

DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-61-72

УДК 621.039(045)

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ АЕС У ПОНАДПРОЕКТНИЙ ТЕРМІН В КОНТЕКСТІ ПЕРЕХОДУ ДО ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ: ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ЗЕЛЕНИЙ КУРС

© Грінченко Г.С.¹, Ковтун О.А.², Миколайко В.В.³, Нестеренко Р.О.¹, Антоненко Н.С.¹

*Українська інженерно-педагогічна академія¹, Університет Григорія Сковороди
в Переяславі², Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини³*

Інформація про авторів:

Грінченко Ганна Сергіївна (Грінченко Анна Сергеевна, Hrinchenko Hanna): ORCID: 0000-0002-6498-6142; e-mail: hgrinchenko@uipa.edu.ua кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Ковтун Оксана Анатоліївна (Ковтун Оксана Анатольевна, Kovtun Oksana): ORCID: 0000-0002-9516-8628; e-mail: kovtunok@ukr.net, кандидат педагогічних наук, доцент, Університет Григорія Сковороди в Переяславі, Проректор з міжнародних зв'язків та проєктної діяльності, вул. Сухомлинського, 30 м. Переяслав, Київська область, 08401, Україна.

Миколайко Володимир Валерійович (Мыколайко Владимир Валерьевич, Mykolaiko Volodymyr): ORCID: 0000-0002-0515-1241; e-mail: v.mykolaiko@udpu.edu.ua, кандидат педагогічних наук, доцент, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, проректор з міжнародних зв'язків та стратегічного розвитку, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська область, Україна, 20300.

Нестеренко Роман Олександрович (Нестеренко Роман Александрович, Nesterenko Roman): ORCID: 000-0003-2361-9271.; e-mail: roman.nesterenko.uera@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, старший викладач кафедри іншомовної підготовки, європейської інтеграції та міжнародного співробітництва, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Антоненко Наталія Сергіївна (Антоненко Наталья Сергеевна, Antonenko Nataliia): ORCID: 0000-0001-8319-2826; e-mail: nsantonenko2015@gmail.com, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, декан факультету енергетики і автоматизації, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статті розглянуто шляхи забезпечення енергетичної безпеки атомних електростанцій як один із напрямків забезпечення циркуляційної економіки в рамках Європейського зеленого курсу. Проаналізовано необхідність енергетичних ресурсів, а саме атомної енергетики, як один з видів “зеленої” енергії, та її роль у “зеленій” трансформації. На основі проведеного аналізу виявлено, що для ефективної зеленої трансформації потрібно забезпечити енергетичну безпеку експлуатації обладнання, що можливо шляхом розробки ефективних науково-обґрунтованих підходів технічної діагностики стану енергосистем та окремого обладнання. Запропоновано методика проведення досліджень технічного стану енергообладнання та представлено результати експериментальних досліджень на прикладі трубопровідних систем головного циркуляційного контуру атомної електростанції. Експериментальні дані, які включали в собі визначення товщини стінки та твердості металу на різних ділянках трубопроводу, порівнювались з вимогами нормативних документів та було виявлено, що дефектів та відхилень від нормативних параметрів не виявлено. На основі проведених експериментальних досліджень запропоновано розрахунковий прогноз подальшої безпечної експлуатації енергообладнання до 2035 року, що передбачає і позапроєктний термін експлуатації, як елемент циркуляційної економіки. З метою уточнення прогнозних графіків в якості рекомендацій з управління технічним станом та експлуатаційною безпекою запропоновано запланувати і виконати під час проведення капітального ремонту в період планово-попереджувального ремонту 2024р контроль та діагностику технічних параметрів енергообладнання.

Ключові слова: Європейський зелений курс, циркуляційна економіка, атомна енергетика, енергетична безпека, прогнозування, зелена енергетика.

Hrinchenko H., Kovtun O., Mykolaiko V., Nesterenko R., Antonenko N. “Ensuring Operational Safety of NPPs beyond the Design Life in the Context of Transition to a Circular Economy: The European Green Deal”

The article discusses ways to ensure energy security of nuclear power plants as one of the areas of circular economy within the framework of the European Green Deal. The necessity of energy resources, namely nuclear energy as a type of "green" energy, and its role in the "green" transformation are analyzed. Based on the analysis, it is found that for an effective green transformation it is necessary to ensure energy safety of equipment operation, which is possible by developing effective science-based approaches to technical diagnostics of the state of power systems and individual equipment. The paper proposes a methodology for conducting studies of the technical condition of power equipment and presents the results of experimental studies on the example of pipeline systems of the main circulation circuit of a nuclear power plant. The experimental data, which included the determination of wall thickness and metal hardness in different sections of the pipeline, were compared with the requirements of regulatory documents and it was found that no defects or deviations from the regulatory parameters were detected. Based on the experimental studies, a calculated forecast of further safe operation of power equipment until 2035 was proposed, which also includes the off-design life as an element of the circular economy. In order to refine the forecast schedules, as recommendations for managing the technical condition and operational safety, it is proposed to plan and perform control and diagnostics of technical parameters of power equipment during the overhaul in the period of scheduled preventive maintenance in 2024.

