

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

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС ЗАСОБАМИ ПОВЕРХНЕВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЧНИХ ВИКЛИКІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: атомна енергетика, екологічна безпека, захисні покриття, корозія, поверхнева інженерія, техногенні ризики, надійність обладнання.

Вступ. Атомна енергетика залишається важливим компонентом енергетичного балансу багатьох країн світу завдяки високій енергоємності ядерного палива та здатності забезпечувати стабільне виробництво електроенергії при відносно невеликих витратах ресурсів. Проте ефективна експлуатація атомних електростанцій (АЕС) пов'язана з численними техногенними викликами, зокрема із деградацією обладнання, що може призводити до порушення цілісності систем охолодження, виникнення витоків радіонуклідів та можливих аварійних ситуацій. Сучасні дослідження підтверджують, що пошкодження ключових елементів енергетичного обладнання має безпосередній вплив на збільшення ризику витoku шкідливих речовин у довкілля, що створює загрозу як для здоров'я населення, так і для екосистем [1, 2]. Як зазначено у [3], ядерний паливний цикл, що включає видобуток урану, його збагачення, використання в реакторах та утилізацію відходів, створює значні екологічні виклики. Зокрема, природний уран, що складається з ізотопів ^{235}U та ^{238}U , є джерелом радіоактивних продуктів ділення, таких як ^{133}Xe , ^{131}I та ^{144}Ce , які можуть потрапляти в довкілля через мікротріщини в обладнанні. Навіть за нормальних умов експлуатації ризик хронічного викиду ізотопів через деградацію матеріалів залишається актуальним, що підкреслює необхідність використання захисних покриттів для забезпечення герметичності бар'єрних систем.

Зростання експлуатаційних навантажень, інтенсивність хімічних та термічних впливів, а також вплив радіації спричиняють поступову втрату первинних властивостей конструкційних матеріалів в обладнанні АЕС. На практиці це відображається у значному зниженні терміну служби критичних елементів, таких як трубопроводи, теплообмінники та контури охолодження, що стають вразливими до корозійних процесів [4]. Схема основних технологічних контурів реактора типу ВВЕР демонструє ключову роль першого контуру в ізоляції радіоактивного теплоносія від довкілля. Пошкодження трубопроводів або теплообмінників першого контуру через корозію чи ерозію може призвести до витoku радіонуклідів. Застосування захисних покриттів, таких як хромові або алюмінієві шари, знижує інтенсивність корозійних процесів, що підтверджується дослідженнями [4, 5], і забезпечує надійність бар'єрних систем, мінімізуючи ризик екологічних аварій. Деформація, мікротріщини та інші пошкодження не лише знижують технічну надійність, але й можуть стати причиною витоків радіоактивних речовин, що в умовах аварій може призвести до масштабних екологічних катастроф.

У зв'язку з цим виникає необхідність у пошуку ефективних методів запобігання деградації поверхонь матеріалів, що використовуються в обладнанні АЕС. Сучасна по-

верхнева інженерія, заснована на використанні захисних покриттів, демонструє значний потенціал у збільшенні стійкості матеріалів до корозії, термічного старіння та впливу радіації [6–8]. Функціональні покриття, отримані з використанням електрохімічного осадження, плазмової або термічної обробки, здатні створювати додатковий бар'єр між агресивним середовищем і основною металевую структурою обладнання. Такі технології дозволяють не лише продовжити експлуатаційний ресурс обладнання, але й зменшити ризики аварійних ситуацій, що безпосередньо впливають на екологічну безпеку [9]. За даними [10], рідкі радіоактивні відходи зберігаються у спеціальних бетонних сховищах, що потребує значних ресурсів для їхньої утилізації. Застосування захисних покриттів на основі хрому або титану, як показано в [4, 6], дозволяє зменшити частоту заміни обладнання, що піддається корозії, а отже, скоротити обсяги радіоактивних відходів, які виникають у процесі ремонтів та утилізації зношених компонентів, що сприяє зниженню екологічного навантаження та відповідає принципам сталого розвитку в атомній енергетиці.

