуляція у системах очищення й у відкладеннях, що збільшує масу фільтрувальних матеріалів, сорбентів і шламів, які підлягають регламентованому поводженню. Для другого контуру відкладення на теплообмінних поверхнях погіршують теплопередачу, підвищують гідравлічні опори та провокують хімічні промивки – пряме джерело технологічних стоків. Окремо розглянуто сценарії перегріву, коли окиснення у водяній парі супроводжується зміною морфології оксидів і зростанням термомеханічних напружень, що підвищує ризики швидкого накопичення продуктів деградації. Запропоновано підходи мінімізації екологічних наслідків: керування водно-хімічним режимом, матеріалознавчі/поверхневі рішення для підвищення стабільності оксидних шарів та оптимізація очищення і промивок із фокусом на зменшення реагентів і відходоутворення. Перспективним напрямом є застосування хромвмісних покриттів для зниження мобільності корозійних продуктів. Практичну екологічну оцінку запропоновано виконувати через систему проксі-показників, зокрема масовий потік корозійних продуктів до систем очищення, інтенсивність депозиції/реосадження, частоту промивок і витрати реагентів, а також масу вилучених шламів, фільтрів і сорбентів. Сформульовані підходи можуть бути використані для обґрунтування рішень з оптимізації водно-хімічного режиму та стратегій очищення з метою мінімізації технологічних скидів і відходоутворення впродовж експлуатаційного циклу енергоблока.

Ключові слова: ВВЕР-1000, екологічна безпека, корозія, оксидні плівки, корозійні продукти, теплоносії, водяна пара, перегрів.

N. O. Kanunnikova, O. V. Shestopalov, A. O. Sakun, A. S. Bosiuk, O. V. Matiushchenko

ENVIRONMENTAL IMPACTS OF CORROSION IN VVER-1000 CIRCUITS AND APPROACHES TO THEIR MINIMIZATION

The nuclear power industry requires an assessment of environmental risks associated not only with radiation factors but also with material-related processes that determine the volume of secondary waste. This paper summarizes current understanding of corrosion and the stability of oxide films in VVER-1000 circuits and demonstrates that the environmental impact of corrosion occurs through the chain “formation of products → transport → deposition → cleaning/flushing → formation of contaminated effluents and waste.” For the primary circuit, the key factors are the dissolution and dispersion of corrosion products, their accumulation in cleaning systems and in deposits, which increases the mass of filter materials, sorbents, and sludge subject to regulated disposal. For the second circuit, deposits on heat exchange surfaces impair heat transfer, increase hydraulic resistance, and trigger chemical rinses—a direct source of process effluents. Scenarios of overheating are considered separately, where oxidation in water vapor is accompanied by changes in oxide morphology and an increase in thermomechanical stresses, which heightens the risk of rapid accumulation of degradation products. Approaches to minimizing environmental impacts are proposed: control of the water-chemical regime, materials science/surface solutions to increase the stability of oxide layers, and optimization of cleaning and rinsing with a focus on reducing reagent use and waste generation. A promising direction is the use of chromium-containing coatings to reduce the mobility of corrosion products. A practical environmental assessment is proposed. It is proposed that practical environmental assessments be conducted using a system of proxy indicators, including the mass flow of corrosion products into treatment systems, the intensity of deposition/redeposition, the frequency of backwashing and reagent consumption, as well as the mass of removed sludge, filters, and sorbents. The formulated approaches can be used to justify decisions on optimizing the water-chemical regime and treatment strategies with the aim of minimizing process discharges and waste generation throughout the power unit’s operational cycle.

Keywords: VVER-1000, environmental safety, corrosion, oxide films, corrosion products, coolants, steam, overheating.

Отримано редколегією 16.03.2026

Кануннікова Надія Олександрівна (Nadiia Kanunnikova), д-р філософії, ст. науковий співробітник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0003-3611-6729>;

Шестопалов Олексій Валерійович (Oleksii Shestopalov), канд. техн. наук, професор, зав. каф. Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-6268-8638>;

Сакун Антоніна Олегівна (Antonina Sakun), д-р філософії, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0002-1079-7856>;

Босюк Альона Сергіївна (Alona Bosiuk), д-р філософії, ст. викладач Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0000-0001-5254-2272>;

Матющенко Олександр Вікторович (Oleksandr Matiushchenko), аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», <https://orcid.org/0009-0002-8771-6935>.