

АНОТАЦІЯ

Гриб В.Ю. Удосконалення методів аналізу безпеки при диверсифікації тепловиділяючих збірок ядерних енергоустановок. – 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, 2023.

Питанням підвищення надійності і модернізації енергетичних установок присвячено багато досліджень. Однак, питання впливу диверсифікації тепловиділяючих збірок (ТВЗ) на безпеку та надійність ядерних установок вивчені недостатньо.

Диверсифікація ядерного палива полягає у постачанні альтернативних тепловиділяючих збірок (ТВЗА) для існуючих ядерних реакторів.

У вступі представлено обґрунтування вибору теми дослідження, висвітлено її актуальність та зв'язок з науковими програмами. На основі цього сформовано мету і завдання дослідження. Зазначено наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність для АЕС з реакторами ВВЕР-1000.

В першому розділі представлено аналіз довіду та результатів диверсифікації ЯЕУ з ВВЕР-1000 тепловиділяючими збірками Westinghouse (WFA) в Чехії та Україні.

У процесі диверсифікації ТВЗ Westinghouse на АЕС Темелін були виявлені такі проблеми: неповне введення регулюючих стрижнів (IRI - Incomplete Rod Insertion), вигин ТВЗ, течі твелів і т.д.

Проведений аналіз досвіду диверсифікацій WFA ЯЕУ з ВВЕР на вітчизняних АЕС та АЕС Темелін визначив обґрунтованість і ефективність технічних рішень з адаптації WFA в ЯЕУ з ВВЕР. Проведені модернізації WFA забезпечують зниження деформації і пошкодження твелів, а також підвищують

надійність експлуатації ядерного реактору. Однак, відповідно до ядерного законодавства України, за будь-якої модернізації реакторної установки необхідний відповідний аналіз безпеки.

У другому розділі проведено аналіз багаторічного досвіду та результатів моделювання аварій в ЯЕУ ймовірнісними та детерміністичними методами. У результаті проведеного аналізу встановлено суттєві обмеження/недоліки відомих методів моделювання аварій в ЯЕУ. Ймовірнісні методи моделювання аварій та аналізу безпеки обґрунтовані тільки для загальної оцінки ймовірності виникнення ядерних і радіаційних аварій.

Аналіз ядерної безпеки реакторів полягає у визначенні відповідності максимальної температури оболонок тепловиділяючих елементів (твел) і температури ядерного палива в процесі можливих аварій, встановлених гранично-допустимих значень нормами і правилами ядерної безпеки. На даний час при аналізі безпеки використовується традиційний підхід моделювання всього спектру можливих аварій детерміністичними розрахунковими засобами (кодами) - RELAP, CATHARE, ATHLET, MELCOR, СОКРАТ і інш.

Проведений на основі консервативного підходу попередній експертний аналіз здійсненості критеріїв безпеки при змішаних завантаженнях ТВЗА і WFA реакторів типу ВВЕР із застосуванням коду RELAP5/V3.2 для максимальної проєктної аварії (МПА) показав, що відмінності КГО визначають температуру оболонок твелів WFA $T_{об}$ на кілька сотень градусів більше відповідних значень для ТВЗА, а при максимально допустимій за проєктом температурі теплоносія системи аварійного охолодження активної зони (САОЗ) 90 °С критерії безпеки взагалі не виконуються: $T_{об} > 1200$ °С. Розбіжності в оцінках максимальної температури оболонок твелів, отримані для однієї і тієї ж аварії кодом RELAP5 (але з використанням різних кореляцій для критичних теплових потоків q_{cr}), є суттєвими - від 362 до 680 °С. Для проєктних аварій ці розбіжності не принципові, так як критерій безпеки за допустимою температурою оболонок твелів (1200 °С) виконується в усіх представлених

результатах розрахункових обґрунтувань. Однак при аналізі запроектованих аварій ці розбіжності можуть бути принциповими: запроектовані аварії з кінцевим станом без пошкодження оболонок твелів/ядерного палива можуть перейти в статус важких аварій.

Проведений аналіз традиційного підходу моделювання можливих аварій в ЯЕУ з ВВЕР визначив істотний вплив на результати розрахункового моделювання всього спектру можливих аварій «ефектів користувачів і відмінностей кодів», а також недоцільність застосування детерміністичних кодів для аналізу безпеки при численних модернізаціях реакторних установок.

Встановлено, що відомі результати аналізу безпеки при диверсифікації WFA в ЯЕУ з ВВЕР на вітчизняних АЕС недостатньо обґрунтовані в питанні моделювання умов теплообміну в активній зоні реактору.