Важливим аспектом є інтеграція нових покриттів з сучасними системами моніторингу та контролю, що дозволяє оперативно визначати стан покриттів і вчасно проводити профілактичні заходи. Системи захисту реактора при втраті теплоносія дозволяють оперативно виявляти мікродефектів і замінювати пошкоджені елементи [11]. Однак, як показано в [6, 12], використання захисних покриттів може попередити появу таких дефектів, зменшуючи потребу в аварійних зупинках і знижуючи ризик неконтрольованого викиду радіонуклідів, що особливо важливо з огляду на наслідки аварій на Чорнобильській та Фукусімській АЕС, де деградація матеріалів посилила екологічні наслідки [1, 12]. За даними сучасних досліджень, використання методів імпедансної спектроскопії дозволяє передбачити деградацію покриттів на ранніх етапах, що сприяє підвищенню загальної безпеки роботи АЕС [2]. Крім того, впровадження новітніх матеріалознавчих рішень сприяє зниженню обсягів відходів у виробничих процесах, що є важливим елементом сучасної екологічної політики на ринку енергетики.

Актуальність дослідження підкріплюється й даними, отриманими після аварійних ситуацій на Чорнобильській та Фукусімській АЕС, де пошкодження обладнання значно посилило екологічну загрозу через розповсюдження радіонуклідів [1]. В умовах сучасної геополітичної нестабільності та зростаючих вимог щодо екологічної відповідальності технологічні рішення, спрямовані на підвищення надійності за допомогою захисних покриттів, набувають особливої ваги.

Метою даної статті є обґрунтування доцільності застосування сучасних методів поверхневої інженерії для підвищення експлуатаційної надійності та екологічної безпеки енергетичного обладнання АЕС. У роботі аналізуються основні джерела ризиків, наслідки аварійних ситуацій та перспективи використання інноваційних захисних покриттів для запобігання деградації матеріалів.

Необхідність модернізації існуючих конструкцій через використання нових матеріалів і технологій покриття підтверджується як науковими дослідженнями [14], так і практичними результатами експериментальних робіт. У майбутньому розробка та впровадження таких систем має стати основою для зниження інцидентів, пов'язаних із пошкодженням обладнання, і сприятиме сталому розвитку атомної енергетики.

Схема основних технологічних контурів АЕС з реактором ВВЕР (рис. 1) ілюструє двоконтурну систему, яка забезпечує ефективне виробництво електроенергії з використанням теплоти активної зони реактора.