Keywords: European Green Deal, circular economy, nuclear power, energy security, energy forecasting, green energy.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний стан економічної, соціальної та екологічної систем в світі перебуває у напруженому становищі, через виклики, що постали перед суспільством за період індустріалізації, зі збільшення чисельності населення, що потребує збільшення ресурсів та випробуванням останніх років, як то COVID-19, збройні конфлікти, тощо. Зараз Україна знаходиться в умовах війни, що в умовах глобалізації впливає як на соціально-економічну, так і на екологічну систему в державі та світі, адже наша країна є одним з ключових постачальників різних видів ресурсів (продовольчих, енергетичних, тощо) для Європи та світу. Обмеженість ресурсів спонукає країни Європейського Союзу (ЄС) та інші країни світу до рішучих дій, а саме до змін у напрямку забезпечення сталого розвитку шляхом переходу від лінійної моделі економіки за принципом "Бери-Роби Викидай" до циркулярної (кругової). Принципи циркулярної економіки впроваджуються в країнах ЄС в рамках Європейського зеленого курсу (ЄЗК) та регулюються на державному рівні, шляхом запровадження політичних ініціатив у різні сектори господарства. Циркуляційна економіка, як напрямок Європейський зеленого курсу спрямована на збереження ресурсів та підвищення ефективності їх використання, зменшення кількості відходів, покращення стану навколишнього середовища, підвищення конкурентоспроможності продукції на основі використання енергоефективних технологій, що в свою чергу покращить економічне та соціальне становище.

Перехід України до циркулярної економіки є одним з важливих етапів євроінтеграції, що дає нові перспективи до сталого розвитку та можливості забезпечення конкурентоспроможності продукції. Разом з тим постають питання щодо стратегії реалізації цього етапу та плавного, а головне безпечного, переходу до ЄЗК з урахуванням потреб в ресурсах для населення. Одним з невід'ємних ресурсних детермінант, що визначають якість життя, є енергетичні потреби і атомна енергетики відіграє значну частку у задоволенні їх та визнана Єврокомісією як "зелена" енергетика у 2022 році, що сприяє до «зеленої

трансформації» та переходу до кліматичної нейтральності. При цьому, обов'язковою умовою є ядерна безпека та безпечність експлуатації атомних електростанцій та їх обладнання. В Україні на сьогоднішній час частина енергоблоків закінчила свій закладений проєктний ресурс або наближається до цього, отже важливим завданням є продовження експлуатаційного ресурсу, як складової циркулярної економіки, у понадпроєктний термін забезпечивши при цьому безпеку та надійність роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зростання чисельності населення планети вимагає все більшого задоволення енергетичних потреб, а основним джерелом енергії, що використовується до цього часу, є викопні види палива. Ядерна енергія, вироблена в ядерному реакторі, використовується як конкурентний внесок з іншими джерелами електричної енергії, такими як вугілля, нафта, газ, вода та інші. Таким чином, внесок енергії з різних аспектів стає чимось, що повинно сприйматися як взаємовигідний стратегічний партнер у задоволенні майбутніх енергетичних потреб, які є економічними та екологічно чистими як на національному, так і на міжнародному рівнях [1]. Енергозбереження є нагальною потребою, щоб нація могла вижити в умовах кризи з якою зіткнулось людство. Існує 3 глобальні проблеми, пов'язані з використанням ядерної енергії, а саме: проблема "ядерної безпеки" або безпеки ядерних реакторів та обладнання енергоблоків АЕС, "ядерного нерозповсюдження" або обмежень на використання ядерних матеріалів, і "поводження з радіоактивними відходами". Що стосується питань безпеки ядерних реакторів, то оціночний ризик аварії на реакторі з високим ступенем ризику є низьким порівняно з усіма ризиками для людського життя в цілому. Ці досягнення у сфері безпеки реактора можуть бути досягнуті завдяки наполегливим зусиллям, спрямованим на підвищення і підтримку безпеки АЕС, управління безпекою і людськими ресурсами. Ядерне нерозповсюдження, пов'язане з регулюванням і обмеженням використання ядерного палива, має бути забезпечене не лише в технічних вимірах і оптимізації, але й у всіх питаннях, що стосуються міжнародної політики. Хоча кількість радіоактивних відходів на одиницю виробленої електроенергії на АЕС є відносно невеликою, токсичність радіоактивних відходів повинна бути знижена настільки, наскільки це можливо, щоб отримати краще суспільне визнання і зменшити ризик терористичних атак [2]. Отже, можна відмітити, що атомна енергетика займає важливу позицію в забезпеченні економічного сталого розвитку та потребує участі всіх зацікавлених сторін у підтримці іміджу "зеленої" енергії шляхом забезпечення безпеки експлуатації, а саме шляхом впровадження моделі "Досліджень і Розробок" на державному рівні.

Збільшення участі держави в циркулярній економіці шляхом використання моделі "Досліджень і Розробок", а саме пошук нових інновацій, розробка додатків, створення успішних прототипів, застосування технологій для забезпечення безпеки експлуатації АЕС дасть можливість до переходу за підтримкою атомної енергетики до ЄЗК.