Проведений аналіз відомих підходів моделювання можливих аварій WFA в ЯЕУ з ВВЕР на вітчизняних АЕС визначив необхідність удосконалення і розробки нових методів аналізу ядерної безпеки при диверсифікації і модернізації елементів реактору. Все це визначає актуальність цієї роботи і вимагає додаткового вивчення і аналізу.

В третьому розділі розроблено альтернативний оперативний метод аналізу безпеки при диверсифікації та модернізації елементів ЯЕУ з ВВЕР. На основі розробленого методу встановлено забезпечення умови ядерної безпеки за гранично-допустимої температури оболонок твел при максимальній проєктній аварії в WFA ЯЕУ з ВВЕР.

Розроблений метод є обґрунтованим і ефективним для аналізу ядерної безпеки будь-яких диверсифікацій і модернізацій елементів реактору.

На відміну від відомих підходів в запропонованому методі критерії безпеки за гранично допустимими температурами оболонок твел і ядерного палива у відношенні проєктного стану розраховуються без залучення моделювання аварійних процесів детерміністичними кодами.

На основі розробленого методу проведено обґрунтування ядерної безпеки диверсифікації WFA ЯЕУ з ВВЕР.

Встановлено, що критерії ядерної безпеки при диверсифікації WFA в ВВЕР виконуються для проєктних аварій (в тому числі і для максимальної проєктної аварії з гранично допустимою температурою охолодження теплоносія) як при частковому, так і при повному завантаженні WFA активної зони.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- запропоновані результати досвіду моделювання можливих аварій в ЯЕУ з ВВЕР детерміністичними кодами;
- запропонована альтернатива моделювання аварійних процесів в ЯЕУ з ВВЕР детерміністичними кодами;
- розроблений оперативний метод аналізу безпеки при диверсифікації та модернізації елементів ЯЕУ з ВВЕР, а саме метод експрес-аналізу;
- встановлено, на основі розробленого методу, забезпечення умови ядерної безпеки за гранично-допустимою температурою оболонок твел при максимальній проєктній аварії (в тому числі і для режиму з максимальною температурою теплоносія в гідроємностях) в WFA ЯЕУ з ВВЕР.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що: розроблений оперативний метод аналізу ядерної безпеки може бути використаний організаціями, які експлуатують і регулюють ядерну безпеку при диверсифікації та модернізації елементів ядерних реакторів.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі для підготовки фахівців за спеціальністю 143 «Атомна енергетика».

Ключові слова: надійність, безпека, енергоустановка, диверсифікація ядерного палива, модернізація, тепловиділяючий елемент (твел), температура оболонки твелу, температура ядерного палива.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. В.І. Скалозубов, І.Л. Козлов, Ю.О. Комаров, **В.Ю. Гриб**, В.М. Ващенко
Аналіз ядерної безпеки при диверсифікації паливних збірок Westinghouse на ВВЕР-1000 // Ядерна фізика та енергетика, № 21 (2), 2020. С. 213-214. ISSN 1818-331X (Indexed by: SCOPUS) DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2020.02.213>.
2. Skalozubov V., Melnik S., Pantak O., **Gryb V.**, Spinov V., Komarov Y. (2019), Analysis of experience, safety and prospects of diversification of nuclear fuel at nuclear power plants // Technology Audit and Production Reserves, 4 (1(48), 2019. P. 26–33. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.180740> (Фахове видання).
3. Скалозубов В.И., Спинов В.М., **Гриб В.Ю.** Моделирование аварий в ядерных энергоустановках (Анализ результатов моделирования проектных, запроектных и тяжелых аварий в ядерных энергоустановках). 2020. 179 с. Монографія: LAMBERT Academic Publishing. ISBN: 978-620-0-54862-7.
4. Скалозубов В.И., Спинов В.М., **Гриб В.Ю.** Безопасность диверсификации ядерного топлива (Анализ условий безопасности при диверсификации ядерного топлива атомных электростанций). 2019. 65 с. Монографія: LAMBERT Academic Publishing ISBN: 978-620-0-49830-4. <https://www.morebooks.shop/shop-ui/shop/product/978-620-0-49830-4>.
5. V.I. Skalozubov, .S.I. Melnik, V.M. Vashchenko, I.B. Korduba, **V.Y. Hrib**
The method of express analysis of uclear and ecological safety during the modernization of nuclear fuel // Journ. Geol. Geograph. Geocology, 2023, 32(2), P. 388-395 (Web of Science) <https://geology-dnu.dp.ua/index.php/GG/article/view/1024/840>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. **Гриб В.Ю.** Метод аналізу безпеки при диверсифікації тепловиділяючих збірок ядерних реакторів. Збірник докладів XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні тенденції науки і практики» Афіни, Греція, 26-29 квітня 2022 р. <https://isg-konf.com/uk/innovative-trends-of-science-and-practice-tasks-and-ways-to-solve-them/>

