

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВОЛОДИМИР СТАНІСЛАВОВ

УДК 621.18 : 621.039

ДИСЕРТАЦІЯ

**КВАЛІФІКАЦІЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ
ПАРОГЕНЕРАТОРІВ ЕНЕРГОУСТАНОВОК В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ**

Спеціальність 144 – Теплоенергетика
Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В. Станіславов

Науковий керівник: Мазуренко Антон Станіславович, доктор технічних наук,
професор, лауреат Державної премії України з науки і техніки

Одеса – 2026

АНОТАЦІЯ

Станіслав В. Кваліфікація надійності систем регулювання тиску парогенераторів енергоустановок в екстремальних умовах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика. – Національний університет «Одеська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2026.

У роботі проведено ризик-орієнтований аналіз впливу екстремальних умов експлуатації енергоустановок на надійність системи регулювання тиску в об'ємі парогенераторів (СРД ПГ). Наслідками відмови СРД ПГ в екстремальних умовах може бути аварійні ситуації з критичними пошкодженнями обладнання енергоустановок. На підставі ризик-орієнтованого аналізу встановлено:

– у разі постульованої відмови всіх систем зниження тиску у доквілля (БРУ-А) сумарна базова ймовірність відмови СРД ПГ зростає у 740 разів;

– найбільш значний вплив відмов БРУ-А на ймовірнісні показники надійності енергоустановок встановлені для груп аварій з міжконтурними течами у парогенераторах;

– в умовах аварій з міжконтурними течами у парогенераторах енергоустановок (ЕУ) може бути некваліфіковані експлуатаційними випробуваннями режими пароводяної/водяної течі у БРУ-А;

– недостатньо обґрунтовано враховується вплив на надійність енергоустановок екстремальних умов експлуатації з падінням великих/вибухонебезпечних об'єктів та сучасних результатів реального стану сейсмічної- та смерченебезпеки районів розташування ЕУ України.

Проведений порівняльний аналіз результатів проєктної та удосконаленої кваліфікації надійності БРУ-А серійного енергоблоку в екстремальних умовах експлуатації встановив:

– гранично допустимий сейсмічний вплив на БРУ-А рівня 7 балів за шкалою MSK;

– гранично допустимий динамічний вплив на БРУ-А внаслідок падіння великих/вибухонебезпечних об'єктів еквівалентне умовам землетрусу рівня 7 балів.

Розроблено метод адаптації результатів експериментальної кваліфікації надійності БРУ-А у режимах двофазного потоку на модельних установках до умов аварій з міжконтурними течами у парогенераторах ЕУ на основі ідентичності критеріїв термодинамічної подібності. На підставі встановлених критеріїв проведено аналіз результатів експериментальної кваліфікації надійності закриття клапанів БРУ-А у режимах двофазних потоків, отриманих у модельній установці FRAMATOM, та встановлено недостатню обґрунтованість цих результатів щодо практичного впровадження.

Розроблено детерміністичний метод розрахунково-експериментальної кваліфікації надійності закриття БРУ-А в режимах пароводяного/водяного потоку.

На підставі розробленого методу головні результати розрахунково-експлуатаційної кваліфікації надійності закриття 2-х модифікацій конструкцій БРУ-А ЕУ полягають у наступному:

– встановлені умови кваліфікації виконуються у всьому діапазоні пароутримань потоку на вході в проточну зону клапана та проміжного положення штока в процесі закриття клапана;

– встановленим умовам кваліфікації не відповідає режим однофазного потоку води на вході в проточну зону клапана з температурою менше 373 К.

Проведено консервативний аналіз надійності закриття клапанів БРУ-А в умовах максимальних гідродинамічних навантажень на шток однофазного водного потоку з температурою менше 373 К. В результаті проведеного аналізу встановлено достатню надійність закриття клапанів на всіх етапах руху штока - від моменту повного відкриття прохідного перерізу клапана до моменту закриття.

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 енергетики.

В першому розділі виконаний аналіз досвіду експлуатації та перспектив розвитку теплоенергетичного обладнання, зокрема систем регулювання тиску парогенераторів. Результатом проведеного аналізу став вибір одного з пріоритетних напрямків підвищення ефективності систем теплоенергетики, а саме кваліфікація надійності систем регулювання в екстремальних умовах.

У другому розділі виконаний аналіз впливу надійності систем регулювання систем регулювання тиску в екстремальних аварійних ситуаціях та визначені ймовірнісні показники впливу надійності БРУ-А на енергоустановки з парогенераторами.

В третьому розділі виконано порівняльний аналіз результатів проектної та удосконаленої кваліфікації надійності БРУ-А серійного енергоблоку в екстремальних умовах експлуатації – можливих аварій з міжконтурними течами у парогенераторах, сейсмичної- та смерченебезпеки районів розташування АЕС України.

В четвертому розділі представлено результати застосування методу адаптації результатів експериментальної кваліфікації надійності БРУ-А у режимах двофазного потоку на модельних установках до умов аварій з міжконтурними течами у парогенераторах АЕС.

В п'ятому розділі представлено результати аналізу та розроблений метод кваліфікації надійності БРУ-А при максимальних гідродинамічних навантаженнях у запроектних та екстремальних аварійних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено детерміністичні методи кваліфікації надійності БРУ-А в екстремальних умовах некваліфікованих режимах експериментальних випробувань.

2. Розроблено метод адаптації результатів експериментальної кваліфікації БРУ-А, отриманих на експериментальних установках/стендах, щодо некваліфікованих режимів екстремальних умов у ЕУ ПГ на підставі теорії подібності термодинамічних процесів.

3. Встановлено ймовірнісні оцінки впливу надійності БРУ-А/СРТ ПГ на безпечну експлуатацію ЕУ ПГ в екстремальних умовах критичного сейсмічного впливу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що:

1. На основі отриманих у роботі результатів розроблено проєкти галузевих технічних рішень кваліфікації надійності БРУ-А ЕУ ПГ в екстремальних аварійних умовах.

2. Розроблені методи можуть бути використані при проєктуванні, експлуатації та продовженні експлуатації теплоенергетичного обладнання.

Ключові слова: електростанція, енергоустановки, кваліфікація обладнання, парогенератори, реактори, екстремальні умови експлуатації, системи регулювання тиску, показники, стійкість, термодинамічна нестійкість, метод, модернізація, характеристики, теплообмін, температура.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. **Станіславов Володимир**. Системи регулювання тиску енергоустановок. Монографія. LAMBERT (Німеччина). Затверджено рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» (протокол №8 від 11.03.2026 р.) – 2026 р. – 69 с. – ISBN 978-620-8-45626-9.

2. **Станіславов Володимир**. Кваліфікація надійності системи регулювання тиску. Монографія. LAMBERT (Німеччина). Затверджено рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» (протокол №8 від 11.03.2026 р.) – 2026 р. – 72 с. – ISBN 978-613-9-77076-2.

3. **Станіславов Володимир**. Кваліфікація надійності систем регулювання тиску парогенераторів енергоустановок в екстремальних умовах// Монографія. LAMBERT (Німеччина). Затверджено рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка». (протокол №№8 від 11.03.2026 р.) – 2026 р. – 144 с. – ISBN 978-620-6-71314-2. <https://www.morebooks.shop/shop-ui/shop/product/978-620-6-71314-2>.

4. А. Мазуренко, В. Кравченко Г. Лужанська, В. Шавров, **В. Станіславов**. Особливості організації течії примежового шару в міждисковому просторі турбін Tesla. *Праці Одеського політехнічного університету*. Вип. 1(67), 2023 стор. 49-54. <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/19>. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.67.2023.06>.

5. A. Mazurenko, A. Pustovit, P. Shylov, D. Shylov, **V. Stanislavov**. Determination of the probability of failures in the operation of elements of urban heat supply systems in extreme operating conditions. *Proc. of Odessa Polytechnic University (Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi)*. Issue 1(71), 2025, p. 98-103. <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/510>. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.71.2025.11>.

6. Мазуренко, А., Кандеєва, В., Чиченін, В., Пустовіт, А., **Станіславов, В.** (2025). Оцінка ризиків забезпечення надійного теплопостачання споживачів в умовах зовнішнього руйнування. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(3). DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3274>.

7. Ж.Ф. Дорошенко, **В.Д. Станіславов**, Ю.К. Бессастьян, С.І Грищенко, А.Ю. Каверін. Застосування відновлювальних джерел енергії в торгівельно-розважальних центрах для потреб теплопостачання з урахуванням режимів експлуатації. *Холодильна техніка та технологія*, 61(4), 2025. <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/reftech/article/view/3331>. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3331>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Лужанська Г.В., Сергеев І.В., Бессастьян Ю.К., Тарасюк О.С., **Станіславов В.Д.** Підвищення енергоефективності будівель. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference «Actual problems of personality psychology in the modern world» (April 09 – 12, 2024) Rome, Italy. International Science Group. 2024. Pp. 294-297. <https://isg-konf.com/actual-problems-of-personality-psychology-in-the-modern-world/>

9. Мазуренко А.С., Лужанська Г.В., Фуркаленко О.Л., **Станіславов В.Д.**, Муренко І.В. Альтернативні установки систем незалежного енергопостачання. Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference. San Francisco, USA. 2023. Pp. 454-456. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-foundations-of-scientists-and-modern-opinions-regarding-the-implementation-of-modern-trends/>. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.25>.