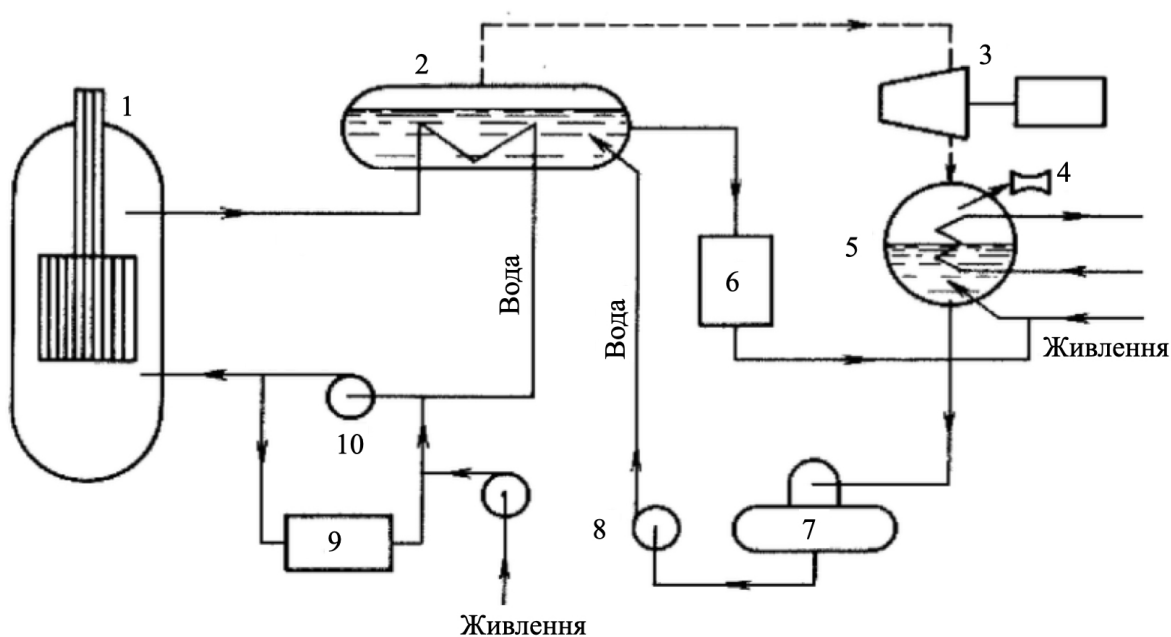


Рисунок 1 – Схема основних технологічних контурів АЕС з реактором ВВЕР:
1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – турбогенератор; 4 – ежектор; 5 – конденсатор;
6 – спеціальне водоочищення другого контуру; 7 – деаератор; 8 – живильний насос;
9 – байпасне очищення; 10 – головний циркуляційний насос

Тепло від реактора (поз. 1) передається через парогенератор (поз. 2) до другого контуру, де вода перетворюється на пар для турбогенератора (поз. 3). Відпрацьований пар конденсується (поз. 5), очищається (поз. 6 та 7) і повертається насосами (поз. 8) до парогенератора. Перший контур ізолюваний від другого, що мінімізує ризик витоку радіонуклідів. Байпасне очищення (поз. 9) і головний циркуляційний насос (поз. 10) забезпечують безпеку та ефективність роботи першого контуру.

Проте, незважаючи на ефективну ізоляцію, тривала експлуатація першого контуру під високим тиском і температурою (15,7 МПа та до 322 °С) призводить до деградації матеріалів, таких як трубопроводи та теплообмінники, що може спричинити корозію, мікротріщини та потенційні витoki радіоактивних речовин. Це підкреслює важливість додаткових захисних заходів для підвищення надійності системи. На рис. 2 наведено деталізовану схему, яка ілюструє принципи застосування таких заходів. Зокрема, перший контур виконує критично важливу функцію – він ізолює радіоактивний теплоносі, який циркулює між активною зоною реактора і парогенератором, не допускаючи його контакту з компонентами другого контуру, де утворюється пара для турбіни, що забезпечує захист навколишнього середовища і персоналу від радіоактивного опромінення навіть у разі аварійної ситуації.

На схемі зазначено ключові зони застосування захисних покриттів, які знижують ризик корозії, утворення мікротріщин і витоку радіонуклідів, а також сприяють довговічності обладнання. У схемі виділено системи моніторингу (імпедансна спектроскопія) та аварійного захисту, а також показано, що завдяки ефективним покриттям зменшуються обсяги радіоактивних відходів.