Як зазначають автори [3, 4], політика та економіка повинні бути спрямовані на діяльність, яка сприяє створенню більш екологічного суспільства, що є економічно життєздатними. Найбільш очевидним кроком має бути заборона субсидування будь-якої діяльності, яка шкідливої для довкілля. В Україні існують широкі можливості для трансформації домінуючої моделі лінійної економіки на екологічно безпечну та економічно ефективну циркулярну модель. Розвиток циркулярної економіки в Україні може дати не лише сприятливий екологічний ефект, але й економічний ефект від підвищення енерго- та ресурсоефективності, а також соціальний ефект від створення додаткових робочих місць та отримання прибутку корпораціями у нових галузях та видах діяльності.

Розвиток циркулярної економіки в найближчому майбутньому має вирішальне значення для захисту навколишнього середовища та покращення якості життя людей, зважаючи на нераціональне використання ресурсів та негативний вплив на навколишнє середовище в результаті функціонування лінійної економіки. Впровадження та підтримка

моделі циркулярної економіки в економічній сфері приносить багато переваг нинішньому та майбутнім поколінням [5,6]. Разом з тим існує потреба в дослідженні всіх галузей промисловості, оскільки це є більш ефективним і дієвим способом впроваджувати інновації та виявляти нові ринкові можливості циркулярної економіки. Циркулярна економіка дозволить більш раціонально використовувати сировину та джерела енергії [7].

Однак, як зазначено [1-7], перехідний процес до циркулярної, «зеленої» економіки є доволі часозатратним процесом, та у енергетичній галузі потребує підтримки та відповідального забезпечення безпеки на всіх рівнях та етапах експлуатації обладнання енергооб'єктів. Питаннями забезпечення безпеки експлуатації енергообладнання у проектний та поза проектний терміни займалось багато українських дослідників, адже Україна має потужну та розвинену систему атомної енергетики.

В роботах [8-12] розглядаються питання забезпечення безпеки елементів та обладнання атомних електростанцій з різних позицій, запропоновані різні методи та підходи до технічної діагностики енергообладнання та удосконалення нормативного забезпечення щодо експлуатаційної безпеки. Авторами [12] запропоновано уніфікацію обладнання для виокремлення методів та моделей щодо оцінки технічного стану трубопровідних систем з різного типу навантаження та середі теплоносія. В роботах [8-12] також зазначається, що необхідна комплексна оцінка енергообладнання з урахуванням їх особливостей експлуатації для можливості прогнозування змiну технічного стану та терміну експлуатації у понадпроектний термін.

Метою роботи є розробка методики оцінювання технічного стану енергообладнання атомної електростанції для подовження терміну його експлуатації, що дасть можливість ефективного переходу до циркулярної економіки в рамках ЄЗК.

Виклад основного матеріалу

Прогноз зміни технічного стану при подальшій експлуатації виконується на основі аналізу деградаційних процесів і виявлення відповідності фактичних параметрів технічного стану вимогам паспортних даних та нормативних документів. Для прикладу технічної діагностики було обрано такий елемент енергообладнання як трубопровідні системи різного призначення.

Термін служби обладнання і трубопроводів блоків АЕС може бути продовжений на період, що перевищує зазначений в паспорті, на підставі розрахункових даних на міцність, що підтверджує можливість продовження терміну служби. Запропонована методика перепризначення ресурсу трубопровідних систем заснована на методології типових програм оцінки технічного стану та полягала у наступному:

- 1) визначення товщини стінок трубопроводів головного циркуляційного контуру (ГЦК) на різних ділянках для виконання порівняння з розрахунковими дослідженнями на міцність;
- 2) проведення контролю механічних властивостей по твердості для трубопроводу ГЦК з метою перевірки відповідності механічних характеристик значенням, встановленим НД, і виявлення ділянок з незадовільними значеннями;

Отже, з метою отримання інформації про товщини елементів обладнання ГЦК для виконання перевірок розрахунків на міцність проведено вимірювання товщини стінок на різних ділянках трубопроводу. Дані вимірів необхідні для порівнянь отриманих значень товщини з мінімально допустимими значеннями.

Для вимірювання товщини металу трубопроводів використовувався ультразвуковий товщиномір Ут-31 з перетворювачем П112-5-12 / 2-Б-01. Точність вимірювань ультразвукового товщиноміра забезпечується наявністю функції калібрування приладу, заснованої на налаштуванні швидкості звуку і компенсації нуля при зміні типу датчика.

На рисунку 1 представлена схема розміщення датчиків для вимірювання товщини.

