

АНОТАЦІЯ

Головченко А.М. Удосконалення методики випробувань системи герметичного огороження блоку АЕС з ВВЕР-1000. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 143 «Атомна енергетика» (14 - Електрична інженерія). - Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, 2024.

На сьогоднішній день атомні електростанції (АЕС) України виробляють більше 50 % електрики, що виробляється в країні. Підвищення економічності АЕС є першочерговою задачею поряд з підтримкою високих показників безпеки. Одним з показників економічності роботи АЕС є коефіцієнт встановленої потужності (КВВП), який відображає завантаження енергоблоку протягом року. Наразі великий вплив на КВВП має планово-попереджувальний ремонт, складовою якого є випробування систем безпеки, в тому числі системи герметичного огороження (СГО) реакторного відділення. СГО є останнім бар'єром безпеки на шляху виходу радіоактивних елементів та іонізуючого випромінювання в навколишнє середовище при аварії. Її надійності приділяється велика увага: після кожного планово-попереджувального ремонту (ППР) або після кожного позаштатного розуцільнення засобів локалізації аварії здійснюється випробування СГО на герметичність. Складність та велика тривалість випробувань за «абсолютним» методом (більше ніж доба) є стимулом для скорочення терміну випробувань. В роботі досліджуються засоби скорочення часу випробувань, що доцільно з економічної точки зору. Були розглянуті всі п'ять етапів випробувань та запропоновані засоби їх скорочення. Найбільш суттєвими є використання ежектору для скорочення часу нагнітання повітря та використання компенсаційного методу для скорочення часу вимірювань. Запропоновані засоби дозволяють скоротити час вимірювань більше, ніж вдвічі.

Враховуючи, що кожна година простою енергоблоку – це недовиробіток одного мільйону кВт·год, скорочення часу проведення випробувань є актуальною задачею для покращення економічних показників роботи сучасних АЕС.

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 напрямком підвищення ефективності та безпеки, відмічено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** виконано аналіз світового досвіду в частині випробувань СГО на герметичність, проведено аналіз патентної літератури в цьому напрямку в Україні, США та Франції. Розглянуто метод вимірювання, що використовується зараз на АЕС та принцип застосування компенсаційного методу визначення ступені герметичності.

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

Другий розділ присвячений розробці математичної моделі розрахунку повітряного ежектору, запропонованого для зменшення часу нагнітання повітря для випробувань. Представлена методика визначення характеристик ежектора визначеної конструкції, що дає можливість розрахувати час нагнітання до заданого тиску. Проведено визначення часу нагнітання повітря тільки за допомогою компресору. Розроблено методику визначення характеристики ежектора при заданих параметрах на вході та виході ежектора. Проведено оптимізацію конструкції ежектору з точки зору мінімізації часу нагнітання повітря. Проведені варіантні розрахунки часу нагнітання повітря до СГО при використанні ежекторів різної конструкції. Визначено, що оптимальна конструкція ежектору відповідає проєктному значенню тиску в ГО, що дорівнює 1,45 бар. Враховано додатковий аеродинамічний опір обладнання для очищення повітря, що підсмоктується, від пилу та вологи.

У **третьому розділі** розглядається методика використання компенсаційного методу визначення інтегрального витоку з ГО. Розглянуто схему, приведено описання, розроблено алгоритм проведення випробування та методику обробки

отриманих результатів.

Четвертий розділ присвячено розробці математичної моделі стану повітря в СГО в процесі нагнітання та стабілізації параметрів. Математична модель складається з вирішення системи наступних диференціальних рівнянь: швидкість зміни маси пароповітряної суміші в ГО, швидкість зміни кількості енергії пароповітряної суміші в ГО, зміна температури в часі за шарами матеріалу пасивних поглиначів теплоти при нестационарній теплопровідності. Розроблена модель була верифікована на результатах проведення випробування на 4-му енергоблоці Рівненської АЕС. Розроблена модель дозволяє визначити фактори, що впливають на час етапу стабілізації параметрів. На основі аналізу результатів розрахунків, отриманих за допомогою розробленої моделі, були запропоновані заходи, які дозволяють зменшити час етапу стабілізації.