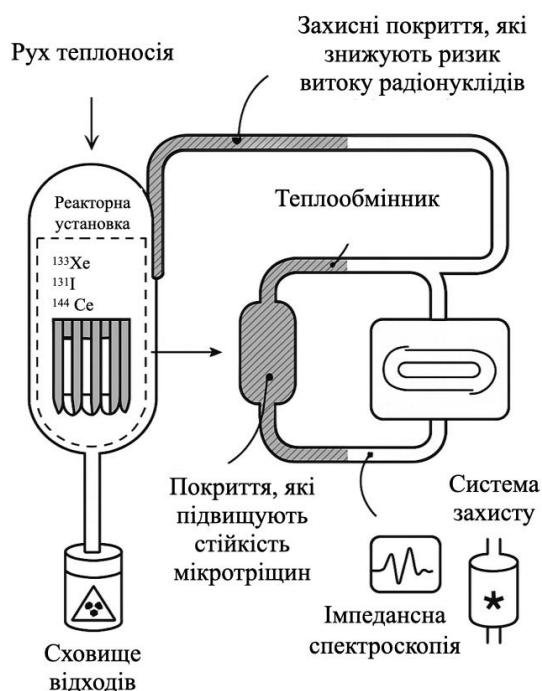


Рисунок 2 – Схема першого контуру реактора типу ВВЕР із застосуванням захисних покриттів

Обговорення результатів. Умови експлуатації енергетичного обладнання АЕС характеризуються складним поєднанням впливів: високотемпературного середовища, інтенсивного нейтронного опромінення, агресивного хімічного впливу теплоносія та циклічного навантаження. Усе це призводить до прискореної деградації конструкційних матеріалів, зокрема металевих компонентів першого контуру реакторів [15, 16].

Особливу небезпеку становлять корозійно-механічне руйнування, хімічна корозія, ерозія поверхонь, а також радіаційне ушкодження кристалічної ґратки металів. Як зазначено у роботі [17], значна частина аварій на ядерних об'єктах пов'язана саме з втратою цілісності матеріалів, що виконують бар'єрні функції між радіоактивною речовиною і навколишнім середовищем. Наприклад, оболонки тепловидільних елементів (твелів) піддаються корозії під дією боровмісного теплоносія та накопиченням гідрогену, що спричиняє гідридне крихке руйнування. Аналогічно, трубопроводи та теплообмінники першого контуру зазнають інтенсивної ерозійно-корозійної дії, особливо у зонах турбулентності. Авторами [18] встановлено, що навіть у нормальному режимі експлуатації існує ризик хронічного викиду ізоотопів через мікропошкодження металевих оболонок, що спричиняє тривалий екологічний вплив. Варто наголосити, що сучасні дослідження свідчать про поступове зменшення ресурсу конструкцій за рахунок кумулятивного ефекту опромінення та високих температур, що, за відсутності додаткових захисних рішень, може призвести до аварій із викидом радіоактивних речовин у довкілля [12, 19].

Деградація конструкційних матеріалів, що експлуатуються в умовах підвищеного температурного та радіаційного навантаження, безпосередньо впливає на рівень екологічної безпеки атомної електростанції. Зокрема, пошкодження оболонок тепловидільючих елементів, трубопроводів і зварних з'єднань першого контуру підвищує ризик неконтрольованого витоку радіонуклідів у довкілля. Навіть незначна втрата герметичності системи може призвести до проникнення радіоактивних речовин у водне або гру-

ндове середовище, спричиняючи довготривале забруднення. Дослідження [6] показують, що такі витoki частіше спостерігаються в регіонах, де проживають соціально вразливі групи населення, що посилює явище екологічної несправедливості, коли вплив техногенних факторів стає непропорційно вищим для окремих спільнот. Крім того, наслідки аварійної деградації матеріалів можуть бути масштабними. Як свідчить аналіз подій на АЕС у Чорнобилі та Фукусімі, у разі критичних пошкоджень забруднення охоплює значні площі, а екосистеми потребують десятиліть для часткового відновлення [12].

Ризик накопичення довгоживучих ізотопів існує навіть за нормальних умов експлуатації, особливо в процесі охолодження та зберігання відпрацьованого палива, що підтверджує важливість запровадження ефективних антикорозійних рішень, які дозволяють уникнути первинного порушення бар'єрних функцій обладнання та мінімізують техногенне навантаження на довкілля.

У процесі роботи реактора продукти ділення (зокрема ^{133}Xe , ^{131}I , ^{144}Ce) та активовані елементи конструкцій утворюють складну радіонуклідну суміш. Навіть незначна втрата герметичності оболонок твелів може спричинити витік таких ізотопів, зокрема тритію, через мікротріщини в охолоджуючому середовищі.