7. Скалозубов В.И., Мельник С.И., Пантак О.И., **Гриб В.Ю.** Применение экспресс-метода анализа ядерной безопасности при модернизациях ядерных энергетических установок // 11th International conference Science and society 26th April 2019 (Accent Graphics Communications & Publishing, Hamilton, Canada) https://www.researchgate.net/profile/Bogdan-Kindzer/publication/332866703_Science_and_societyThe_device_for_electrostimulation_VEB-1_modulates_parameters_of_electroencephalogram_and_gas_discharge_visualization/links/5cced421299bf14d95789201/Science-and-societyThe-device-for-electrostimulation-VEB-1-modulates-parameters-of-electroencephalogram-and-gas-discharge-visualization.pdf#page=112

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

8. В.И. Скалозубов, **В.Ю. Гриб**, А.В. Королев, Т.В. Габлая, В.Ю. Кочнева Стратегии управления авариями при полной длительной потере электроснабжения на ядерных энергоустановках // Ядерная энергетика та довідник. ISSN 2311-8253 № 2 (14), 2019. 68-74 р. DOI: <https://doi.org/10.31717/2311-8253.19.2.2> (Фахове видання).

9. V. Vashchenko, V. Skalozubov, **V. Hryb**, O. Voloshkina Stipulating the radioecological impact of consequences of accidents at nuclear power facilities // Ukrainian Journal of Ecology, 2021, 11 (10), 24-27 р.

doi:[10.15421/2021_314](https://doi.org/10.15421/2021_314) (Web of Science)

<https://www.ujecology.com/articles/stipulating-the-radioecological-impact-of-consequences-of-accidents-at-nuclear-power-facilities.pdf>

10. Ващенко В.М., Кордуба І.Б., **Гриб В.Ю.** Технологічний та екологічний аналіз сучасних тенденцій розвитку ядерно-енергетичних технологій // VIII-ий Міжнародний з'їзд екологів (Екологія/Ecology – 2021) Міжнародний науково-практичний семінар по декарбонізації та екомодернізації промисловості України. Збірник наукових праць. Україна, Вінниця, 22–24 вересня, 2021. С. 51-57. ISBN 978-966-641-873-2.

ABSTRACT

V. Hryb. Express method of safety analysis in the diversification of fuel assemblies of nuclear power plants. – Manuscript copyright.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree in Specialty 143 «Nuclear Energy». – National University «Odesa Polytechnic» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2023.

Many studies have been devoted to improving the reliability and modernization of power plants. However, the impact of diversification of fuel assemblies on the safety and reliability of nuclear facilities has not been sufficiently studied.

Diversification of nuclear fuel consists in the supply of alternative fuel assemblies for existing nuclear reactors.

The Introduction presents the justification of the chosen research topic, assigns its relevance and relation with scientific and technical programs. Based on this, the purpose and objectives of the research have been established. The scientific novelty of the obtained results and their practical value both for NPPs with WWER-1000 reactors.

The First Chapter presents an analysis of the background and results of diversification of NPPs with VVER-1000 fuel assemblies by Westinghouse (WFA) in the Czech Republic and Ukraine.

The analysis of the experience of WFA NPP diversification with WWER at domestic NPPs and Temelin NPPs determined the validity and effectiveness of technical solutions for WFA adaptation to NPP with WWER. The WFA upgrades reduce deformation and damage to the fuel rods, as well as increase the reliability of the nuclear reactor. However, in accordance with the nuclear legislation of Ukraine, any modernization of the reactor unit requires an appropriate safety analysis.

The Second Chapter presents analyzes the long-term experience and results of modeling NPP accidents using probabilistic and deterministic methods. As a result

of the analysis, significant limitations/disadvantages of the known methods for modeling NPP accidents were identified. Probabilistic methods of accident modeling and safety analysis are justified only for general assessment of the probability of nuclear and radiation accidents.

The analysis of nuclear safety of reactors consists in determination of conformity of the maximum temperature of covers of fuel elements and temperature of nuclear fuel in the course of possible accidents of the established maximum permissible values to norms and rules of nuclear safety. Currently, the safety analysis uses the traditional approach of modeling the full range of possible accidents by deterministic calculation tools (codes) - RELAP, CATHARE, ATHLET, MELCOR, COKPAT and others.