У п'ятому розділі проведено аналіз можливості скорочення часу випробувань в результаті запропонованих заходів. В результаті отримано, що

- через відміну процесу вакуумування, за результатами якого вже багато років не визначаються ніякі дефекти;
- скорочення часу нагнітання повітря завдяки використанню ежектора;
- скорочення часу стабілізації параметрів, через використання запропонованих заходів;
- скорочення часу вимірювання через використання компенсаційного методу;
- скорочення часу скидання тиску через регулювання скидного клапану, час випробувань може бути зменшений майже вдвічі.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше було запропоновано та обґрунтовано використання ежектору для зменшення часу нагнітання повітря для проведення випробувань.
- розроблено методика проведення випробувань за компенсаційним методом. Запропонована методика обробки результатів випробувань.
- змодельований процес зміни параметрів в ГО, що дозволив розробити рекомендації відносно скорочення часу етапу стабілізації параметрів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що:

1. розроблені пропозиції, спрямовані на зменшення часу випробувань на герметичність СГО. Це дозволить скоротити час ППР і підвищити виробіток електроенергії енергоблоками АЕС України.

2. результати дисертації використано у держбюджетній науково-дослідній роботі № 124-42 «Ядерна та радіаційна безпека та ефективність енергоблоків АЕС з урахуванням сучасних проблем та тенденцій в атомній електроенергетиці» (№ д/р 0116U004924) результати дисертації використано у держбюджетній науково-дослідній роботі

3. результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Одеська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 143 – атомна енергетика.

Ключові слова: система герметичного огороження, інтегральний витік, компенсаційний метод вимірювання витіку, використання ежектору для нагнітання повітря.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Kravchenko, V., Vlasov, A., Andryushchenko, A., Vlasov, D., Golovchenko, A., Gavrilov, P. (2022). Reduced air injection time during containment testing due to the use of an ejector. Odes`kyi Polytechnichniy Universytet, Pratsi, 1 (65), 62–69. Reduced air injection time during containment testing due to the use of an ejector / V. Kravchenko, A. Vlasov, A. Andryushchenko, D. Vlasov, A. Golovchenko, P. Gavrilov // Пр. Одес. політехн. ун-ту. – Одеса, 2022. – Вип. 1 (65). – Р. 62–69. <https://pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1660041533.pdf>
Журнал реферується в зарубіжних базах даних «Україніка наукова», Ulrich's periodicals directory (США), Index Copernicus.
2. Кравченко В. П. , Власов А. П. , Головченко А. М. , Мазуренко А. С. , Дубковський В. О. , Чулкін О. О. Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність /Ядерна та радіаційна безпека. 2(98)2023. С. 53-60.

Doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05) Журнал входить до міжнародної науково метричної бази даних SCOPUS

<http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/13962/1/document-3.pdf>

3. **Головченко А. М.** , Запорожан В. В. , Запорожан І. В., Кравченко В. П. Моделювання процесів у герметичному огороженні реакторної установки з ВВЕР-1000 під час випробувань на герметичність /Ядерна енергетика та довідки. № 3 (28) 2023. С. 3-9.

Журнал індексується в базах даних Index Copernicus, Google Scholar, INIS, ResearchBib. doi.org/10.31717/2311-8253.23.3.1

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Кравченко В.П., Головченко А.М. Зменшення часу випробувань на герметичність захисної оболонки через використання ежектору / XVI Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та фахівців «Проблеми сучасної ядерної енергетики», Нетішин, 16-18 листопада 2022 р.
2. Доповідь на робочій зустрічі на Південноукраїнській АЕС про стан та перспективи зменшення часу випробувань на герметичність захисної оболонки АЕС з ВВЕР-1000. Южноукраїнськ. 17 квітня 2023 р.
3. Кравченко В.П. Власов А.П., Головченко А.М., Мазуренко А.С., Дубковський В.О., Чулкін О.О. Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність / V Міжнародна конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику», Київ, 28-29 вересня 2023 р.
4. Holovchenko A., Zaporozhan V., Zaporozhan I., Kravchenko V. Математичне моделювання випробувань на герметичність контейнменту з ВВЕР-1000. Збірник праць XII International scientific and practical conference «Scientific Theories and Practices as an Engine of Modern Development» (February 28 – March 1, 2024) Bratislava, Slovakia, International Scientific Unity. 2024. P. 291-293
<https://isu-conference.com/wp->

content/uploads/2024/02/Scientific_theories_and_practices_as_an_engine_of_modern_development.pdf