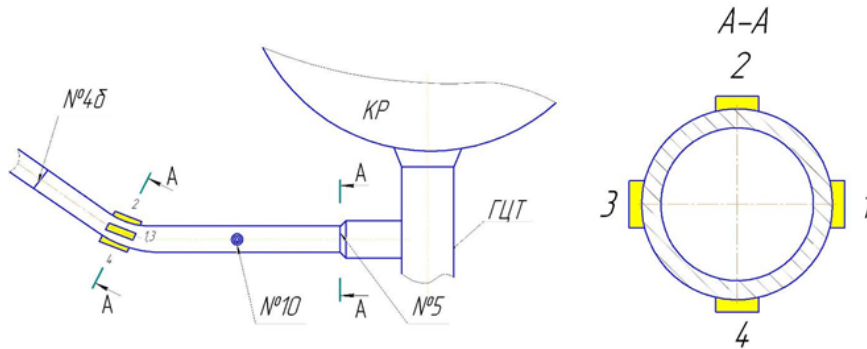


Рис. 1 – Схема розміщення датчиків для вимірювання товщини металу

Після отримання фактичних даних товщини стінки виконано порівняння отриманих значень товщини з мінімально допустимими значеннями. Дані товщини стінок основного металу і зони зварного з'єднання використані при розрахунку напружено деформованого стану ГЦК.

Основним методом контролю механічних властивостей є контроль механічних властивостей металу за твердістю (КМВТ). Контролю механічних властивостей по твердості підлягають 100% кінцевих елементів. У разі неможливості забезпечення необхідного обсягу КМВТ або в разі його негативних результатів виконуються випробування стандартних зразків, виготовлених з металу раніше заміненіх трубопроводів з напрацюванням, близькою до напрацювання обстежуваних трубопроводів даного енергоблоку АЕС. При неможливості забезпечення необхідного обсягу КМВТ і неможливості виконання випробувань стандартних зразків, повинні бути досліджені мікрозразки, виготовлені з металу обстежуваних або раніше заміненіх трубопроводів.

При неможливості виконання в необхідних обсягах і / або при негативних результатах всіх вищевказаних досліджень металу рекомендується виконання компенсуючого розрахунку на міцність, що враховує фактичні умови експлуатації обстежуваних трубопроводів, а також механічні властивості їх металу, отримані шляхом екстраполяції результатів раніше виконаного контролю механічних властивостей. В іншому випадку з металу обстежуваних трубопроводів повинні бути виготовлені і досліджені стандартні зразки. При цьому, в разі неможливості повного відновлення конструкції і міцності обстежуваних трубопроводів, вони до подальшої експлуатації не допускається і повинні бути замінені.

Було проведено контроль механічних властивостей по твердості обраних ділянок трубопроводу з метою перевірки відповідності механічних характеристик значенням, встановленим НД, і виявлення окремих ділянок з незадовільними значеннями.

Твердість визначалася як середнє арифметичне значення з п'яти вимірювань в одному і тому ж місці. За результатами виміру твердості металу обраних ділянок трубопроводу дана непряма оцінка їх міцності: межа міцності R_m^T , межа плинності $R_{p0,2}^T$, відносне звуження Z^T , відносне подовження A^T . Характеристики механічних властивостей металу відповідно до вимірюваними значеннями твердості визначалися по кореляційним співвідношенням.

Межа міцності R_m^T визначалася із співвідношення через поточне значення твердості:

$$R_m^T = f(H_{max}). \quad (1)$$

Значення рівномірного подовження A^T розраховувати по діаметру поверхні контакту відповідному точці перегину:

$$A^T = f(d_{max}/D) \quad (2)$$

де $d_{max} = 2 \cdot (t_{max} \cdot D - t_{max}^2)^{1/2}$

Межа плинності визначалась як:

$$R_{p0,2}^T \cong 0,333H_{0,2} \quad (3)$$

де $H_{0,2}$ - поточне значення твердості НВ (твердість по Брюнеллю) на межі плинності.

Для отримання даних по твердості металу був використаний твердомір динамічний ТД-32 з похибкою вимірів що не перевищує $\pm 3,0\%$. Цей твердомір дозволяє вимірювати твердість різних металів без порушення структури і цілісності об'єкту, що контролюється. Для вимірювання твердості на поверхню об'єкта проводиться механічна дія, результат якого і визначає твердість. На рис.2 представлена схема розташування місць вимірювань твердості основного металу і зварних з'єднань ГЦТ.

В результаті виконаного аналізу поточного стану ГЦТ і елементів головного циркуляційного контуру (ГЦК) на відповідність вимогам НД встановлено, що по всіх контрольованих деталях і вузлах дефекти і відхилення від прийнятих норм відсутні.

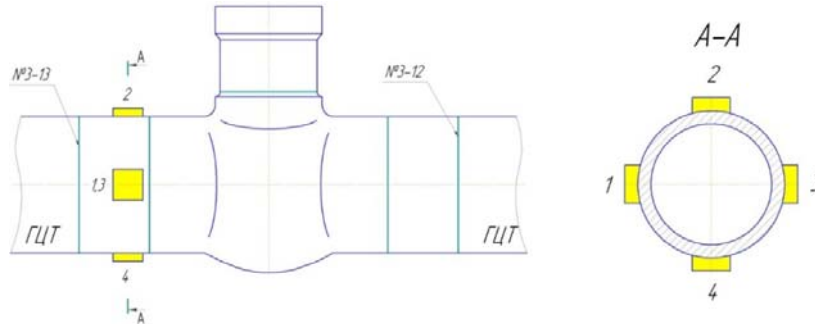


Рис. 2 – Схема розташування місць вимірювань твердості ГЦТ

Таблиця 1 – Виміряні, паспортні та мінімально допустимі по ПНАЕ Г-7-002-86 значення механічних характеристик матеріалів ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК

Найменування обладнання та матеріал трубопроводу	Межа міцності R_m^T , кгс / мм ²			Межа плинності $R_{p0,2}^T$, кгс / мм ²			Відносне подовження A^T , %		
	Твердість НВ	паспортні дані	ПНАЕ Г-7-002-86	Твердість НВ	паспортні дані	ПНАЕ Г-7-002-86	Твердість НВ	паспортні дані	ПНАЕ Г-7-002-86
ГЦТ Петля № 3 (2YA, 302.05.00.00.000)	55,10	60,2 56,4	55,0	41,79	49,2 40,2	35,0	27,64	29,5 23,6	16,0
Головна запірна засувка (ГЗЗ) Петля №3 (2YA30S01, 970-850-E)	Для середньої частини корпусу ГЗЗ (сталь 06X12H3ДЛ)								
	85,1	75,0 82,5	65,0	60,1	50,0 65,5	50,0	27,8	24,5 24,0	12,0
ГЗЗ Петля №3 (2YA30S02, 970-850-E)	Для перехідників ГЗЗ (сталь 10ГН2МФА)								
	74,3	62,0 62,5	55,0	55,2	50,0 47,0	35,0	17,7	23,0 24,5	16,0
ГЗЗ Петля №3 (2YA30S02, 970-850-E)	Для середньої частини корпусу ГЗЗ (сталь 06X12H3ДЛ)								
	88,8	77,5 76,0	65,0	63,3	51,5 59,5	50,0	27,7	25,0 23,0	12,0
Трубопровід зв'язку компенсатора об'єму (КО) з «гарячої» ниткою петлі № 4 ГЦК	Для перехідників ГЗЗ (сталь 10ГН2МФА)								
	79,0	60,5 63,5	55,0	58,6	45,0 46,5	35,0	17,6	26,5 27,0	16,0
Трубопровід зв'язку компенсатора об'єму (КО) з «гарячої» ниткою петлі № 4 ГЦК	55,46	59,5 58,5	55,0	42,04	44,0 39,0	35,0	27,46	25,0 22,0	16,0

Рекомендований порядок оцінки результатів контролю механічних властивостей металу наведено в позиціях 1) - 7):

1) оцінка механічних властивостей металу виконується:

• шляхом їх порівняння з результатами раніше виконаних контролів (при наявності) та / або з даними НД і паспортів;

• при відсутності вищевказаних даних - шляхом порівняння отриманих механічних властивостей з результатами раніше виконаних оцінок міцності трубопроводів за умовами, зазначеним у розділі 1.2 норм міцності ПНАЕ Г-7-002-86;

2) при відсутності даних про вихідних значення механічних властивостей металу обстежуваних трубопроводів можуть використовуватися:

• для основного металу - дані ТУ на виготовлення;

• для зварних з'єднань - вимоги ПНАЕ Г-7-010-89;

3) значення механічних властивостей повинні визначатися, як середнє арифметичне з окремих результатів, отриманих:

• при випробуванні окремих зразків;

• при окремих вимірах твердості.

У разі, якщо хоча б один із зазначених окремих результатів відрізняється від загальних результатів попереднього контролю механічних властивостей металу:

• по ударної в'язкості - більш ніж на 0,5 Дж / см²;

• по іншим видам випробувань - більш ніж на 5%,

загальний результат контролю механічних властивостей металу оцінюється, як зміна механічних властивостей металу трубопроводів;

4) якщо за результатами аналізу відповідно до абзацу 1 позиції 1) механічні властивості металу КЕ відповідають вихідним і / або нормативним значенням, а також - якщо зміни механічних властивостей металу знаходяться в межах похибки вимірювань, результати оцінки механічних властивостей металу обстежуваних трубопроводів вважаються позитивними. При цьому вимоги абзацу 2 позиції 1) можуть не виконуватися;

5) у разі невиконання умов позиції 4) виконується оцінка відповідно до абзацу 2 позиції 1);

6) результати контролю механічних властивостей металу трубопроводів вважаються позитивними, якщо:

• після виконання аналізу відповідно до абзацу 1 позиції 1) виконуються умови позиції 4);

• після порівняльного аналізу відповідно до абзацу 2 позиції 1) встановлено, що всі розглянуті умови міцності обстежуваних трубопроводів з переліку розділу 1.2 ПНАЕ Г-7-002-86 виконуються;

7) результати контролю механічних властивостей металу обстежуваних трубопроводів вважаються негативними, якщо для даної їх напрацювання встановлено істотну зміну (погіршення) механічних властивостей металу, при якому хоча б одне з розглянутих умов міцності трубопроводів може не виконається.