Based on a conservative approach, a preliminary expert analysis of the feasibility of safety criteria for mixed loads of fuel assemblies and WFA reactors of the WWER type using the code RELAP5/V3.2 for maximum design basis accident showed that the differences hundreds of degrees more than the corresponding values for fuel elements, and at the maximum allowable temperature of the coolant of the emergency cooling system of the core (ECPS) 90 °C safety criteria are not met at all: $T_{\text{ог}} > 1200$ °C. Differences in estimates of the maximum temperature of fuel rods, obtained for the same accident with the code RELAP5 (but using different correlations for critical heat fluxes q_{cr}), are significant - from 362 to 680 °C. For design basis accidents, these differences are not fundamental, as the safety criterion for the allowable temperature of the fuel rods (1200 °C) is met in all the presented results of the calculation justifications. However, in the analysis of beyond design basis accidents, these discrepancies can be fundamental: beyond design basis accidents without damage to the fuel/nuclear fuel shells can become severe accidents.

The analysis of the traditional approach to modeling possible accidents in nuclear power plants with WWER determined a significant impact on the results of the calculated modeling of the whole range of possible accidents «user effects and

code differences», as well as the inexpediency of using deterministic codes for safety analysis in numerous reactor upgrades.

It is established that the known results of safety analysis during diversification of WFA in NPPs with WWER at domestic NPPs are insufficiently substantiated in the issue of modeling heat exchange conditions in the reactor core.

The analysis of known approaches to modeling possible WFA accidents at WWER NPPs at domestic NPPs has identified the need to improve and develop new methods of nuclear safety analysis in the diversification and modernization of reactor elements. All this determines the relevance of this work and requires additional study and analysis.

In the Third Chapter, an alternative operational method of safety analysis in the diversification and modernization of NPP elements with WWER has been developed. On the basis of the developed method it is established to ensure the condition of nuclear safety on the maximum allowable temperature of fuel shells at the maximum design basis accident in WFA NPP with WWER.

The developed method is reasonable and effective for the analysis of nuclear safety of any diversifications and modernizations of reactor elements.

In contrast to the known approaches in the proposed method, the safety criteria for the maximum allowable temperatures of fuel rods and nuclear fuel in relation to the design condition are calculated without the involvement of modeling of emergency processes by deterministic codes.

On the basis of the developed method the substantiation of nuclear safety of diversification of WFA WWER is carried out.

It is established that the nuclear safety criteria for WFA diversification in WWER are met for design basis accidents (including the maximum design basis accident with the maximum allowable coolant cooling temperature) both at partial and at full load of the WFA core.

The scientific novelty of the obtained results:

- the results of the experience of modeling possible accidents in NPP with WWER deterministic codes are offered;
- , an alternative model of emergency modeling in nuclear power plants with WWER deterministic codes was proposed;
- an operative method of safety analysis during diversification and modernization of NPP elements with WWER was developed, namely the method of express analysis;
- it was established, on the basis of the developed method, to ensure the condition of nuclear safety on the maximum allowable temperature of fuel elements at the maximum design basis accident (including for the regime with the maximum temperature of the coolant in the tanks) in WFA NPP with WWER.

The practical significance of the results:

The developed operational method of nuclear safety analysis can be used in the use of used and regulatory nuclear safety of organizations in the diversification and modernization of elements of nuclear reactors.

The results of the dissertation are used in the educational process for the training of specialists in the specialty 143 "Nuclear Energy".

Key words: reliability, safety, power plant, diversification of nuclear fuel, modernization, fuel element (fuel element), fuel cell shell temperature, nuclear fuel temperature.

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATION

The main scientific results of the thesis have been published in the following scientific articles:

1. V.I. Skalozubov, I.L. Kozlov, Y.O. Komarov, **V.Y. Grib**, V.M. Vashchenko Nuclear safety analysis of diversification of Westinghouse fuel assemblies at VVER-1000 // Nuclear Physics and Energy, No. 21 (2), 2020. C. 213-214. ISSN 1818-331X (Indexed by: SCOPUS) DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2020.02.213>.

2. Skalozubov V., Melnik S., Pantak O., **Gryb V.**, Spinov V., Komarov Y. (2019), Analysis of experience, safety and prospects of diversification of nuclear fuel at nuclear power plants // Technology Audit and Production Reserves, 4 (1(48), P. 26–33. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.180740> (Professional publication).