10. Лужанська Г.В., Ануфрієв С.С., Каверін А.Ю., Костін К.К. **Станіславов В.Д.** Основні прилади інструментального енергетичного обстеження //Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. “Scientific achievements of contemporary society” (October 10-12, 2024) Cognum Publishing House, London, United Kingdom. 2024. Pp. 180-183. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii->

[mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-achievements-of-contemporary-society-10-12-10-2024-london-velikobritaniya-arhiv/](#)

11. Лужанська Г.В., **Станіславов В.Д.**, Фуркаленко О.Л., Грищенко С.І., Рак О.В. Використання пінополіуретану в якості утеплювача будівельних огорожувальних конструкцій // Global trends in science and education. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. (April 7-9, 2025) SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2025. Pp. 377-380. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-trends-in-science-and-education-7-9-04-2025-kiyiv-ukrayina-arhiv/>

ABSTRACT

Stanislavov V. Reliability qualification of pressure control systems of steam generators of power plants in extreme conditions. – Qualifying scientific work as a copyrights manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy by specialty 144 – Heat Power Engineering. – Odessa Polytechnic of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, Ukraine, 2026.

A risk-based analysis has been carried out to assess the impact of extreme operating conditions at power plants on the reliability of the steam generator pressure regulation system (SGPRS). Failure of the SGPRS under extreme conditions could lead to accidents resulting in critical damage to power plant equipment. Based on the risk-oriented analysis, the following has been established:

- in the event of a postulated failure of all ambient pressure relief systems (BRU-A), the total baseline probability of PGPRS failure increases by a factor of 740;

- the most significant impact of BRU-A failures on the reliability probability indices of power plants has been established for accident groups involving inter-loop leaks in steam generators;

- in the event of accidents involving out-of-contour leaks in the steam generators of power plants, the steam-water/water leak modes in the BRU-A may not be adequately assessed by operational tests;

- the impact on the reliability of power plants of extreme operating conditions involving the fall of large/explosive objects, and the latest findings regarding the actual seismic and tornado hazard levels in the regions where Ukraine's power units are located, are not sufficiently taken into account.

A comparative analysis of the results of the design and improved reliability qualification of the BRU-A of a serial power unit under extreme operating conditions has established:

- the maximum permissible seismic impact on the BRU-A is 7 points on the MSK scale;

- the maximum permissible dynamic impact on the BRU-A resulting from the fall of large/explosive objects is equivalent to the conditions of a magnitude 7 earthquake.

A method has been developed for adapting the results of experimental reliability qualification of the BRU-A in two-phase flow regimes on test benches to accident conditions involving out-of-loop leaks in steam generators of nuclear power plants, based on the identity of thermodynamic similarity criteria. Based on the established criteria, an analysis was carried out of the results of the experimental reliability qualification of BRU-A valve closure in two-phase flow regimes, obtained on the FRAMATOM model facility, and it was established that these results lack sufficient justification for practical implementation.

A deterministic method for the computational and experimental qualification of the reliability of BRU-A closure in steam-water/water flow regimes has been developed.

Based on the developed method, the main results of the computational and operational reliability qualification of the closure of two modifications of the BRU-A EU designs are as follows:

- the established qualification conditions are met across the entire range of steam content in the flow at the valve inlet and the intermediate position of the stem during valve closure;

- the single-phase water flow regime at the valve flow zone inlet with a temperature below 373 K does not meet the established qualification conditions;

A conservative reliability analysis of BRU-A valve closure has been carried out under conditions of maximum hydrodynamic loads on the stem from a single-phase water flow with a temperature below 373 K. The analysis carried out has established that the valves close reliably at all stages of the stem's movement – from the moment the valve's flow passage is fully open until it closes

The introduction presents the rationale for choosing the research topic, highlights its relevance and connection with scientific programs. Based on this, the goal and task of

the research were formed. The scientific novelty of the obtained results and their practical value for the energy industry are indicated.

In the first section, an analysis of operating experience and prospects for the development of thermal power equipment, in particular pressure regulation systems of steam generators, is carried out. The result of the conducted analysis was the selection of one of the priority directions for increasing the efficiency of heat energy systems, namely the qualification of the reliability of regulation systems in extreme conditions.

In the second section, the analysis of the influence of the reliability of pressure regulation systems in extreme emergency situations is performed and the probable indicators of the influence of BRU-A reliability on power plants with steam generators are determined.

In the third section, a comparative analysis of the results of the design and improved reliability qualification of the BRU-A series power unit in extreme operating conditions - possible accidents with inter-circuit leaks in steam generators, seismic and tornado hazards in the regions of the Ukrainian NPP location - was performed.

The fourth chapter presents the results of the application of the method of adaptation of the results of the experimental qualification of BRU-A reliability in two-phase flow modes on model plants to the conditions of accidents with inter-loop leaks in NPP steam generators.

The fifth chapter presents the results of the analysis and developed a method for qualifying the reliability of BRU-A at maximum hydrodynamic loads under design and extreme emergency conditions.

Scientific novelty of the obtained results.

1. Deterministic methods of reliability qualification of BRU-A in extreme conditions of unqualified EI regimes were developed for the first time.

2. A method of adapting the results of the BRU-A experimental qualification, obtained at experimental installations/stands, with respect to unqualified regimes of extreme conditions in EU PG based on the theory of similarity of thermodynamic processes has been developed.

3. Probabilistic estimates of the impact of BRU-A/SRT PG reliability on the safe operation of PG UEs in extreme conditions of critical seismic impact have been established.

The practical significance of the obtained results is that:

1. On the basis of the results obtained in the work, projects of industry technical solutions for the reliability qualification of BRU-A EU PG in extreme emergency conditions were developed.

2. The developed methods can be used in the design, operation and continued operation of thermal power equipment.

Keywords: power plant, power plants, equipment qualification, steam generators, reactors, extreme operating conditions, pressure control systems, indicators, stability, thermodynamic instability, method, modernization, characteristics, heat exchange, temperature.

LIST OF APPLICANT'S PUBLICATION

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

1. **Stanislavov Volodymyr**. Pressure regulation systems of power plants. Monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing (Germany). Approved by the decision of the Academic Council of the National University «Odesa Polytechnic» (protocol No. 8 dated March 11, 2026) 2026 - 69 p. ISBN 978-620-8-45626-9.

2. **Stanislavov Volodymyr**. Qualification of the reliability of the pressure regulation system. Monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing (Germany). Approved by the decision of the Academic Council of the National University «Odesa Polytechnic» (protocol No. 8 dated March 11, 2026) 2026 - 72 p. ISBN 978-613-9-77076-2.

3. **Stanislavov Volodymyr**. Qualification of the reliability of pressure control systems of steam generators of power plants in extreme conditions. Monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing (Germany). Approved by the decision of the Academic Council of the National University «Odesa Polytechnic». (protocol No. 8 dated 11.03.2026) 2026 – 144 p. ISBN 978-620-6-71314-2. <https://www.morebooks.shop/shop-ui/shop/product/978-620-6-71314-2>.

4. A. Mazurenko, V. Kravchenko, G. Luzhanska, V. Shavrov, **V. Stanislavov**. Peculiarities of the organization of the boundary layer flow in the interdisc space of Tesla turbines. *Proc. of Odessa Polytechnic University (Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi.* Vol. 1(67), 2023, PP. 49 - 54. <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/19>. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.67.2023.06>.

5. A. Mazurenko, A. Pustovit, P. Shylov, D. Shylov, **V. Stanislavov**. Determination of the probability of failures in the operation of elements of urban heat supply systems in extreme operating conditions. *Proc. of Odessa Polytechnic University (Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi.* Issue 1(71), 2025, PP. 98-103.

<https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/510>.

DOI:

<https://doi.org/10.15276/opu.1.71.2025.11>.

6. Mazurenko, A., Kandeeva, V., Chichenin, V., Pustovit, A., **Stanislavov, V.** (2025). Assessment of the risks of ensuring reliable heat supply to consumers in conditions of external destruction. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(3). DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3274>.

7. J.F. Doroshenko, **V.D. Stanislavov**, Yu.K. Bessatyan, S.I Hryshchenko, A.Yu. Kaverin. Application of renewable energy sources in shopping and entertainment centers for heat supply needs, taking into account operating modes. *Refrigeration technology and technology*, 61(4), 2025. <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/reftech/article/view/3331>. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3331>.