Аналіз результатів порівняння механічних характеристик, наведених у табл. 1, показує, що за період експлуатації ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК з 1984 р. по 2018 р. істотної зміни механічних властивостей матеріалів розглянутих трубопроводів і ГЗЗ не відбулося.

Отримані за результатами контролю твердості механічні характеристики для всіх контрольних елементів узгоджуються з паспортними значеннями і не нижче нормативних значень механічних характеристик. Деякі розбіжності в значеннях паспортних величин і виміряних пояснюються похибкою вимірювань і похибкою перерахунку механічних властивостей.

Для обґрунтування перепризначення терміну експлуатації необхідно провести оцінку міцності за значеннями напруг які не перевищують допустимих. З урахуванням даних про матеріал ГЦТ, ГЗЗ та трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК визначено значення допустимих напружень для різних розрахункових груп категорій напруг.

Для металу головного циркуляційного трубопроводу ГЦТ (основний метал - сталь 10ГН2МФА): $[\sigma] = \min\{R_m^T/n_m; R_{p0,2}^T/n_{0,2}; R_{mt}^T/n_{mt}\} = \min\{55,10/2,6; 41,79/1,5\} = 21,19$ кгс/мм²

Для головного циркуляційного трубопроводу ГЦТ при нормальних умовах експлуатації (НЕ):

$$(\sigma)_I = [\sigma], \quad (\sigma)_I = 21,19 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_2 = 1,3 \times [\sigma], \quad (\sigma)_2 = 1,3 \times 21,19 = 27,55 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_{RV} \leq (2,5 - R_{p0,2}^T/R_m^T) \cdot R_{p0,2}^T = 72,8 \leq 83,58 \text{ кгс/мм}^2$$

Для головного циркуляційного трубопроводу ГЦТ при гідравлічних випробуваннях (ГВ):

$$(\sigma)_I = 1,35 \times [\sigma], \quad (\sigma)_I = 1,35 \times 21,19 = 28,61 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_2 = 1,7 \times [\sigma], \quad (\sigma)_2 = 1,7 \times 21,19 = 36,03 \text{ кгс/мм}^2$$

Для корпусу головної запірної засувки ГЗЗ (сталь 06Х12НЗДЛ): $[\sigma] = \min\{R_m^T/n_m; R_{p0,2}^T/n_{0,2}; R_{mt}^T/n_{mt}\} = \{79,57/72,6; 55,20/1,5\} = 30,60$ кгс/мм²

Для корпусу головної запірної засувки ГЗЗ при НЕ:

$$(\sigma)_I = [\sigma], \quad (\sigma)_I = 30,60 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_2 = 1,3 \times [\sigma], \quad (\sigma)_2 = 1,3 \times 30,60 = 39,78 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_{RV} \leq (2,5 - R_{p0,2}^T/R_m^T) \cdot R_{p0,2}^T = 99,70 \leq 110,4 \text{ кгс/мм}^2$$

Для корпусу головної запірної засувки ГЗЗ при ГВ:

$$(\sigma)_I = 1,35 \times [\sigma], \quad (\sigma)_I = 1,35 \times 30,60 = 41,31 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_2 = 1,7 \times [\sigma], \quad (\sigma)_2 = 1,7 \times 30,60 = 52,03 \text{ кгс/мм}^2$$

Оцінка міцності ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК при сейсмічних впливах виконана за умовами статичної міцності ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК від спільної дії експлуатаційних і сейсмічних навантажень.

Міцність ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК вважається забезпеченою, якщо для наступного сполучення навантажень виконується умова:

$$\text{НЕ+МРЗ (максимально-розрахунковий землетрус): } (\sigma_s)_1 \leq 1,4[\sigma]; (\sigma_s)_2 \leq 1,8[\sigma],$$

$$\text{НЕ=ПЗ (проектний землетрус): } (\sigma_s)_1 \leq 1,2[\sigma]; (\sigma_s)_2 \leq 1,6[\sigma],$$

де $[\sigma]$ - номінальне допустиме напруження.

Для головного циркуляційного трубопроводу ГЦТ при НЕ+ПЗ:

$$(\sigma_s)_1 \leq 1,2 \times [\sigma] = 1,2 \times 21,19 = 25,43 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma_s)_2 \leq 1,6 \times [\sigma] = 1,6 \times 21,19 = 33,90 \text{ кгс/мм}^2$$

Для головного циркуляційного трубопроводу ГЦТ при НЕ+МРЗ:

$$(\sigma_s)_1 \leq 1,4 \times [\sigma] = 1,4 \times 21,19 = 29,67 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma_s)_2 \leq 1,8 \times [\sigma] = 1,8 \times 21,19 = 38,15 \text{ кгс/мм}^2$$

За результатами оцінки технічного стану елементів ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК для основних процесів старіння обладнання і трубопроводів встановлено наступне:

- будь-яких змін форми або розмірів елементів конструкції обстежуваних ГЦТ-3, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК під дією експлуатаційних навантажень не виявлено;
- дефекти металу або утонення стінок обстежуваних ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК з початку експлуатації до проведення робіт з оцінки та перепризначення ресурсу / терміну служби зазначеного обладнання і трубопроводів не виявлено.

