

## АНОТАЦІЯ

*Сова К.О.* Моделювання ресурсоспроможності та надійності систем сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива на АЕС – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 143 – Атомна енергетика. – Національний університет «Одеська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2025.

Атомна енергетика базується на основних принципах – безпека, економічність, доцільність. Перехід на паливні цикли із збільшеними початковим збагаченням та глибиною вигорання ядерного палива, зумовлює підвищені вимоги безпеки до засобів поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП).

Експлуатація АЕС супроводжується накопиченням відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), що підлягає подальшій переробці з метою отримання паливоутворювальних компонентів і виділення твердих радіоактивних відходів. Щорічне вивантаження ВЯП з атомних електростанцій (АЕС) у світі перевищує 10 тис. тонн важкого металу (ВМ) і лише лічені держави переробляють відпрацьоване паливо, маючи сумарні потужності для переробки 4800 тВМ на рік. В Україні щорічно вивантажується з реакторів АЕС близько 560 відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ) реакторів типу ВВЕР–1000 і близько 170 ВТВЗ з реакторів ВВЕР–440, що становить приблизно 265 тонн важкого металу.

У світовій практиці відрізняють три принципові підходи до вирішення проблеми поводження з відпрацьованим ядерним паливом: переробка, захоронення та відкладене рішення.

У першому випадку з відпрацьованого ядерного палива, що містить до 97 % ядерних матеріалів вилучають компоненти та речовини, використання яких економічно доцільно для подальшого використання в реакторах наступного покоління. Залишковий високоактивний продукт підлягає зберіганням або захороненню.

У другому – витримують деякий час, забезпечуючи зниження активності до прийняттого рівня та подальшого захоронення у глибоких геологічних формаціях.

У випадку відкладеного рішення передбачається довгострокове зберігання ВЯП, що дає можливість у перспективі прийняти рішення про подальше поводження з ним, враховуючи можливості майбутніх технологій та економічні фактори.

У **вступі** обґрунтовано актуальність і важливість роботи, визначено мету, завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відображено її зв'язок з галузевими дослідженнями, а також з науково–дослідними роботами, що виконувались в Національному університеті «Одеська політехніка» за напрямом підвищення ефективності та безпеки, відмічено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** виконано аналіз існуючого досвіду зберігання ВЯП в Україні. Розглянуто процес поводження з відпрацьованим паливом після його вивантаження та конструкцію за допомогою якої відбувається процес зберігання ВЯП.

За результатами проведеного аналізу визначено можливі шляхи подальших досліджень у вибраному напрямку. Визначено мету роботи та необхідні завдання, які потрібно виконати для досягнення мети.

У **другому розділі** проведено аналіз сучасних технологій сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), що використовуються на атомних електростанціях. Наведено порівняльну характеристику наявних рішень за критеріями ядерної та радіаційної безпеки, а також екологічного впливу.

Розглянуто конструктивні особливості та матеріали, що використовуються у виготовленні контейнерів для сухого зберігання, зокрема металевих та вентильованих бетонних контейнерів. Проаналізовано принципи функціонування систем пасивного охолодження та забезпечення радіаційного захисту. Окрему увагу приділено досвіду впровадження технологій сухого зберігання у світовій практиці, а також сучасному стану та перспективам розвитку таких технологій в Україні. Як приклад національного досвіду розглянуто організацію сухого зберігання ВЯП на майданчику Запорізької АЕС

**Третій розділ** присвячений математичному моделюванню ресурсоспроможності систем зберігання відпрацьованого ядерного палива. Було проведено огляд методів математичного моделювання надійності систем зберігання. Також розглянуто математичні моделі деградації матеріалів контейнерів. Проведено аналіз термічних, механічних навантажень на контейнери для зберігання відпрацьованого ядерного палива та аналіз довговічності матеріалів контейнерів.

**Четвертий розділ** присвячено оцінці впливу дефектів конструкцій на залишковий ресурс, зокрема зварних з'єднань та основного металу конструкцій систем сухого зберігання. Проведено оцінку ймовірності руйнування зварного з'єднання із дефектами та без них за допомогою методу розрахунку ймовірності руйнування. Запропоновано підхід до оцінки ресурсу за критерієм швидкості росту тріщини з урахуванням корозійного середовища, режимів навантаження та характеристик зварних з'єднань. Результати розрахунків свідчать, що надійність зварних конструкцій значною мірою залежить від типу та розмірів дефектів, а також від зовнішніх умов експлуатації. Отримано числові оцінки ймовірності руйнування та часу до втрати цілісності конструкції залежно від сценаріїв дефектоутворення.

#### **Наукова новизна отриманих результатів :**

У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані результати щодо підвищення ефективності та безпеки технологій сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), що мають істотне значення для розвитку ядерної енергетики України.