Одним із найбільш ефективних способів запобігання деградації конструкційних матеріалів в умовах експлуатації атомних електростанцій є використання спеціалізованих захисних покриттів. Такі покриття формуються за допомогою методів поверхневої інженерії та здатні значно підвищити корозійну, термічну та радіаційну стійкість металів. Згідно з дослідженням [4], багаторічне спостереження за станом трубопроводів парогенераторів у реакторах типу ВВЕР показало, що застосування пасивувальних плівок знижує інтенсивність утворення оксидів та суттєво сповільнює процеси міжкристалітної корозії. Особливо ефективними виявилися покриття, модифіковані хромом, алюмінієм або титаном. У дослідженні [6, 12] підтверджено, що хромові та титанові шари забезпечують кращу адгезію, знижують окислення при 800 °C і підвищують стійкість до локалізованої корозії у хлоридних середовищах.

Захисні покриття не лише подовжують ресурс елементів обладнання, але й опосередковано впливають на екологічну безпеку. Зменшення кількості ремонтів, замін і утилізації зношених компонентів сприяє зниженню обсягу радіоактивних та хімічно активних відходів. Крім того, покращення герметичності технологічних бар'єрів мінімізує ймовірність витoku радіонуклідів у разі аварійної ситуації.

Інтеграція інноваційних захисних покриттів у практику української атомної енергетики є стратегічно доцільною, зважаючи на високий ступінь зносу основного обладнання та необхідність підвищення екологічної безпеки. Як підкреслюється у роботах [12, 18], екологічна модернізація АЕС є ключовим завданням у контексті забезпечення справедливого та безпечного енергетичного переходу.

Висновки. Аналіз показав, що деградація конструкційних матеріалів обладнання першого контуру АЕС, зокрема теплообмінників, оболонок твелів та зварних з'єднань, залишається одним із ключових техногенних ризиків для екологічної безпеки в енергетичному секторі. Пошкодження внаслідок корозії, термічних навантажень та радіаційного опромінення значно підвищує ймовірність аварій із витокom радіонуклідів, особливо в умовах зростаючих змін клімату та збільшення навантаження на існуючі енергоблоки. Використання сучасних захисних покриттів, зокрема на основі чорного хрому, модифікованого алюмінієм та титаном, дозволяє суттєво підвищити стійкість матеріалів до високотемпературного та електрохімічного впливу, зменшуючи ймовір-

ність втрати герметичності. Захисні технології поверхневої інженерії сприяють зменшенню обсягу радіоактивних відходів, подовженню ресурсу обладнання та загальному зниженню екологічного навантаження на довкілля.

Література

1. Lipka J., Slugen V., Toth I. et al. Phase Analysis of Corrosion Products from Nuclear Power Plants. *Hyperfine Interactions*. 2002. No. 139. P. 501–511. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021210425602>.
2. Aszódi A., Biró B., Adorján L. et al. The effect of the future of nuclear energy on the decarbonization pathways and continuous supply of electricity in the European Union. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. No. 415. 112688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112688>.
3. Alwaeli M., Mannheim V. Investigation into the Current State of Nuclear Energy and Nuclear Waste Management – A State-of-the-Art Review. *Energies*. 2022. No. 15(12). 4275. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124275>.
4. Baja B., Varga K., Szabó N. A. et al. Long-term trends in the corrosion state and surface properties of the stainless steel tubes of steam generators decontaminated chemically in VVER-type nuclear reactors. *Corrosion Science*. 2009. No. 51(12). P. 2831–2839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.007>.
5. 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>.
6. 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>.
7. Skalozubov V., Melnik S., Vashchenko V. et al. The method of express analysis of nuclear and ecological safety during the modernization of nuclear fuel. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2023. No. 32(2). P. 388–395. DOI: <https://doi.org/10.15421/112335>.
8. Lin R. T., Boonhat H., Lin Y. Y. et al. Health Effects of Occupational and Environmental Exposures to Nuclear Power Plants: A Meta-Analysis and Meta-Regression. *Current Environmental Health Reports*. 2024. No. 11. P. 329–339. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-024-00453-8>.
9. Skalozubov V., Vierinov O., Kanivets A. et al. Risk-informed method for qualifying strategies for operation control of metal of safety related systems of nuclear power plants. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2023. No. 2(68). DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.05>.
10. Luhar I., Luhar S., Abdullah M. M. A. B., Sandu A. V., Vizureanu P., Razak R. A., Burduhos-Nergis D. D., Imjai T. Solidification/Stabilization Technology for Radioactive Wastes Using Cement: An Appraisal. *Materials*. 2023. Vol. 16, iss. 3. 954. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16030954>.