3. Skalozubov V.I., Spinov V.M., **Grib V.Yu.** Modeling of Accidents in Nuclear Power Installations (Analysis of Results of Modeling of Design, Beyond Design and Severe Accidents in Nuclear Power Installations). 2020. 179 p. Monograph: LAMBERT Academic Publishing ISBN: 978-620-0-54862-7.

4. Skalozubov V.I, Spinov V.M., **Grib V.Y.** SAFETY OF DIVERSIFICATION OF NUCLEAR FUEL (Analysis of Safety Conditions at Diversification of Nuclear Fuel of Nuclear Power Plants). 2019. 65 p. Monograph: LAMBERT Academic Publishing ISBN: 978-620-0-49830-4.

5. V.I. Skalozubov, .S.I. Melnik, V.M. Vashchenko, I.B. Korduba, **V.Y. Hrib** The method of express analysis of nuclear and ecological safety during the modernization of nuclear fuel // Journ. Geol. Geograph. Geoecology, 2023, 32(2), P. 388-395 (Web of Science) <https://geology-dnu.dp.ua/index.php/GG/article/view/1024/840>

Scientific papers certifying the approbation of the dissertation materials

6. **Hryb V.Y.** Method of safety analysis for diversification of fuel assemblies of nuclear reactors. Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference "Innovative Trends in Science and Practice" Athens, Greece, April 26-29, 2022. <https://isg-konf.com/uk/innovative-trends-of-science-and-practice-tasks-and-ways-to-solve-them/>

7. Skalozubov V.I., Melnik S.I., Pantak O.I., **Grib V.Yu.** Application of express-method of nuclear safety analysis at modernization of nuclear power installations // 11th International conference Science and society 26th April 2019 (Accent Graphics Communications & Publishing, Hamilton, Canada) [https://www.researchgate.net/profile/Bogdan-Kindzer/publication/332866703_Science_and_societyThe_device_for_electrostimulation_VEB-](https://www.researchgate.net/profile/Bogdan-Kindzer/publication/332866703_Science_and_societyThe_device_for_electrostimulation_VEB-1_modulates_parameters_of_electroencephalogram_and_gas_discharge_visualization/links/5cced421299bf14d95789201/Science-and-societyThe-device-for-electrostimulation-VEB-1-modulates-parameters-of-electroencephalogram-and-gas-discharge-visualization.pdf#page=112)

[1_modulates_parameters_of_electroencephalogram_and_gas_discharge_visualization/links/5cced421299bf14d95789201/Science-and-societyThe-device-for-electrostimulation-VEB-1-modulates-parameters-of-electroencephalogram-and-gas-discharge-visualization.pdf#page=112](https://www.researchgate.net/profile/Bogdan-Kindzer/publication/332866703_Science_and_societyThe_device_for_electrostimulation_VEB-1_modulates_parameters_of_electroencephalogram_and_gas_discharge_visualization/links/5cced421299bf14d95789201/Science-and-societyThe-device-for-electrostimulation-VEB-1-modulates-parameters-of-electroencephalogram-and-gas-discharge-visualization.pdf#page=112)

Scientific works that certify the approbation of the dissertation materials:

8. V.I. Skalozubov, **V.Y. Grib**, A.V. Korolev, T.V. Gablaya, V.Y. Kochneva Accident Management Strategies for Complete Long-Term Loss of Power Supply at Nuclear Power Installations // Yadern Energetika tavrillia. ISSN 2311-8253 NO. 2 (14), 2019. 68-74 p. DOI: <https://doi.org/10.31717/2311-8253.19.2.2> (Professional publication).

9. V. Vashchenko, V. Skalozubov, **V. Hryb**, O. Voloshkina «Stipulating the radioecological impact of consequences of accidents at nuclear power facilities» // Ukrainian Journal of Ecology, 2021, 11 (10), 24-27 p.

doi:[10.15421/2021_314](https://doi.org/10.15421/2021_314) (Web of Science)

<https://www.ujecology.com/articles/stipulating-the-radioecological-impact-of-consequences-of-accidents-at-nuclear-power-facilities.pdf>

10. Vashchenko V.M., Korduba I.B., **Hryb V.Y.** Technological and environmental analysis of current trends in the development of nuclear energy technologies // VIII International Congress of Ecologists (Ecology - 2021) International Scientific and Practical Seminar on Decarbonization and Ecological Modernization of Ukrainian Industry. Collection of scientific papers Ukraine, Vinnytsia, September 22-24, 2021. ISBN 978-966-641-873-2 (PDF).