Scientific papers certifying the approbation of the dissertation materials

8. Luzhanska G.V., Sergeyev I.V., Bessatyan Yu.K., Tarasyuk O.S., **Stanislavov V.D.** Increasing the energy efficiency of buildings. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference «Actual problems of personality psychology in the modern world» (April 09 - 12, 2024) Rome, Italy. International Science Group. 2024. PP. 294 - 297. <https://isg-konf.com/actual-problems-of-personality-psychology-in-the-modern-world/>

9. Mazurenko A.S., Luzhanska G.V., Furkalenko O.L., **Stanislavov V.D.**, Murenko I.V. Alternative installations of independent energy supply systems. Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference. San Francisco, USA. 2023. PP. 454-456. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-foundations-of-scientists-and-modern-opinions-regarding-the-implementation-of-modern-trends/>. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.25>.

10. Luzhanska G.V., Anufriev S.S., Kaverin A.Yu., Kostin K.K., **Stanislavov V.D.** Basic instruments of instrumental energy survey // Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. «Scientific achievements of contemporary society»

(October 10-12, 2024) Cognum Publishing House, London, United Kingdom. 2024. PP. 180-183. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-achievements-of-contemporary-society-10-12-10-2024-london-velikobritaniya-arhiv/>

11. Luzhanska G.V., **Stanislavov V.D.**, Furkalenko O.L., Hryshchenko S.I., Rak O.V. The use of polyurethane foam as insulation of building enclosure structures // Global trends in science and education. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. (April 7-9, 2025) SPC «Sci-conf.com.ua». Kyiv, Ukraine. 2025. PP. 377 - 380. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-trends-in-science-and-education-7-9-04-2025-kiyiv-ukrayina-arhiv/>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ І ВИЗНАЧЕНЬ	18
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ	21
ВСТУП	Ошибка! Закладка не определена.
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ТА КОНСТРУКЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ У ПАРОГЕНЕРАТОРАХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК	
	28
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ВПЛИВУ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ АВАРІЙНИХ УМОВАХ	
	44
2.1 Аналіз критичності для безпеки системи регулювання тиску парогенераторів у екстремальних аварійних умовах.....	44
2.2. Ймовірнісні показники впливу надійності БРУ-А на енергоустановки з парогенераторами в екстремальних умовах	59
Висновки до розділу 2	70
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВ НА НАДІЙНІСТЬ І БЕЗПЕКУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ	
	71
3.1 Аналіз екстремальних («жорстких») умов енергоустановок з парогенераторами.....	71
3.2 Ймовірнісний аналіз впливу зовнішніх екстремальних умов на надійність БРУ-А.....	80
3.3 Аналіз гранично допустимого для надійності БРУ-А землетрусу енергоустановки з парогенераторами	86
Висновки до розділу 3	97
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ КВАЛІФІКАЦІЇ НАДІЙНОСТІ БРУ-А В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ НЕКВАЛІФІКОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВИПРОБУВАННЯМИ РЕЖИМІВ	
	99
4.1 Метод адаптації результатів експериментальної кваліфікації надійності БРУ-А до умов режимів двофазних потоків.....	99

4.2 Метод розрахунково-експериментальної кваліфікації надійності БРУ-А за умов режимів двофазного потоку	110
Висновки до розділу 4.....	117
РОЗДІЛ 5. МЕТОД КВАЛІФІКАЦІЇ НАДІЙНОСТІ БРУ-А ПРИ МАКСИМАЛЬНИХ ГІДРО-ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ.....	118
5.1 Аналіз допустимих навантажень на шток БРУ-А	118
5.2 Аналіз надійності БРУ-А при максимальних гідродинамічних навантаженнях.....	122
Висновки до розділу 5.....	134
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	137
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ І ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	148
ДОДАТОК Б. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	151

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ І ВИЗНАЧЕНЬ

Термін	Визначення	Посилання на НД
Зовнішній фактор, що впливає	явище, процес або середовища, зовнішні стосовно виробу або його складових частин, які викликають або можуть викликати обмеження або втрату працездатного стану виробу в процесі експлуатації	ДСТУ 26883
«Жорсткі» умови довкілля	параметри навколишнього середовища, що різко змінюються в результаті вихідних подій	Серія звітів МАГАТЕ з безпеки №3
Зони «м'яких» умов довкілля	зони (приміщення) АЕС, які можуть зазнавати сейсмічних впливів, але чий умови експлуатації в результаті вихідних подій значно не змінюються	Серія звітів МАГАТЕ з безпеки №3
Зони «жорстких» умов довкілля	зони (приміщення) АЕС, в яких в результаті вихідних подій створюються «жорсткі» умови довкілля	Серія звітів МАГАТЕ з безпеки №3
Початкова подія	порушення роботи (відмова) системи (елемента) АС або помилка персоналу, а також зовнішній чи внутрішній вплив, що призводять до порушення нормальної експлуатації або меж та/або умов безпечної експлуатації. Вихідна подія включає всі залежні відмови, які є її наслідком	НП 306.2.141-2008
Кваліфікація обладнання	підтвердження того, що конструкція, система (елемент) у межах всього терміну служби виконуватиме покладені функції як при нормальній експлуатації, так і проєктних аваріях з урахуванням характеристик середовища, в якому функціонує конструкція, система (елемент)	НП 306.2.141-2008
«М'які» умови довкілля	параметри навколишнього середовища, що незначно змінюються в результаті вихідних подій	Серія звітів МАГАТЕ з безпеки №3
Програма кваліфікації обладнання	документ, що містить методологію та регламентує організацію та порядок кваліфікації обладнання АЕС	ПМ- Д.0.03.476-09

Термін	Визначення	Посилання на НД
Проектна аварія	аварія, для якої проектом визначено вихідні події та кінцеві стани та передбачені системи безпеки, що забезпечують з урахуванням принципу одиничної відмови системи (каналу системи) безпеки або однієї додаткової помилки персоналу, обмеження її наслідків встановленими межами	ОПБУ-2008
Процес кваліфікації обладнання	процес, що складається з трьох фаз: проектних вихідних даних, встановлення/підвищення та збереження кваліфікації	ПМ-Д.0.03.476-09
Працездатний стан, працездатність	стан об'єкту, при якому він здатний виконувати всі необхідні функції	* ДСТУ 2860
Ресурс	сумарне напрацювання об'єкта (виробу) від початку його експлуатації або його відновлення після ремонту до переходу в граничний стан	* ДСТУ 2860
Система	сукупність взаємопов'язаних елементів, призначених для виконання заданих функцій	НП 306.2.141-2008
Термін служби	календарна тривалість експлуатації об'єкта (виробу) від її початку або від його відновлення після ремонту до переходу до граничного стану	* ДСТУ 2860
Старіння	загальний процес, у якому характеристики систем чи елементів поступово змінюються у часі чи результаті використання	НП 306.2.099-2004
Управління аварією	дії, спрямовані на запобігання переростанню проектних аварій у запроектні та на обмеження наслідків запроектних аварій. Для цих цілей використовуються будь-які технічні засоби, що є у працездатному стані, призначені для нормальної експлуатації та забезпечення безпеки при проектних аваріях, а також засоби, спеціально призначені для обмеження наслідків запроектних аварій	ОПБУ-2008

Термін	Визначення	Посилання на НД
Умови експлуатації	сукупність зовнішніх факторів, що діють на виріб при його експлуатації	ДСТУ 25866
Облікова картка кваліфікації обладнання	документ, що містить інформацію про результати кваліфікації обладнання	Серія звітів МАГАТЕ з безпеки №3
Фаза проектних вихідних даних	початкова фаза кваліфікації обладнання, при якій визначаються елементи СВБ, що підлягають кваліфікації та їх функції при постульованих вихідних подіях, що розглядаються в проекті, створюють «жорсткі» умови навколишнього середовища	ПМ-Д.0.03.476-09
Фаза збереження кваліфікації обладнання	заклучна фаза кваліфікації обладнання, що включає заходи щодо підтримки кваліфікації обладнання на необхідному рівні протягом терміну служби/ресурсу АЕС – його будову та компонування, моніторинг стану та заміну елементів	ПМ-Д.0.03.476-09
Фаза встановлення кваліфікації	друга фаза кваліфікації обладнання, при якій встановлюється відповідність працездатності обладнання його необхідним функціям безпеки під час сейсмічних впливів та в «жорстких» умовах навколишнього середовища, які можуть виникнути за вихідних подій	ПМ-Д.0.03.476-09
Елементи (стосовно цього документа)	обладнання, прилади, кабелі та інші вироби, що забезпечують виконання заданих функцій самостійно або у складі систем та розглядаються в проекті як структурні одиниці при проведенні аналізів надійності та безпеки	ПМ-Д.0.03.476-09