11. Slugeň V. Defence in Depth of VVER-440 Reactors. In: *Safety of VVER-440 Reactors*. 2011. P. 5–15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-84996-420-3_3.
12. Klingelhöfer D., Braun M., Oremek G. M. et al. Global research on nuclear energy in the context of health and environmental risks, considering economic interests. *WIREs Energy Environ.* 2024. No. 13. e497. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.497>.
13. Ye Q.-Z. Safety and effective developing nuclear power to realize green and low-carbon development. *Advances in Climate Change Research*. 2016. No. 7(1–2). P. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accres.2016.06.005>.
14. Khomiak E., Trishch R., Nazarko J. et al. Method of Quality Control of Nuclear Reactor Element Tightness to Improve Environmental Safety. *Energies*. 2025. No. 18. 2172. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092172>.
15. Brynk T., Perosanz Lopez F. J., McLennan A. Increase of nuclear installations safety by better understanding of materials performance and new testing techniques development (MEACTOS, INCEFA-SCALE, and FRACTESUS H2020 projects). *EPJ Nuclear Science and Technology*. 2022. No. 8. 42. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2022033>.
16. Mondal D., Garai T., Roy G. C., Alam S. Evaluating the nuclear power plant safety system under neutrosophic environment. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2024. No. 72(1).
17. Korduba I., Patlashenko Z., Zhukova O. Prospects of Technological Improvement of Nuclear and Environmental Safety of World Energy. *Open Journal of Ecology*. 2023. No.13. P. 536–548. DOI: <https://doi.org/10.4236/oje.2023.138033>.
18. Höffken J., Ramana M. V. Nuclear power and environmental injustice. *WIREs Energy Environ.* 2024. No. 13. e498. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.498>.
19. Kravchenko V., Kozlov I., Vashchenko V. et al. Increasing the Efficiency and Level of Environmental Safety of Pro-Environmental City Heat Supply Technologies by Low Power Nuclear Plants. *World Journal of Nuclear Science and Technology*. 2024. No. 14. P. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjnst.2024.142006>.

Bibliography (transliterated)

1. Lipka J., Slugen V., Toth I. et al. Phase Analysis of Corrosion Products from Nuclear Power Plants. *Hyperfine Interactions*. 2002. No. 139. P. 501–511. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021210425602>.
2. Aszódi A., Biró B., Adorján L. et al. The effect of the future of nuclear energy on the decarbonization pathways and continuous supply of electricity in the European Union. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. No. 415, Article 112688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112688>.
3. Alwaeli M., Mannheim V. Investigation into the Current State of Nuclear Energy and Nuclear Waste Management – A State-of-the-Art Review. *Energies*. 2022. No. 15(12), Article 4275. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124275>.
4. Baja B., Varga K., Szabó N. A. et al. Long-term trends in the corrosion state and surface properties of the stainless steel tubes of steam generators decontaminated chemically in VVER-type nuclear reactors. *Corrosion Science*. 2009. No. 51(12). P. 2831–2839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.007>.