Результати виконаних розрахунків обстежуваних ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК на статичну і циклічну міцність, а також результати розрахунків на опір крихкому руйнуванню і на сейсмічні впливи з урахуванням коефіцієнтів запасу по міцності можуть експлуатуватися далі та не перевищують нормативних значень механічних характеристик.

Подальша експлуатація обладнання можлива при визначення допустимої кількості циклів навантаження. За результатами розрахунково-аналітичних аналізів і даними експлуатації при зареєстрованих 98 циклів допустима кількість циклів для гідровипробувань на щільність має становити 110. З урахуванням допустимої кількості циклів проведено оцінку технічного стану за міцністю трубопроводів при циклічних навантаженнях.

Розрахунковий прогноз зміни допустимого навантаження на матеріал елементів ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК в залежності від терміну експлуатації приведено на діаграмах рис. 3-5.

З метою уточнення прогнозних графіків зміни допустимого навантаження на основний метал ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК в якості рекомендацій з управління старінням необхідно запланувати і виконати під час проведення капітального ремонту в період планово-попереджувального ремонту ППР-2024 контроль металу.



Рис. 3 – Розрахунковий прогноз зміни допустимого навантаження на матеріал елементів ГЦТ



Рис. 4 – Розрахунковий прогност змiни допустимого навантаження матерiал ГЗЗ в найбільш навантаженому перерiзi «горяча» петля



Рис. 5 – Розрахунковий прогност змiни допустимого навантаження на матерiал трубопровода зв'язку КО з «горячої» ниткою петлі №4 ГЦК

На підставі результатів контролю виконати уточнений аналіз зміни механічних властивостей металу обстежуваних 2ГЦТ-3, засувки 2ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК.

Наявність результатів контролю металу обстежуваних 2ГЦТ-3, засувки 2ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК, виконаних у ППР-2024 дозволить виконати уточнений прогноз допустимого навантаження на матеріал обладнання і трубопроводів що розглядається.

Висновки

В результаті проведених досліджень запропонована методика прогнозування ресурсу енергообладнання на прикладі елементів трубопровідних систем з метою забезпечення енергетичної безпеки АЕС, як шлях до зеленої трансформації в рамках Європейського зеленого курсу що підтримує Україна. Методика включає експериментальні дослідження технічного стану енергообладнання та порівняння їх з розрахунковими та нормативними даними. Як показали експериментальні дослідження обраних ділянок трубопровідних систем:

- 1) По всіх контрольованих деталях і вузлах дефекти і відхилення від прийнятих норм відсутні, за параметрами товщини стінок та твердості металу.
- 2) В результаті оцінки міцності за значеннями напруг та виконаного аналізу поточного стану ГЦТ і елементів головного циркуляційного контуру (ГЦК) на відповідність вимогам НД встановлено, що отримані значення не перевищують допустимих.
- 3) Запропоновано розрахунковий прогноз змін технічного стану енергообладнання та рекомендації щодо уточнення прогнозованих графіків під час проведення капітального ремонту в період планово-попереджувального ремонту ППР-2024 для забезпечення безпечної експлуатації обладнання.

Список використаних джерел:

1. Bogheiry A. Nuclear energy as environmentally friendly energy and international politics [Electronic resource] / A. Bogheiry, A. Faisal, S. Sunarno // *Jurnal Penelitian Pendidikan Indonesia*. – 2022. – № 8. – P. 488. – Access mode: <https://doi.org/10.29210/020221356> (Last accessed december 2022).
2. Black-Branch J. L. Nuclear Non-Proliferation in International Law. Vol. III. Legal Aspects of the Use of Nuclear Energy for Peaceful Purposes [Electronic resource] / J. L. Black-Branch, D. Fleck. – Hague : Springer, 2016. – 556 p. – Access mode: <https://doi.org/10.1007/978-94-6265-138-8> (Last accessed december 2022).
3. Bobrov Ye. A. Modern Innovations in the Context of the Transition to Circular Economy [Electronic resource] / Ye. A. Bobrov // *Science and Innovation*. – 2021. – Vol. 17, N. 6. – P. 13–23. – Access mode: <https://doi.org/10.15407/scine17.06.013> (Last accessed december 2022).
4. Подра О. П. Циркулярна економіка як детермінантна сталого розвитку та конкурентоспроможності України [Електронний ресурс] / О. П. Подра, Ю. В. Горошко // *Економіка. Фінанси. Право*. – 2022. – № 11. – С. 35–40. – Режим доступу: <https://doi.org/10.37634/efp.2022.11.8> (дата звернення грудень 2022).
5. Popović A. The circular economy: Principles, strategies and goals [Electronic resource] / A. Popović, V. Radivojević // *Economics of Sustainable Development*. – 2022. – № 6. – P. 45–56. – Access mode: DOI:10.5937/ESD2201045P (Last accessed december 2022).
6. Assessment of the Economic Efficiency of Energy Development in the Industrial Sector of the European Union Area Countries [Electronic resource] / R. Ginevičius [et al.] // *Energies*. – 2022. – № 15 (9). – P. 3322.
7. Circular Economy and Sustainability-Oriented Innovation: Conceptual Framework and Energy Future Avenue [Electronic resource] / V. Koval [et al.] // *Energies*. – 2022. – № 16. – P. 243. – Access mode: <https://doi.org/10.3390/en16010243> (Last accessed december 2022).
8. Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant [Electronic resource] / H. Hrinchenko [et al.] // *Problems of Atomic Science and Technology. Section : Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*. – 2019. – № 2 (120). – P. 104–110. – Access mode: <https://doi.org/10.46813/2019-120-104> (Last accessed december 2022).
9. Кіпоренко Г. С. Оцінка технічного стану трубопровідних систем АЕС на відповідність нормативним параметрам / Г. С. Кіпоренко, М. Є. Пахалович, О. М. Хорошилов // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – 2016. – Вип. 4. – С. 146–152.