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС	– атомна електрична станція
АЗ	– аварійний захист
АНП	– аналіз надійності персоналу
АП	– аварійна послідовність
АПА	– аналіз проєктних аварій
АПЕН	– аварійний живильний електронасос
АРМ	– автоматичний регулятор потужності
АСР	– автоматизовані системи управління
ББ	– бак-барботер
БЗОК	– швидкодіючий запірно-відсічний клапан
БНС	– блочна насосна станція
БРУ-А	– швидкодіюча редуційна установка скидання пари в атмосферу
БРУ-К	– швидкодіюча редуційна установка скидання пари в конденсатор
БРУ-СН	– швидкодіюча редуційна установка відбору пари на власні потреби
БС	– базова подія
ВАБ	– ймовірнісний аналіз безпеки
ВВЕР	– водо-водяний енергетичний реактор
ВЗЕЗ	– зовнішні та внутрішні екстремальні події
ВД	– високий тиск
ВПЕН	– допоміжний живильний електронасос
ВЕВ	– зовнішній екстремальний вплив
ГЕ	– гідроємність
ГО	– гермооболонка
ГПК	– головний паровий колектор
ГЦН	– головний циркуляційний насос
ДК	– дистанційне керування
ЕВ	– експлуатаційні випробування

ЕГСР	– електрогідравлічна система регулювання
ЕЕТУ	– етажерка електротехнічних пристроїв
ЗАЕС	– Запорізька атомна електрична станція
ІЛА	– інструкція з ліквідації аварії
ІПУ	– імпульсно-запобіжний пристрій
ІСА	– вихідна подія аварії
КД	– компенсатор тиску
КІЕП	– Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»
КС	– конденсатозбірник
КУ	– критерій успіху
КУ БЩУ	– ключ управління блочного щита управління
КЯР	– комітет ядерного регулювання
ЛЕП	– лінія електропередач
МРЗ	– максимальний розрахунковий землетрус
МУТ	– заходи щодо управління течією з 1-го контуру у 2-й
НД	– низький тиск
ОАБ	– звіт з аналізу безпеки
ООП	– відмова із загальних причин
ОРДЕС	– загальноблочна резервна дизельна електростанція
ПГ	– парогенератор
ПЗ	– протипожежний захист
ПЗ	– проектний землетрус
ПК	– запобіжний клапан
ПМА	– пускач магнітний
ПСУ	– пароскидний пристрій
РАЕС	– Рівненська атомна електрична станція
РДЕС	– резервна дизельна електростанція
РК ТГ	– регулюючий клапан турбогенератора
РВ	– реакторне відділення
РОМ	– панель розвантаження обмеження потужності
РПО	– регулятори живлення основні

РУ	– реакторна установка
САОЗ	– система аварійного охолодження активної зони
САР	– система автоматичного регулювання
СБ	– система безпеки
СВБ	– система, важлива для безпеки
СК ТГ	– стопорний клапан турбогенератора
СЛА	– система локалізації аварії
СПП	– сепаратор-паропромперегрівач
СРД	– система регулювання тиску
СРК	– стопорно-регулюючий клапан
СУЗ	– система управління та захисту
ТВОП	– технічна вода відповідальних споживачів
ТВ	– турбінне відділення
ТОБ	– технічне обґрунтування безпеки
ТНН	– турбонасос
ТРБЕ	– технологічний регламент безпечної експлуатації
ТЕН	– трубчастий електронагрівач
УП	– укажчик положення
УПЗ	– прискорений попереджувальний захист
ФБ	– функція безпеки
ФДВ	– функціональне дерево відмов
ХАЕС	– Хмельницька атомна електрична станція
ЦТАВ	– цех теплової автоматики та вимірювань
ЧПАЗ	– частота пошкодження активної зони

ВСТУП

Актуальність теми. В екстремальних умовах військового часу в Україні критично порушена значна частина теплових енергоустановок та майже сотня аварійних зупинок атомних енергоблоків внаслідок відмови критичних систем зовнішнього електропостачання (аналог вихідної події Фукусимської аварії).

Забезпечення надійності експлуатації та управління аваріями в екстремальних умовах енергоустановок (ЕУ) з парогенераторами здійснюється системою регулювання тиску парогенераторів (СРТ ПГ) – швидкодіючими редукційними пристроями скидання пари в атмосферу/конденсатор турбоустановки (БРУ-А/БРУ-К) і запобіжними клапанами (ПК ПГ). режимах реактора.

БРУ-А є основним елементом СРТ ПГ. БРУ-К і ПК ПГ виконують переважно дублювання регулювання тиску ПГ у разі відмов БРУ-А.

В ЕУ регламентовано щорічну (у процесі планово-попереджувальних ремонтів енергоблоків) експериментальну кваліфікацію надійності БРУ-А шляхом експлуатаційних випробувань (ЕВ) на паровому середовищі. Але в екстремальних та аварійних умовах можливі динамічні дії на шток клапана пароводяного двофазного / водяного однофазного потоків, які експериментально не кваліфіковані експлуатаційними випробуваннями.

Тому *актуальним питанням* щодо експлуатації ЕУ в екстремальних умовах експлуатації є кваліфікація надійності СРТ ПГ в екстремальних та аварійних умовах у режимах пароводяного/водяного потоку. Таким чином, необхідність кваліфікації надійності БРУ-А в екстремальних умовах експлуатації визначає актуальність, цілі та завдання представленої роботи.

Мета та завдання дослідження. Основна мета роботи – провести аналіз впливу надійності основних елементів СРТ ПГ на безпечну експлуатацію ЕУ з парогенераторами в екстремальних аварійних умовах, а також розробити методи кваліфікації надійності БРУ-А у некваліфікованих ЕВ режимах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних **завдань**.

1. Провести аналіз впливу надійності БРУ-А на безпечну експлуатацію ЕУ з парогенераторами в екстремальних та аварійних умовах.
2. Проаналізувати вплив екстремальних («жорстких») умов на надійність систем управління аваріями та безпеку ЕУ з парогенераторами (ЕУ ПГ).
3. Провести аналіз результатів розрахункової кваліфікації гранично допустимого сейсмічного на надійність БРУ-А ЕУ ПГ.
4. Розробити метод адаптації результатів експериментальної кваліфікації надійності БРУ-А у модельних установках до екстремальних умов некваліфікованих режимів.
5. Розробити метод розрахунково-експериментальної кваліфікації надійності закриття БРУ-А у режимі двофазних потоків.
6. Виконати розрахункову кваліфікацію надійності закриття клапанів БРУ-А у режимах водного потоку.

Об'єкт дослідження – системи безпеки регулювання тиску в об'ємах парогенераторів ЕУ з реакторами ВВЕР.

Предмет дослідження – кваліфікація надійності БРУ-А системи регулювання тиску в обсягах парогенераторів ЕУ з ВВЕР у запроектованих та екстремальних аварійних умовах

Методи дослідження – ризик-орієнтовані та детерміністські методи моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено детерміністичні методи кваліфікації надійності БРУ-А в екстремальних умовах некваліфікованих режимах експлуатаційних випробувань.
2. Розроблено метод адаптації результатів експериментальної кваліфікації БРУ-А, отриманих на експериментальних установках/стендах, щодо некваліфікованих режимів екстремальних умов у ЕУ ПГ на підставі теорії подібності термодинамічних процесів.

3. Встановлено ймовірнісні оцінки впливу надійності БРУ-А/СРТ ПГ на безпечну експлуатацію ЕУ ПГ в екстремальних умовах критичного сейсмічного впливу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що:

1. На основі отриманих у роботі результатів розроблено проєкти галузевих технічних рішень кваліфікації надійності БРУ-А ЕУ ПГ в екстремальних аварійних умовах.

2. Розроблені методи можуть бути використані при проєктуванні, експлуатації та продовженні експлуатації теплоенергетичного обладнання.

Особистий внесок автора полягає у зборі та аналізі експлуатаційних даних; виконанні розрахункового моделювання аварійних процесів; проведення аналізу результатів розрахункового моделювання; розробці проєктів галузевих технічних рішень щодо кваліфікації надійності БРУ-А в екстремальних аварійних умовах.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на Міжнародних та Всеукраїнських науково-практичних конференціях: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference «Actual problems of personality psychology in the modern world» (April 09 – 12, 2024), Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference. San Francisco, USA. 2023, Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. «Scientific achievements of contemporary society» (October 10-12, 2024), Global trends in science and education. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. (April 7-9, 2025) SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2025.

Публікації. Основні наукові результати дисертаційної роботи викладено в 11 наукових роботах, в тому числі: 3 монографіях, 4 статтях, опублікованих у виданнях, включених до Переліку фахових видань України (всі видання індексуються у міжнародних наукометричних базах даних, зокрема: Index Copernicus International, Ulrich’s Periodicals Directory, Google Scholar та ін.), а також в 4 тезах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури зі 112 найменувань (на 11 сторінках), 26 рисунків та 15 таблиць. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 151 сторінку, в тому числі 122 сторінки основного тексту та 2 Додатки.

РОЗДІЛ 1
ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ТА КОНСТРУКЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ У ПАРОГЕНЕРАТОРАХ
ЕНЕРГОУСТАНОВОК

Система регулювання тиску в обсягах міжконтурного простору парогенераторів (СРД ПГ) ЕУ ПГ складається з:

- швидкодіючих редуційних пристроїв скидання пари в атмосферу та конденсаторів турбоустановки (БРУ-А/БРУ-К),
- запобіжних клапанів ПГ (ПК ПГ).