Наукові результати роботи впроваджені (див. Додаток Б) у методичні матеріали дисципліни «Атомні електростанції», «Безпека та надійність АЕС» кафедри АЕС Національного університету «Одеська політехніка» та використані під час роботи над кваліфікаційними роботами бакалаврів та магістрів Національного університету «Одеська політехніка» Литвинова Богдана, Новоскольцева Миколи та Череваня Валентина (детальніше див. Акт впровадження від 5 березня 2024 року).

ABSTRACT

A. Holovchenko. Improvement of the test procedure for the hermetic enclosure system of a VVER-1000 NPP unit. - Manuscript copyright.

Thesis for a Doctor of Philosophy Degree in Specialty 143 «Nuclear Energy» (14 - Electrical engineering). - Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2024.

Nuclear power plants (NPPs) in Ukraine currently generate more than 50% of the country's power generation. Increasing the efficiency of NPPs is a priority task, along with maintaining high safety indicators. One of the indicators of the efficiency of NPP operation is the capacity factor (CF), which reflects the load of the power unit during the year. Currently, a significant impact on the CF is made by scheduled preventive maintenance (SPM), which includes testing of safety systems, including the containment enclosure (CE) of the reactor compartment. The CE is the last safety barrier to prevent the release of radioactive elements and ionizing radiation into the environment in the event of an accident. Its reliability is given great attention: after each SPM or after each emergency depressurization of the accident mitigation systems, the CE is tested for leak-tightness. The complexity and long duration of full-scale testing procedures (more than 24 hours) are a stimulus for reducing the testing time. This paper investigates the means of reducing the testing time, which is economically feasible. All five stages of the testing procedures were considered and methods for their reduction were proposed. The most significant are the use of an ejector to reduce the air injection time and the use of the compensation method to reduce the measurement stage. The proposed methods allow to reduce the measurement stage by more than half. Considering that each hour of downtime of a power unit results in a loss of one million kWh of electricity generation, reducing the testing time is a relevant task for improving the economic performance of modern nuclear power plants.

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.

Chapter 1 presents an analysis of the global experience in containment enclosure leak tightness testing, as well as a review of patent literature in this field in Ukraine, the USA, and France. The measurement method currently used at NPP is examined, along with the principle of applying the compensation method for determining the degree of leak tightness.

Chapter 2 focuses on the development of a mathematical model for calculating the air ejector proposed to reduce the air pressurization time for testing. The methodology for determining the characteristics of an ejector of a certain design is presented, which allows calculating the pressurization time to a given pressure. The determination of the air pressurization time was carried out using only a compressor. A methodology for determining the ejector characteristic at given input and output parameters has been developed. The optimization of the ejector design was carried out from the point of view of minimizing the air pressurization time. Variant calculations of the air pressurization time to the containment enclosure were performed using ejectors of different designs. It was determined that the optimal ejector design corresponds to the design pressure value in the containment of 1.45 bar. The additional aerodynamic resistance of the equipment for cleaning the suctioned air from dust and moisture is taken into account.

Chapter 3 explores the methodology of using the compensation method for determining the integral leak from the containment system. The scheme is considered, a description is provided, an algorithm for testing is developed, and a methodology for processing the obtained results is proposed.

Chapter 4 focuses on the development of a mathematical model of the air state in the containment system during the pressurization and stabilization of parameters. The mathematical model consists of solving the system of the following differential equations: the rate of change of the mass of the vapor-air mixture in the GO, the rate of change of the amount of energy of the vapor-air mixture in the GO, the temperature change over time along the layers of the material of passive heat absorbers with non-stationary thermal conductivity. The developed model was verified against the results of tests conducted at Unit 4 of the Rivne NPP. The developed model allows determining the factors affecting the time of the parameter stabilization stage. Based on the analysis of the developed model, measures were proposed to reduce the time of the stabilization stage.