5. 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>.
6. 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, Article 131706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131706>.
7. Skalozubov V., Melnik S., Vashchenko V. et al. The method of express analysis of nuclear and ecological safety during the modernization of nuclear fuel. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2023. No. 32(2). P. 388–395. DOI: <https://doi.org/10.15421/112335>.
8. Lin R. T., Boonhat H., Lin Y. Y. et al. Health Effects of Occupational and Environmental Exposures to Nuclear Power Plants: A Meta-Analysis and Meta-Regression. *Current Environmental Health Reports*. 2024. No. 11. P. 329–339. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-024-00453-8>.
9. Skalozubov V., Vierinov O., Kanivets A. et al. Risk-informed method for qualifying strategies for operation control of metal of safety related systems of nuclear power plants. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2023. No. 2(68). DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.68.2023.05>.
10. Luhar I., Luhar S., Abdullah M. M. A. B., Sandu A. V., Vizureanu P., Razak R. A., Burduhos-Nergis D. D., Imjai T. Solidification/Stabilization Technology for Radioactive Wastes Using Cement: An Appraisal. *Materials*. 2023. Vol. 16, iss. 3, Article 954. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16030954>.
11. Slugeň V. Defence in Depth of VVER-440 Reactors. In: *Safety of VVER-440 Reactors*. 2011. P. 5–15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-84996-420-3_3.
12. Klingelhöfer D., Braun M., Oremek G. M. et al. Global research on nuclear energy in the context of health and environmental risks, considering economic interests. *WIREs Energy Environ*. 2024. No. 13. e497. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.497>.
13. Ye Q.-Z. Safety and effective developing nuclear power to realize green and low-carbon development. *Advances in Climate Change Research*. 2016. No. 7(1–2). P. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accr.2016.06.005>.
14. Khomiak E., Trishch R., Nazarko J. et al. Method of Quality Control of Nuclear Reactor Element Tightness to Improve Environmental Safety. *Energies*. 2025. No. 18, Article 2172. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092172>.
15. Brynk T., Perosanz Lopez F. J., McLennan A. Increase of nuclear installations safety by better understanding of materials performance and new testing techniques development (MEACTOS, INCEFA-SCALE, and FRACTESUS H2020 projects). *EPJ Nuclear Science and Technology*. 2022. № 8. 42. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2022033>.
16. Mondal D., Garai T., Roy G. C., Alam S. Evaluating the nuclear power plant safety system under neutrosophic environment. *Neutrosophic Sets and Systems*. 2024. No. 72(1).
17. Korduba I., Patlashenko Z., Zhukova O. Prospects of Technological Improvement of Nuclear and Environmental Safety of World Energy. *Open Journal of Ecology*. 2023. No. 13. P. 536–548. DOI: <https://doi.org/10.4236/oje.2023.138033>.

18. Höffken J., Ramana M. V. Nuclear power and environmental injustice. *WIREs Energy Environ.* 2024. No. 13. e498. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.498>.

19. Kravchenko V., Kozlov I., Vashchenko V. et al. Increasing the Efficiency and Level of Environmental Safety of Pro-Environmental City Heat Supply Technologies by Low Power Nuclear Plants. *World Journal of Nuclear Science and Technology.* 2024. No. 14. P. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjnst.2024.142006>.

УДК 504.054

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

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС ЗАСОБАМИ ПОВЕРХНЕВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ В УМОВАХ ЕКОЛОГІЧНИХ ВИКЛИКІВ

У роботі досліджено актуальну проблему підвищення надійності енергетичного обладнання атомних електростанцій (АЕС) шляхом застосування методів поверхневої інженерії в умовах екологічних викликів. Атомна енергетика відіграє ключову роль у забезпеченні стабільного енергопостачання, однак її ефективна експлуатація ускладнюється деградацією матеріалів обладнання через корозію, термічні та радіаційні впливи. Це створює ризики втрати герметичності бар'єрних систем, що може призвести до витоку радіонуклідів, таких як ^{133}Xe , ^{131}I , ^{144}Ce , та інших продуктів ядерного ділення, спричиняючи екологічні загрози. Дослідження акцентує увагу на застосуванні захисних покриттів, зокрема хромових, алюмінієвих і титанових, для зниження корозійних процесів, подовження терміну служби критичних елементів (трубопроводів, теплообмінників, оболонок твелів) та зменшення обсягів радіоактивних відходів.