1. Систематизовано технічні вимоги до сучасних систем сухого зберігання ВЯП з урахуванням міжнародних стандартів та особливостей експлуатації в Україні. Проведено критичний аналіз існуючих конструктивних рішень контейнерів, що дозволило виокремити ключові фактори впливу на їх довговічність та безпечну експлуатацію.

2. Здійснено комплексну оцінку сучасних технологій з урахуванням екологічної безпеки, ефективності охолодження та захисту персоналу.

Обґрунтовано вибір оптимальних рішень для використання в умовах українських АЕС, на прикладі досвіду Запорізької АЕС.

3. Розроблено нову математичну модель оцінки ресурсу та надійності контейнерних систем для зберігання ВЯП з урахуванням комплексного впливу теплових, механічних і радіаційних навантажень. Проведено прогнозування довговічності матеріалів контейнерів у реальних умовах експлуатації.

**Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що:**

1. Розроблена математична модель оцінки ресурсу та надійності контейнерів з урахуванням комплексного впливу зовнішніх навантажень дозволяє здійснювати обґрунтоване прогнозування тривалості їх безпечної експлуатації, що може бути використано під час планування термінів зберігання ВЯП та оптимізації регламентних перевірок.

2. Матеріали дисертації можуть бути використані як основа для подальших наукових досліджень у сфері підвищення ресурсної спроможності та безпеки інфраструктури поводження з відпрацьованим ядерним паливом, а також у розробці нормативних документів у галузі ядерної енергетики.

3. Результати дисертаційного дослідження можуть бути використані при проектуванні, модернізації та експлуатації систем сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) на атомних електростанціях України. Запропоновані рекомендації щодо вибору конструктивних матеріалів контейнерів, а також систем пасивного охолодження та радіаційного захисту сприяють підвищенню довговічності та безпеки функціонування таких систем.

**Ключові слова:** відпрацьоване ядерне паливо, сухе зберігання, ресурсоспроможність, надійність, система зберігання ВЯП, математичне моделювання, металевий контейнер, корозія, напружено–деформований стан, температурний режим, тепловиділення, ядерна безпека, оцінка ресурсу, прогнозування, атомна енергетика.

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА****Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації:**

1. Kozlov I.L., Kovalchuk V., Klymchuk O., Sova K., Aksyonova I., Borysenko K.

Improvement of methods of comprehensive assessment of the operation efficiency of centralized heat supply systems in municipal heat power engineering. Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 2, No. 8(110). – P. 16–22.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230218>

2. Kozlov I.L., Kovalchuk V.I., Kondratyuk V.A., Sova K.O., Chornenkyi O.S., Lysak M.V. Оцінювання ресурсоспроможності та надійності системи сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива. Ядерна та радіаційна безпека. – 2024. – № 3(103). – С. 43–51.

[https://doi.org/10.32918/nrs.2024.3\(103\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.3(103).05)

3. Kozlov I.L., Kovalchuk V.I., Dorozh O.A., Sova K.X. Assessment of the reliability of a concrete cask shell of the dry storage of the spent nuclear fuel. Proceedings of Odessa Polytechnic University. – 2018. – No. 3(56). – P. 30–38.

<https://www.researchgate.net/publication/332732758>

4. Kozlov I.L., Kolykhanov V.N., Koba D., Sova K. Optimization of the maintenance period for WWER safety systems with taking into account the maintenance quality. Science and Technology Journal of BgNS Transactions. – 2019. – Vol. 24, No. 1. – P. 6–10. ISSN 1310–8727

<https://inis.iaea.org/records/kbkw1-qfv67>

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.**

5. Козлов І.Л., Ковальчук В.І., Сова К.О., Козлов О.І. Напрямки підвищення ефективності та зменшення екологічного навантаження регіонального паливно–енергетичного комплексу. Збірник праць / Проблеми екології та експлуатації об’єктів енергетики. – Київ: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2023. – С. 76–80. – 198 с. ISBN 978–966–8449–71–0

[https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolNTU/14030/1/Sbornik\\_2023\\_76-80.pdf](https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolNTU/14030/1/Sbornik_2023_76-80.pdf)

6. Козлов І.Л., Ковальчук В.І., Сова К.О., Чорненький О.С., Лисак М.В. Ресурсні дослідження контейнерів сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива та показники їх надійності. 3rd International Scientific and Practical Internet Conference, May 16–17, 2024. – С. 109–112. ISBN 978–617–8293–26–0

<http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/05/Conference-Proceedings-May-16-17-2024-1.pdf>

7. Козлов І.Л., Ковальчук В.І., Сова К.О., Лисак М.В., Чорненький О.С. Ефективність сухого сховища відпрацьованого ядерного палива. XXXIV Міжнародна конференція «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики», 2023.