Основна підсистема СРД ПГ, що забезпечує необхідні функції безпеки керування аваріями - БРУ-А. Підсистеми БРУ-К та ПК ПГ дублюють надійність СРД ПГ у разі відмов БРУ-А.

Далі представлені основні конструкційні та технічні параметри/характеристики БРУ-А [1], необхідні надалі при кваліфікації надійності СРД ПГ забезпечення безпеки ЕУ ПГ у проєктних, запроєктних та екстремальних («жорстких») аварійних умовах. Для транспортування гострої пари від парогенераторів (ПГ) до турбоустановки використовується система паропроводів свіжої пари. Система паропроводів свіжої пари складається з 4-х паралельних магістральних паропроводів свіжої пари, виконаних із безшовних труб $\varnothing 630 \cdot 25$, матеріал – сталь 16ГС, а також із трубопроводів відгалужень та перемичок: $\varnothing 530 \cdot 28$, матеріал – сталь 15ГС; $\varnothing 325 \cdot 10$, матеріал – сталь 20; $\varnothing 219 \cdot 13$, матеріал – сталь 20. Принципова схема системи свіжої пари представлена на рис. 1.1, параметри середовища паропроводів свіжої пари представлені у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри середовища паропроводів свіжої пари [1]

Параметр	Робочі значення	Розрахункові значення
Тиск середовища, кгс/см ²	60	80
Температура середовища, °С	274,3	293,6

Паропроводи свіжої пари з'єднано перемичками Ду500 з кожним з двох парових колекторів. При цьому, обидва парові колектори об'єднано чотирма перемичками Ду300 для підключення швидкодіючої редуційної установки відбору пари на власні потреби (БРУ-СН). Таким чином, паропроводи свіжої пари утворюють кільце високого тиску – головний паровий колектор (ГПК).

Швидкодіючий пристрій скидання пари в атмосферу (БРУ-А) виконує функції регульованого випуску пари в атмосферу. Він використовується для підтримання заданого тиску в парогенераторі або підтримання необхідної швидкості розхолодження. Крім того, пристрій виконує функцію захисту другого контуру від перевищення тиску як у разі відхилень від нормального режиму роботи, так і під час аварійних ситуацій.

Пристрій БРУ-А встановлюється на головному паропроводі парогенератора та використовує ділянку, яка не відключається. При цьому, пристрій БРУ-А є багатофункціональним виконавчим органом.

Витрата пари через БРУ-А при тиску парогенератора 70...73 кгс/см² становить 900 т/год (див. рис. 1.2 – 1.5, табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Висотні позначки ділянок системи свіжої пари [1]

Найменування ділянки трубопроводу	Висотна позначка			
	ПГ-1	ПГ-2	ПГ-3	ПГ-4
Колектор пара парогенератора	34,7	34,7	34,7	34,7
Гермопрохідка	34,52	34,52	34,52	34,52
Вертикальна врізка БРУ-А	31,3	31,3	31,3	31,3

На АЕС України встановлено БРУ-А серій 936-150/250-Е, 960-300/350-Е, 1115-300/350-Е (див. табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Типи БРУ-А АЕС України [1]

Станція/блок Тип	Запорізька АЕС						Рівненська АЕС				Хмельницька АЕС		Південно- українська АЕС		
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	1	2	1	2	3
936-150/250-Е							*	*							
960-300/350-Е	*	*	*						*		*		*	*	*
1115-300/350-Е				*	*	*				*		*			

Технічні характеристики та дані за матеріалами БРУ-А представлені в табл. 1.4 та 1.5 [1].

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики БРУ-А

Найменування параметру		Тип клапану			
		936 - 150/250-Е	960 - 300/350-Е	1115 - 300/350-Е	1465 - 300/359-Е
Розрахункові (максимальні) параметри	тиск, МПа/(кгс/см ²)	7,8/80	7,8/80	7,8/80	7,8/80
	температура, °С	300	300	300	297
Робочі параметри	тиск, МПа/(кгс/см ²)	5,9/60	5,9/60	5,9/60	6,67/68
	температура, °С	275	274,3	274,3	282
Максимальний момент, що крутить, на шпинделі, Н·м		880	3000	3041	625
Потужність електродвигуна, кВт		-	11,8	11,8	7,5
Хід штока, мм		75	120	120	85
Час відкриття електроприводом, с		11	15	15	15
Витрата пари, т/год		200	900	900	900

Примітки до таблиці:

1. Витрата пари вказана при критичному перепаді та робочих параметрах.
2. Час відкриття вказаний за паспортними даними.

Таблиця 1.5 – Матеріали основних деталей БРУ-А

Найменування деталі	Марка сталі		ДСТУ чи ТУ	
	960-300/350- Е	1115-300/350- Е	960-300/350- Е	1115-300/350-Е
Корпус	20ГСЛ	20Ш	ТУ 108-671	ТУ 108-667
Кришка	20ГСЛ	12Х1МФ	ТУ 108-671	ДСТУ 20072 ДСТУ 8479
Сідло	20	20	ДСТУ 1050	ДСТУ 1050 ДСТУ 8479
Голка	08Х18Н10Т	08Х18Н10Т	ДСТУ 5632	ДСТУ 5632 ТУ 108.109.01
Шток	14Х17Н2	14Х17Н2	ДСТУ 5632	ДСТУ 5632-72 ДСТУ 5949-75

Основні конструкційні елементи запірно-дросельного клапану показані на рис. 1.6. Креслення запірно-дросельного клапана серії 960-300/350-Е представлений на рис. 1.7.

Приєднувальні розміри (до трубопроводів) представлені у табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Приєднувальні розміри БРУ-А

Тип	Приєднувальний розмір, мм					
	Н	L	D1	D2	D3	D4
960-300/350-Е	2600	820	290	330	345	377
1115-300/350-Е	2600	820	290	330	345	377

Витратні характеристики запірно-дросельних клапанів серії 960-300/350-Е та 1115-300/350-Е представлені в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Витратні характеристики запірно-дросельних клапанів серії
960-300/350-Е та 1115-300/350-Е

Хід штоку, мм / Витрата, т/год	6	10	15	20	25	30	40	80	90	100	105	110	115	120
960- 300/350-Е	0	10	20	40	60	100	210	670	790	885	915	945	965	990
1115- 300/350-Е	0	10	20	40	60	100	210	670	790	885	915	945	965	990