Chapter 5 analyzes the possibility of reducing the test time as a result of the proposed measures. The results show that:

- by eliminating the vacuuming process, which has not detected any defects for many years;
- reducing the air pressurization time using an ejector;
- reducing the parameter stabilization time using the proposed measures;
- reducing the measurement time using the compensation method;
- reducing the pressure relief time by adjusting the relief valve the test time can be reduced by almost half.

The scientific novelty of the results is:

- The first proposal and justification for using an ejector to reduce the air pressurization time for testing.

- The development of a methodology for testing using the compensation method. The proposed methodology for processing the test results.
- The modeling of the process of parameter changing in the containment system, which allowed the development of recommendations for reducing the time of the parameter stabilization stage.

The practical significance of the results is:

1. Developed proposals for reducing the containment leak test time. This will reduce the time of scheduled preventive maintenance (SPM) and increase the electricity production of nuclear power plant (NPP) units in Ukraine.

2. The dissertation results were used in the state budget research and development work No. 124-42 "Nuclear and radiation safety and efficiency of NPP units taking into account modern problems and trends in nuclear power" (No. 0116U004924).

3. The results of the dissertation are used in the educational process of the Odesa Polytechnic National University for training specialists in the specialty 143 - Nuclear Power

Keywords: containment system, integral leakage, compensation method on leak measurement, using an ejector for air pressurization.

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATIONS

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

1. Kravchenko V., Vlasov A., Andryushchenko A., Vlasov D., Holovchenko A., Gavrilov

- P. Reducing air injection time during tests of nuclear power plant containment shells using an ejector. Proceedings of Odesa Polytechnic University. 2022. Issue 1(65). P. 62-69.
<https://pratsi.op.edu.ua/app/webroot/articles/1660041533.pdf>
2. Kravchenko V.P., Vlasov A.P., Holovchenko A.M., Mazurenko A.S., Dubkovsky V.O., Chulkin O.O. State and Prospects of Testing the Containment System of a VVER-1000 Reactor Unit for Tightness / Nuclear and Radiation Safety. 2(98)2023.
 Pp. 53-60. Doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05)
 3. Holovchenko A., Zaporozhan V., Zaporozhan I., Kravchenko V. Mathematical modeling of reactor VVER-1000 installation containment during leak tests. /Nuclear energy and environment. № 3 (28) 2023. C. 3-9.
doi.org/10.31717/2311-8253.23.3.1

Scientific papers certifying the approbation of the dissertation materials:

1. Kravchenko V.P., Holovchenko A.M. (2022). Reducing the Time of Leak Testing of the Containment Shell Using an Ejector. XVI International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists "Problems of Modern Nuclear Power". Netyshin, Ukraine. November 16-18.
2. Holovchenko A.M., Kravchenko V.P. (2023). State and prospects of reducing the time of leak testing of the containment shell of VVER-1000 NPPs. Report at the working meeting at the South Ukrainian NPP, Yuzhnoukrainsk, Ukraine. April 17.
3. Kravchenko V.P., Vlasov A.P., Holovchenko A.M., Mazurenko A.S., Dubkovsky V.O., Chulkin O.O. (2023). State and Prospects of Testing the Containment System of a VVER-1000 Reactor Unit for

Tightness. V International Conference "Prospects for Innovation in Nuclear Energy". Kyiv, Ukraine.

September 28-29.

4. Holovchenko A., Zaporozhan V., Zaporozhan I., Kravchenko V. Mathematical modeling of containment leak tests with VVER-1000. Proceedings of XII International scientific and practical conference «Scientific Theories and Practices as an Engine of Modern Development» (February 28 – March 1, 2024) Bratislava, Slovakia, International Scientific Unity. 2024. P. 291-293.

https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Scientific_theories_and_practices_as_an_engine_of_modern_development.pdf

The scientific results of the work have been implemented (see Appendix B) in the methodological materials of the disciplines "Nuclear Power Plants" and "Safety and Reliability of NPPs" of the Department of Nuclear Power Plants of the National University "Odesa Polytechnic" and were used during the work on the qualification papers of bachelors and masters of the National University "Odesa Polytechnic" Bohdan Litvynov, Mykola Novoskoltsev and Valentyn Cherevany (for more details see the ACT of implementation dated March 05, 2024).