8. Kozlov I.L., Kolykhanov V.N., Koba D., Sova K. Optimization of the Maintenance Period for WWER Safety Systems. BgNS International Conference “Nuclear energy for the people”, 10–13 Sept. 2018, Bulgaria.

**ABSTRACT**

*Sova K.* Modeling the resource capacity and reliability of dry storage systems for spent nuclear fuel at nuclear power plants – Manuscript copyright.

Thesis for a Doctor of Philosophy Degree in Specialty 143 – Nuclear Energy. – Odessa Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

Nuclear energy is based on the basic principles of safety, efficiency, and feasibility. The transition to fuel cycles with increased initial enrichment and burnup depth of nuclear fuel imposes increased safety requirements on spent nuclear fuel (SNF) management facilities.

The operation of nuclear power plants is accompanied by the accumulation of spent nuclear fuel (SNF), which is subject to further processing in order to obtain fuel-forming components and release solid radioactive waste (Fig. 1). The annual unloading of spent fuel from nuclear power plants (NPPs) in the world exceeds 10 thousand tons of heavy metal (HM) and only a few countries reprocess spent fuel, having a total processing capacity of 4800 tHM per year. In Ukraine, about 560 spent fuel assemblies (SFAs) of VVER–1000 reactors and about 170 SFAs from VVER–440 reactors are unloaded from NPP reactors annually, which amounts to approximately 265 tons of heavy metal.

In world practice, three fundamental approaches to solving the problem of spent nuclear fuel management are distinguished: reprocessing, disposal and deferred disposal.

In the first case, components and substances are removed from spent nuclear fuel containing up to 97% of nuclear materials, the use of which is economically feasible for further use in next-generation reactors. The residual highly active product is subject to storage or disposal.

In the second, it is kept for some time, ensuring a decrease in activity to an acceptable level and subsequent disposal in deep geological formations.

In the case of a deferred decision, long-term storage of spent fuel is envisaged, which makes it possible to make a decision in the future on its further management, taking into account the capabilities of future technologies and economic factors.

**The introduction** presents the relevance and importance of the work, defines the goal, objectives of the research, scientific novelty and practical significance of the obtained results, reflects its connection with industry research, as well as with research and development works carried out at the National University "Odesa Polytechnic" in the direction of increasing efficiency and safety, the personal contribution of the applicant is noted. works carried out at the National University "Odesa Polytechnic" in the direction of increasing efficiency and safety, the personal contribution of the applicant is noted.

**Chapter 1:** The first section analyzes the existing experience of spent fuel storage in Ukraine. The process of handling spent fuel after its unloading and the design by which the process of storing spent fuel occurs are considered. Based on the results of the analysis, possible ways of further research in the chosen direction are identified. The purpose of the work and the necessary tasks that need to be performed to achieve the goal are determined.

**Chapter 2:** Presents a comprehensive analysis of modern dry storage technologies for spent nuclear fuel (SNF) implemented at nuclear power plants. A comparative assessment of existing solutions is provided based on nuclear and radiation safety criteria, as well as environmental impact. The structural characteristics and materials used in the fabrication of dry storage containers are examined, with a focus on metallic casks and ventilated concrete containers. The operational principles of passive cooling systems and radiation shielding are analyzed. Special attention is devoted to the international experience in implementing dry storage technologies and the current status and prospects for their development in Ukraine.

**Chapter 3:** Focuses on the mathematical modeling of the durability and reliability of SNF dry storage systems. An overview of current approaches to reliability modeling is presented, along with a detailed discussion of degradation models for container materials. Thermal and mechanical loads affecting the containers are analyzed, as well as the long-term performance of the materials under operational conditions.

**Chapter 4:** Examines the general structure of models and methods for assessing the durability and reliability of dry storage systems for spent nuclear fuel. Special attention is given to analytical approaches that enable the prediction of the safe

operational lifespan of such systems. The study analyzes potential defects, including crack formation in reinforced concrete structures, as well as the probability of container failure at welded joints. Additionally, the reliability assessment of ventilated storage container (VSC) components is presented, as these are key elements in ensuring the long-term safety of nuclear waste storage.

### **Scientific Novelty of the Obtained Results**

The dissertation presents novel and scientifically substantiated results aimed at enhancing the efficiency and safety of dry storage technologies for spent nuclear fuel (SNF), which are of significant importance for the development of Ukraine's nuclear energy sector.

1. Technical requirements for modern SNF dry storage systems have been systematized in accordance with international standards and Ukrainian operational conditions. A critical analysis of existing container designs has been conducted, identifying key factors influencing their longevity and safe operation.