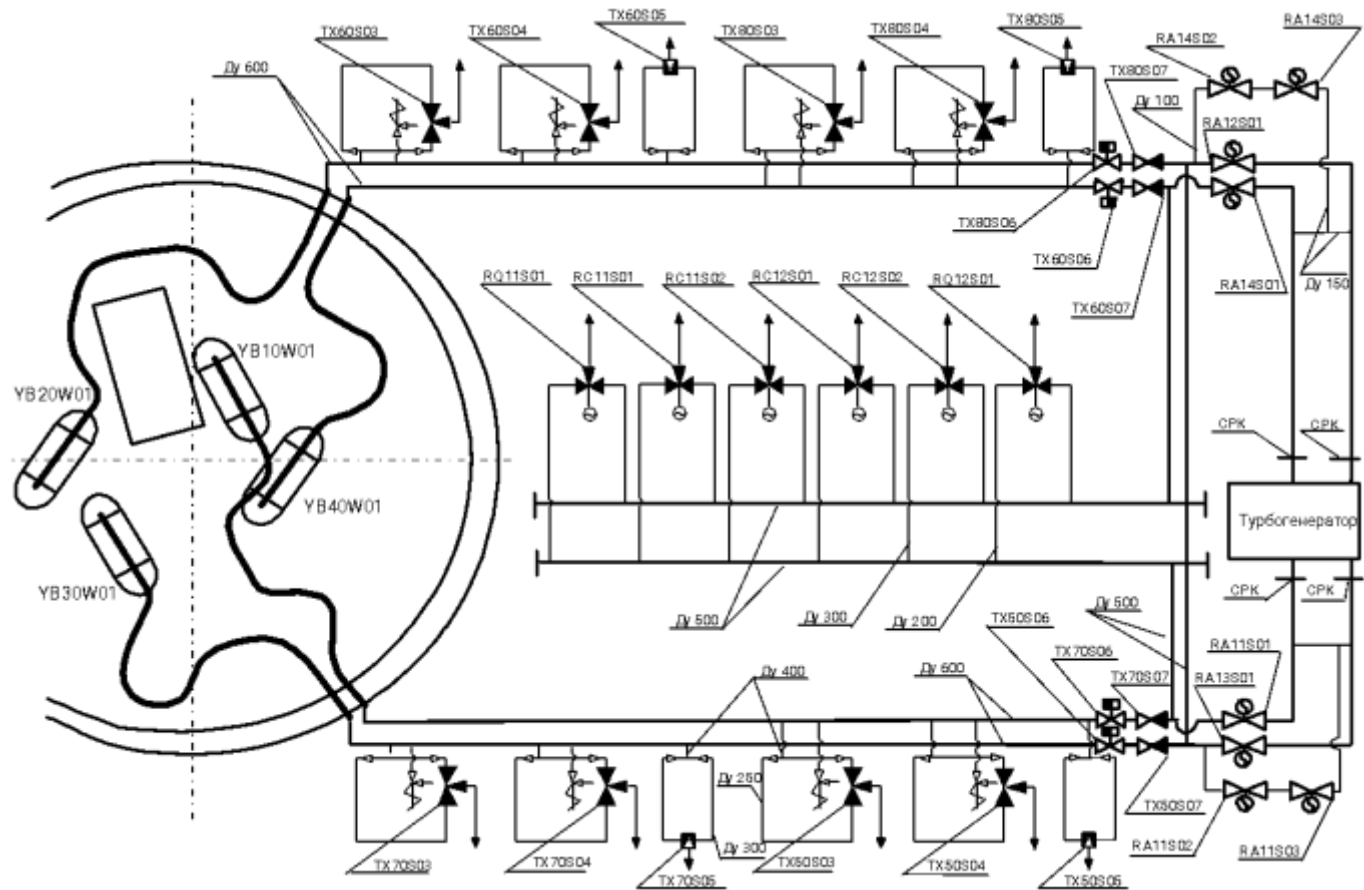


Рисунок 1.1 – Принципова схема системи свіжої пари [1]

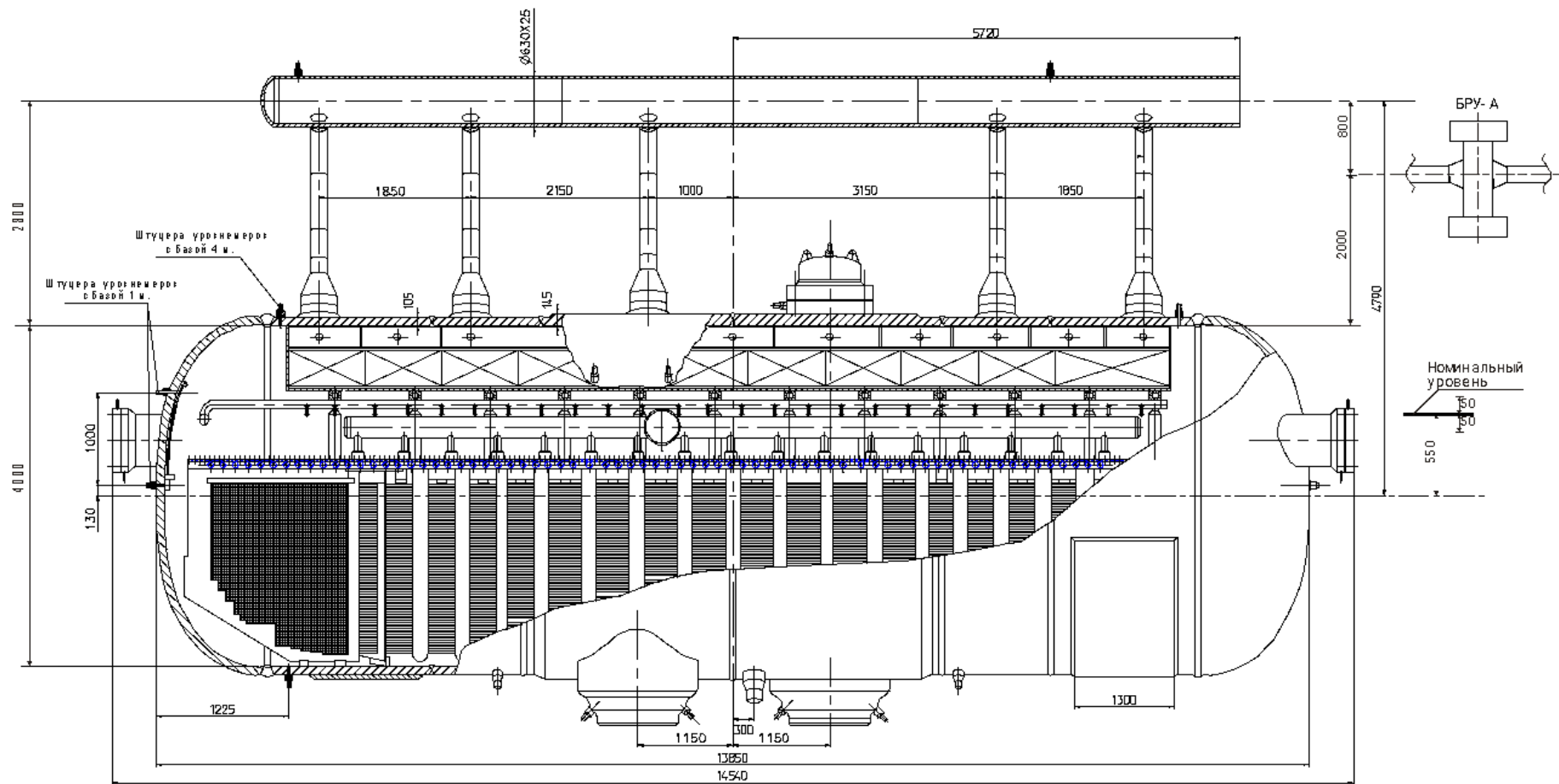
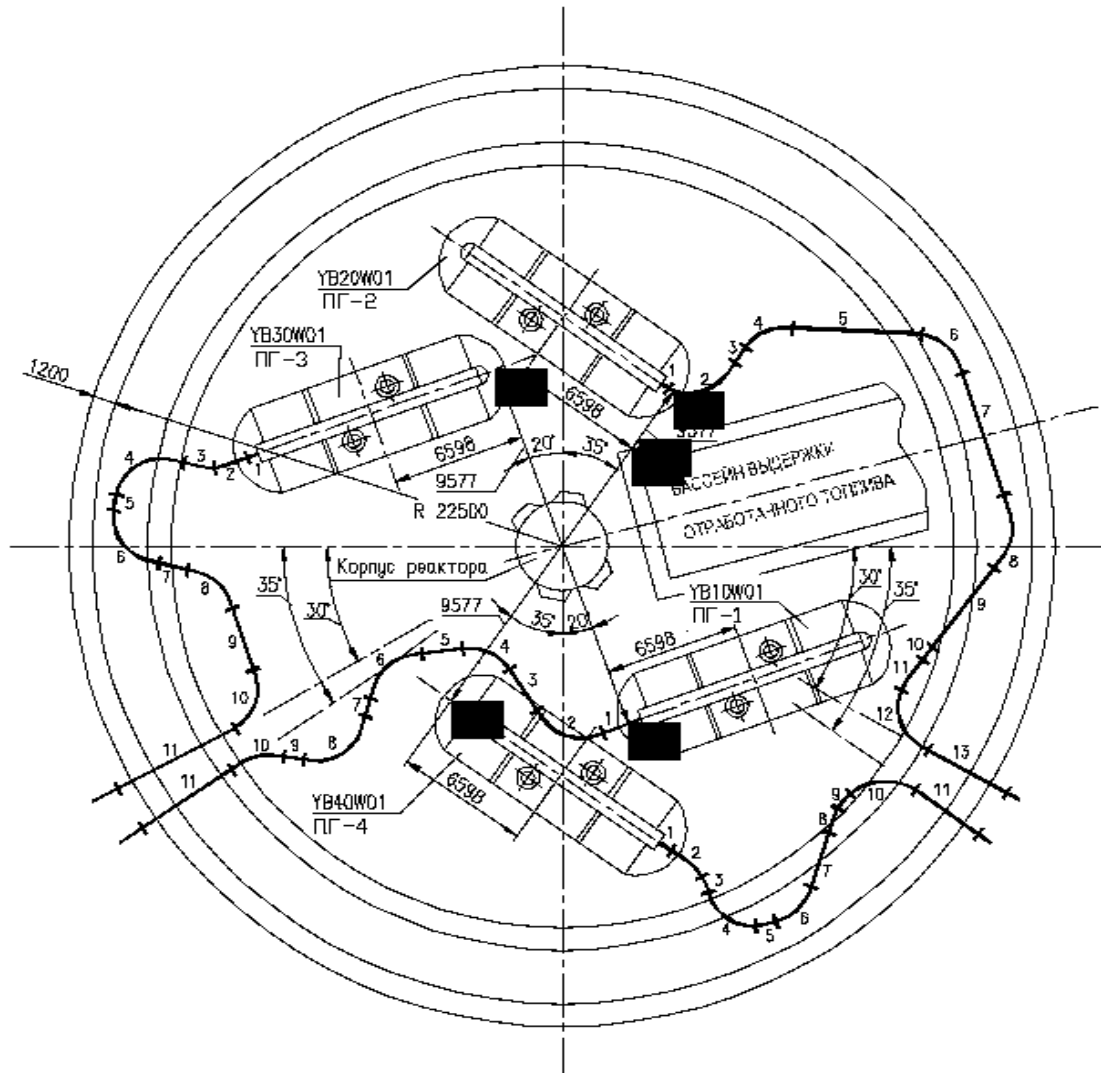


Рисунок 1.2 – Парогенератор ПГВ-1000М (подовжній розріз), компонувальний зв'язок з БРУ-А [1]



ПРИМЕЧАНИЕ:

1. Рисунок выполнен на основании чертежа № 210014.0445327. 40005.000 ТМ 01.
2. Трубопроводы имеют теплоизоляцию.
3. Материал труб - сталь 16 ГС.
4. Отметка коллектора ПГ - 34.700, отметка герметичных проходов - 34.520.