У статті проаналізовано основні техногенні ризики, пов'язані з деградацією обладнання першого контуру реакторів типу ВВЕР, та розглянуто вплив корозії, ерозії та радіаційного ушкодження на екологічну безпеку. Показано, що сучасні методи поверхневої інженерії, такі як електрохімічне осадження та плазмова обробка, дозволяють створювати ефективні захисні шари, які знижують інтенсивність міжкристалітної корозії та гідридного руйнування. Інтеграція захисних покриттів із системами моніторингу, зокрема імпедансною спектроскопією, забезпечує раннє виявлення дефектів, зменшуючи ймовірність аварій.

Особлива увага приділена аналізу наслідків аварій на Чорнобильській та Фукусімській АЕС, які підкреслили критичну роль надійності обладнання в запобіганні екологічним катастрофам. Застосування захисних покриттів сприяє не лише підвищенню безпеки, але й зниженню екологічного навантаження шляхом скорочення обсягів відходів і ресурсів, необхідних для ремонту та утилізації.

Метою роботи є обґрунтування доцільності використання інноваційних покриттів для підвищення експлуатаційної надійності та екологічної безпеки АЕС. Дослідження підтверджує, що впровадження таких технологій відповідає принципам сталого

розвитку, знижуючи техногенне навантаження та сприяючи безпечному енергетичному переходу.

Ключові слова: атомна енергетика, екологічна безпека, захисні покриття, корозія, поверхнева інженерія, техногенні ризики, надійність обладнання.

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

INCREASING THE RELIABILITY OF NPP POWER EQUIPMENT USING SURFACE ENGINEERING MEANS IN THE CONDITIONS OF ENVIRONMENTAL CHALLENGES

The paper investigates the topical issue of improving the reliability of nuclear power plant (NPP) equipment by applying surface engineering methods in the context of environmental challenges. Nuclear energy plays a key role in ensuring a stable energy supply, but its effective operation is complicated by the degradation of equipment materials due to corrosion, thermal and radiation effects. This creates risks of barrier system leaks, which can lead to the release of radionuclides such as ^{133}Xe , ^{131}I , ^{144}Ce , and other nuclear fission products, causing environmental threats. The study focuses on the use of protective coatings, in particular chrome, aluminium and titanium, to reduce corrosion processes, extend the service life of critical elements (pipelines, heat exchangers, fuel element cladding) and reduce the volume of radioactive waste.

The article analyses the main man-made risks associated with the degradation of VVER reactor primary circuit equipment and considers the impact of corrosion, erosion and radiation damage on environmental safety. It is shown that modern surface engineering methods, such as electrochemical deposition and plasma treatment, allow the creation of effective protective layers that reduce the intensity of intergranular corrosion and hydride destruction. The integration of protective coatings with monitoring systems, in particular impedance spectroscopy, ensures early detection of defects, reducing the likelihood of accidents.

Particular attention is paid to analysing the consequences of accidents at the Chernobyl and Fukushima nuclear power plants, which highlighted the critical role of equipment reliability in preventing environmental disasters. The use of protective coatings not only improves safety but also reduces the environmental impact by reducing the amount of waste and resources required for repair and disposal.

The aim of the work is to justify the use of innovative coatings to improve the operational reliability and environmental safety of nuclear power plants. The study confirms that the introduction of such technologies is consistent with the principles of sustainable development, reducing man-made impact and promoting a safe energy transition.

Keywords: nuclear energy, environmental safety, protective coatings, corrosion, surface engineering, man-made risks, equipment reliability.