2. A comprehensive evaluation of current storage technologies was performed, taking into account environmental safety, cooling efficiency, and personnel protection. The optimal design solutions for application at Ukrainian nuclear power plants were justified, based on the experience of the Zaporizhzhia NPP.

3. A new mathematical model was developed to assess the service life and reliability of containerized SNF storage systems under the combined influence of thermal, mechanical, and radiation loads. The model enables accurate forecasting of material degradation and container longevity in real operating conditions.

### **Practical Significance of the Obtained Results:**

The developed mathematical model enables substantiated forecasting of container service life under complex external loading conditions, providing a practical tool for planning SNF storage timelines and optimizing scheduled inspections.

1. The materials and results of the dissertation can serve as a basis for further scientific research aimed at improving the durability and safety of nuclear fuel management infrastructure, as well as for the development of regulatory documentation in the nuclear energy sector.

2. The findings of the research can be applied in the design, modernization, and operation of SNF dry storage systems at nuclear power plants in Ukraine. The proposed recommendations regarding the selection of container materials and the implementation of passive cooling and radiation shielding systems contribute to enhancing the reliability and safety of these storage facilities.

3. The methodology for reliability assessment developed in the course of the research has been integrated into educational materials for the course “Nuclear Power Plant Safety Culture”, thereby improving the practical training of future nuclear engineers in the field of technical safety evaluation.

**Keywords:** spent nuclear fuel, dry storage, resource capacity, reliability, SNF storage system, mathematical modeling, metallic cask, corrosion, stress–strain state, thermal regime, heat generation, nuclear safety, service life assessment, forecasting, nuclear energy.

## LIST OF APPLICANT’S PUBLICATIONS

### Scientific Publications:

1. Kozlov I.L., Kovalchuk V., Klymchuk O., Sova K., Aksyonova I., Borysenko K. Improvement of methods of comprehensive assessment of the operation efficiency of centralized heat supply systems in municipal heat power engineering. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies* – 2021. – Vol. 2, No. 8(110). – P. 16–22. <https://doi.org/10.15587/1729–4061.2021.230218>

2. Kozlov I.L., Kovalchuk V.I., Kondratyuk V.A., Sova K.O., Chornenkyi O.S., Lysak M.V. Assessment of the resource capacity and reliability of dry storage systems for spent nuclear fuel. *Nuclear and Radiation Safety* – 2024. – No. 3(103). – P. 43–51. [https://doi.org/10.32918/nrs.2024.3\(103\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.3(103).05)

3. Kozlov I.L., Kovalchuk V.I., Dorozh O.A., Sova K. Assessment of the reliability of a concrete cask shell of the dry storage of the spent nuclear fuel. *Proceedings*

of Odessa Polytechnic University – 2018. – No. 3(56). – P. 30–38.  
<https://www.researchgate.net/publication/332732758>

4. Kozlov I.L., Kolykhanov V.N., Koba D., Sova K. Optimization of the maintenance period for WWER safety systems with taking into account the maintenance quality. Science and Technology Journal of BgNS Transactions – 2019. – Vol. 24, No. 1. – P. 6–10. ISSN 1310–8727  
<https://inis.iaea.org/records/kbkw1-qfv67>

### **Publications of Approbation Character:**

5. Kozlov I.L., Kovalchuk V.I., Sova K.O., Kozlov O.I. Directions for increasing the efficiency and reducing the environmental impact of the regional fuel and energy complex. Collected Papers / Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities – Kyiv: IVC ALKON NAS of Ukraine, 2023. – P. 76–80. – 198 p. ISBN 978–966–8449–71–0  
[https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolntNTU/14030/1/Sbornik\\_2023\\_76-80.pdf](https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolntNTU/14030/1/Sbornik_2023_76-80.pdf)

6. Kozlov I.L., Kovalchuk V.I., Sova K.O., Chornenkyi O.S., Lysak M.V. Resource studies of dry storage containers for spent nuclear fuel and their reliability indicators. 3rd International Scientific and Practical Internet Conference, May 16–17, 2024. – P. 109–112. ISBN 978–617–8293–26–0  
<http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/05/Conference-Proceedings-May-16-17-2024-1.pdf>

7. Kozlov I.L., Kovalchuk V.I., Sova K.O., Lysak M.V., Chornenkyi O.S. Efficiency of the dry storage of spent nuclear fuel. XXXIV International Conference “Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities”, 2023.

8. Kozlov I.L., Kolykhanov V.N., Koba D., Sova K. Optimization of the Maintenance Period for WWER Safety Systems. BgNS International Conference “Nuclear energy for the people”, September 10–13, 2018, Bulgaria.