Рисунок 1.3 – Компонувальна схема паропроводів свіжої пари [1]

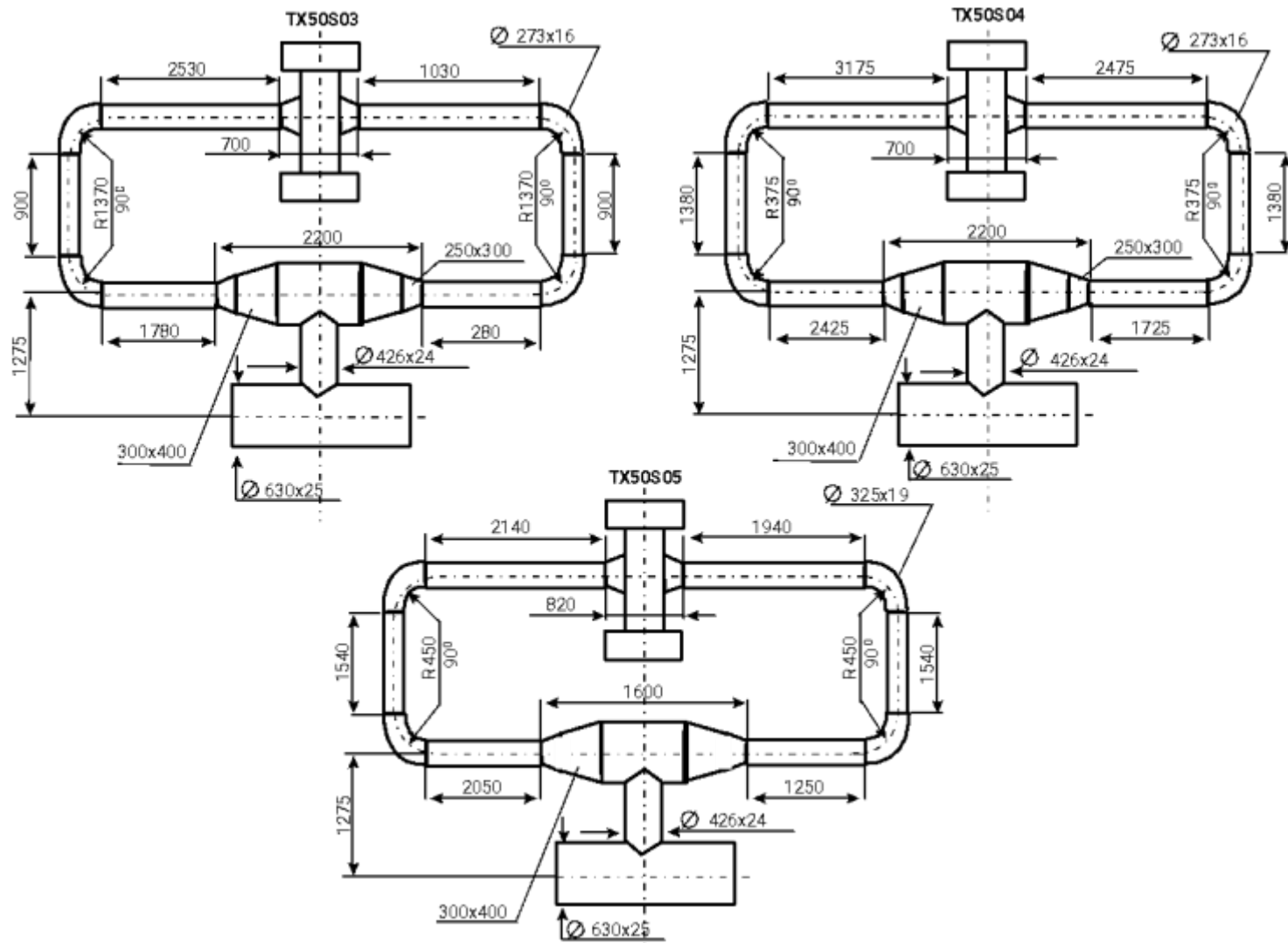


Рисунок 1.5 – Креслення підвідних паропроводів до ПК ПГ і БРУ-А від паропроводу ПГ-1 [1]

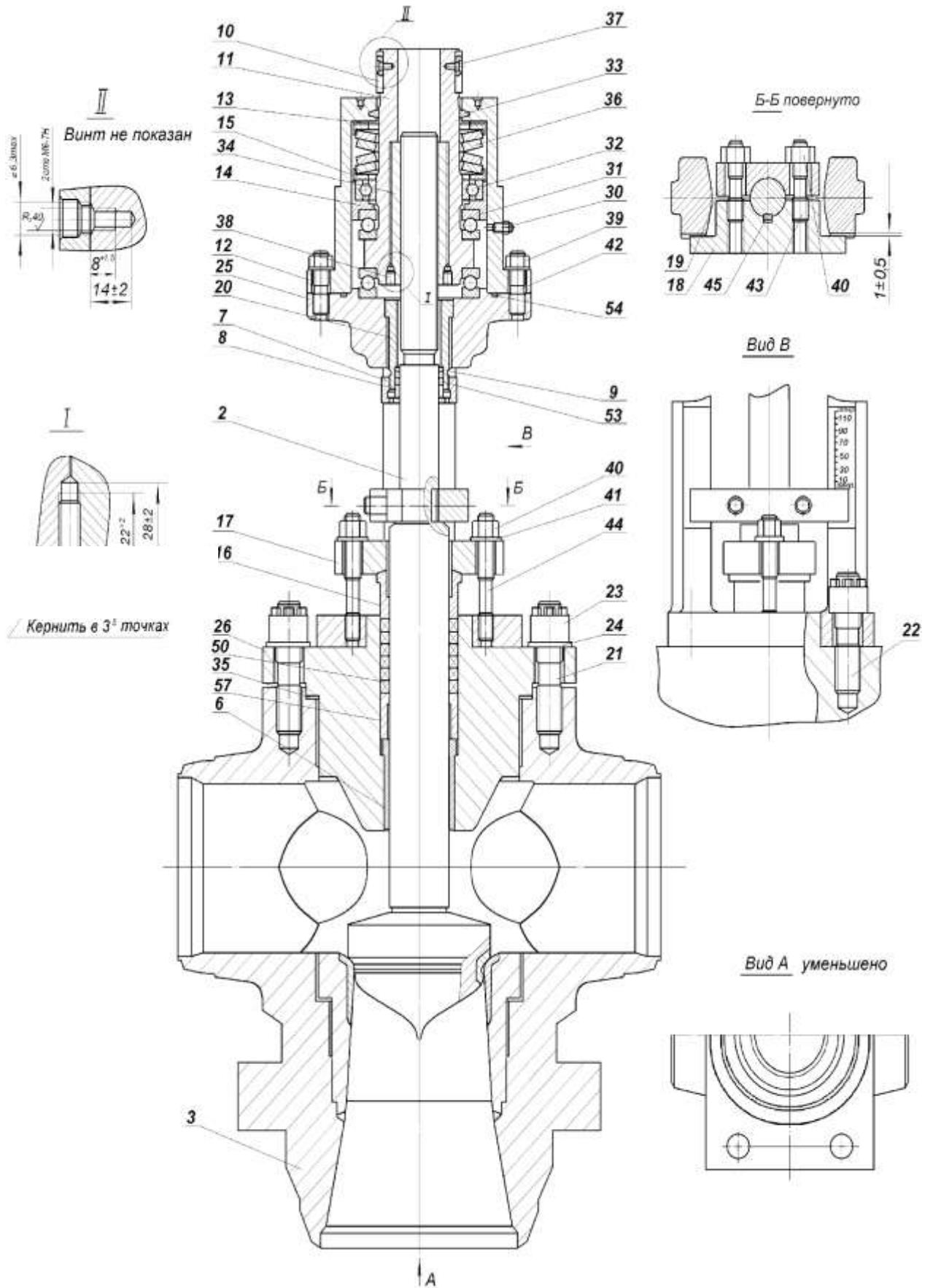


Рисунок 1.6 – Конструкция запирно-дросельного клапана (серия 1115-300/350-Е):