10. Кіпоренко, Г. С. Вдосконалення методики розрахунку опору крихкому руйнуванню трубопроводів Південно-Української АЕС / Г. С. Кіпоренко, М. Є. Пахалович // *Системи обробки інформації*. – 2016. – Вип. 7. – С. 181–184.
11. Borysenko V. I. Background of NPP safety parameters / V. I. Borysenko, O. O. Klyuchnykov, V. I. Pampuro // *Safety problems of nuclear power plants and Chernobyl*. – 2011. – № 5. – Р. 6–12.
12. Грінченко Г. С. Уніфікація методів технічної діагностики трубопровідних систем з метою забезпечення безпечної експлуатації [Електронний ресурс] / Г. С. Грінченко [та ін.] // *Машинобудування*. – 2022. – № 29. – С. 62– 69. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29> (дата звернення грудень 2022).

References:

1. Bogheiry, A, Faisal, A & Sunarno, S 2022, 'Nuclear energy as environmentally friendly energy and international politics', *Jurnal Penelitian Pendidikan Indonesia*, vol. 8, no. 2, pp. 488-494, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.29210/020221356>>.
2. Black-Branch, JL & Fleck, D 2016, *Nuclear Non-Proliferation in International Law, Volume III, Legal Aspects of the Use of Nuclear Energy for Peaceful Purposes*, Springer, Hague, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.1007/978-94-6265-138-8>>.
3. Bobrov, YeA 2021, 'Modern Innovations in the Context of the Transition to Circular Economy', *Science and Innovation*, vol. 17, no. 6, pp. 13-23, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.15407/scine17.06.013>>.
4. Podra, O & Horoshko, Y 2022, 'Tsyrukuliarna ekonomika yak determinantna staloho rozvytku ta konkurentospromozhnosti Ukrainy' [Circular economy as a determinant of sustainable development and competitiveness of Ukraine], *Ekonomika. Finansy. Pravo*, no. 11, pp. 35-40, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.37634/efp.2022.11.8>>.
5. Popović, A & Radivojević, V 2022, 'The circular economy: Principles, strategies and goals', *Economics of Sustainable Development*, no. 6, pp. 45-56, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.5937/ESD2201045P>>.
6. Ginevičius, R, Trishch, R, Bilan, Y, Lis, M & Pencik, J 2022, 'Assessment of the Economic Efficiency of Energy Development in the Industrial Sector of the European Union Area Countries', *Energies*, no. 15 (9), pp. 3322.
7. Koval, V, Arsan, W, Suryantini, S, Kovbasenko, S, Fisunen, N & Alosyna, T 2022, 'Circular Economy and Sustainability-Oriented Innovation: Conceptual Framework and Energy Future Avenue', *Energies*, no. 16, pp. 243, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.3390/en16010243>>.
8. Hrinchenko, H, Trisch, R, Burdeina, V & Chelysheva, S 2019, 'Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant', *Problems of Atomic Science and Technology, Section Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, no. 2 (120), pp. 104-110.
9. Kiporenko, HS, Pakhalovych, MYe & Khoroshylov, OM 2016, 'Otsinka tekhnichnoho stanu truboprovodnykh system AES na vidpovidnist normatyvnykh parametrov', *Systemy upravlinnya, navihatsii ta zviazku*, iss. 4, pp. 146-152.
10. Kiporenko, HS & Pakhalovych, MYe 2016, 'Vdoskonalennia metody rozrakhunku oporu kryhkomu ruynuvanni u truboprovodiv Pivdenno-Ukrainskoi AES', *Systemy obrobky informatsii*, iss. 7, pp. 181-184.
11. Borysenko, VI, Klyuchnykov, OO & Pampuro, VI 2011, 'Background of NPP safety parameters', *Safety problems of nuclear power plants and Chernobyl*, no. 5, pp. 6-12.
12. Hrinchenko, H, Artiukh, S, Hrinchenko, V & Nehodov, S 2022, 'Unifikatsiia metodiv tekhnichnoi diahnostryky truboprovodnykh system z metoiu zabezpechennia bezpechnoi ekspluatatsii', *Mashynobuduvannia*, no. 29, pp. 62-69, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29>>.

Стаття надійшла до редакції 26 січня 2023 року