2	Шток у зборі	26	Кришка
3	Корпус	30	Масляна
6	Втулка напрямна	31	Завзятий підшипник
7	Гайка	32	Шарикопідшипник
8	Грундбукса мала	33	Кільце
9	Кільце	34	Втулка різьбова
10	Шпонка	35	Спірально-навіта прокладка
11	Втулка шпинделя	36	Пружина тарілчаста
12	Прокладка регулювальна	37	Гвинт
12	Кришка бугеля	38	Гвинт
14	Повзун	39	Гайка
15	Кільце проміжне	40	Гайка
16	Грундбукса	40	Гайка
17	Планка натискна	41	Шайба
18	Стопорна планка передня	42	Шпилька
19	Стопорна планка задня	43	Шпилька
20	Вставка	44	Шпилька
21	Шпилька	45	Шпонка
22	Шпилька	50	Сальниковий комплект
23	Гайка корончаста	53	Набивання сальникове
24	Шайба	54	Набивання
25	Бугель	57	Підсальникове кільце штоку

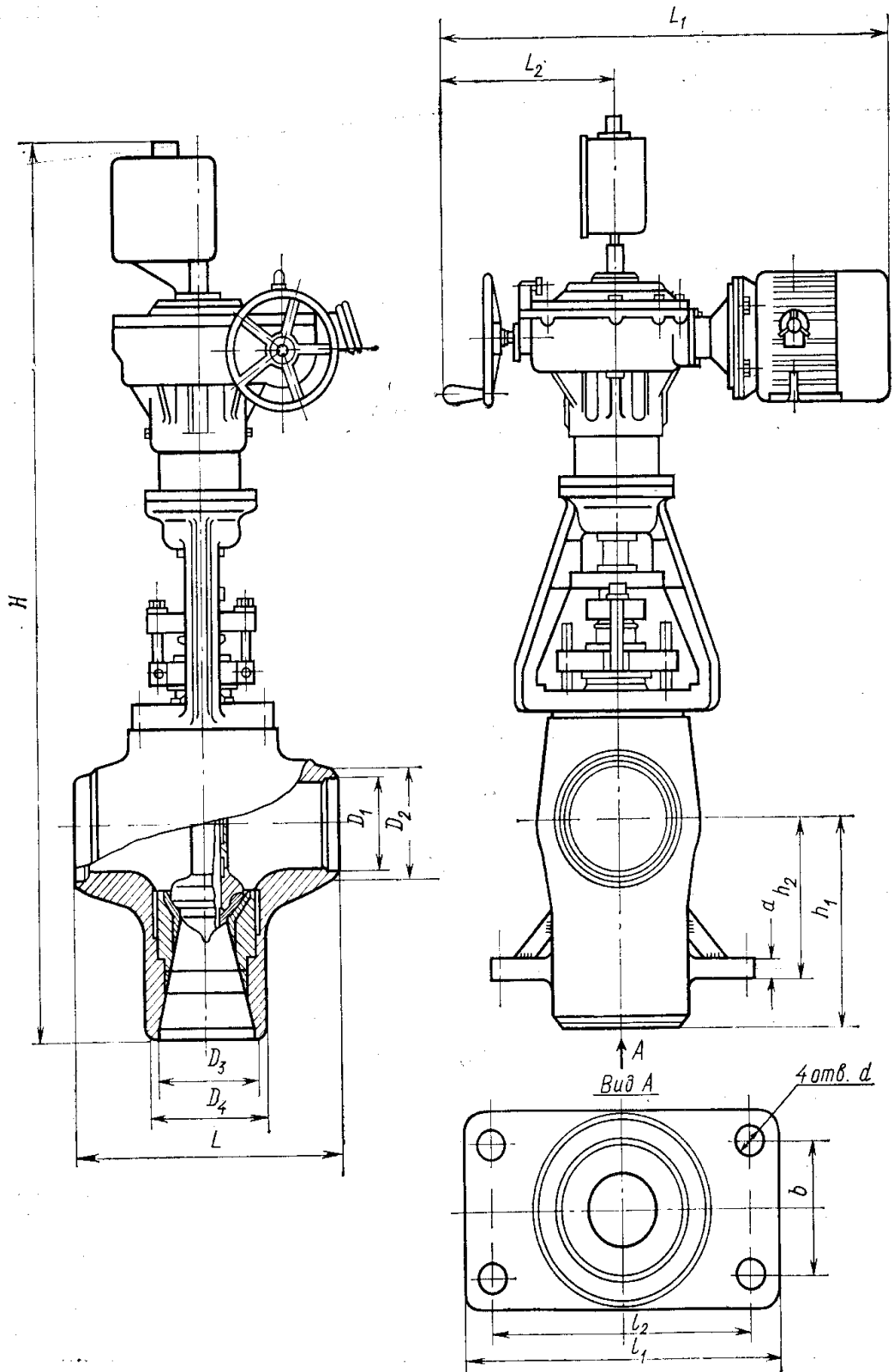


Рисунок 1.7 – Креслення запірно-дросельного клапану серії 960-300/350-Е [1]

Умови безпечної експлуатації БРУ-А:

– перед виведенням реактора на МКУ мають бути працездатні всі чотири БРУ-А;

– при роботі на потужності та несправності одного допускається виведення в ремонт одного клапана на строк до 72 годин з моменту виявлення несправності без попереднього випробування решти трьох БРУ-А, далі блок має бути переведений у «гарячий» стан;

– при роботі на потужності та виявленні несправності в резервованих пристроях управління клапаном допускається виведення в ремонт зазначеного клапана терміном до 24 годин з моменту виявлення несправності без попереднього випробування решти трьох БРУ-А. Якщо несправність згаданих пристроїв не буде усунуто за вказаний термін, то ремонтні роботи можуть бути продовжені до 72 годин з моменту виявлення несправності і якщо при цьому несправність не буде усунена, то блок повинен бути зупинений у плановому порядку та виведений у режим «холодний зупин».

Вихідними подіями, що вимагають роботи БРУ-А, є:

- малі, не компенсовані, течі першого контуру діаметром від 11 до 50 мм;
- малі течі, що компенсуються системою підживлення діаметром менше 1 мм;
- розриви трубопроводів живильної води за межами ГО;
- втрата вакууму в конденсаторі ТГ;
- мала теча з першого контуру до другого контуру;
- середня теча з першого контуру до другого контуру;
- розрив трубопроводів живильної води/пари в межах ГО;
- не ізольований розрив паропроводу за межами гермооболонки між ПГ та БЗОК;
- ізольований розрив паропроводів за межами ГО;
- відмова двох каналів технічної води відповідальних споживачів;
- знеструмлення всіх секцій 6 кВ нормального електропостачання.

Клапани БРУ-А відкриваються таким чином, при якому витрата пари забезпечує сталість тиску 70 кгс/см^2 у парових колекторах парогенераторів.

Якщо під час роботи БРУ-А тиск збільшується, то за тиску 84 кгс/см^2 у парових колекторах відкриваються контрольні запобіжні клапани і за 86 кгс/см^2 - робочі. При зниженні тиску до 70 кгс/см^2 клапани автоматично закриваються.

Якщо аварія пов'язана з несанкціонованим закриттям одного або декількох БЗОК, протікання аварійного режиму відбуватиметься аналогічно вищеописаному.

Якщо аварія пов'язана з частковим або повним скиданням навантаження турбіни, то в перехідному режимі надлишки пари з парогенераторів повинні скидатися в конденсатори турбіни і якщо при цьому є неуспішна робота БРУ-К або є заборона на скидання пари в конденсатори, то в роботу вступає БРУ-А і можливо ШВ ПГ [105].

Критерії успіху щодо БРУ-А:

- відкриття клапана здійснюється при тиску 73 кгс/см^2 ;
- закриття клапана здійснюється при тиску 64 кгс/см^2 ;
- регулятори забезпечують автоматичну підтримку тиску 70 кгс/см^2 або швидкість розхолодження 30 або $60 \text{ }^\circ\text{C/год}$.

У режимі охолодження реакторної установки регулятори забезпечують швидкість охолодження 30 або $60 \text{ }^\circ\text{C/год}$.

Результати аналізу наведені в табл. 1.8.

Таблиця 1.8 – Результати розрахункового аналізу показників

Показник	ООП на закриття 3/4 TX60 (70,80) S05	$2,269 \cdot 10^{-5}$	$6,033 \cdot 10^{-3}$	$1,369 \cdot 10^{-7}$	$6,033 \cdot 10^{-3}$
C-TXN0S05- SDV-E-XBCD	ООП на закриття 2/4 TX60(70) S05	$3,030 \cdot 10^{-5}$	$2,311 \cdot 10^{-5}$	$7,004 \cdot 10^{-10}$	$2,311 \cdot 10^{-5}$
C-TXN0S05- SDV-E-XBXD	ООП на закриття 2/4 TX60(80) S05	$3,030 \cdot 10^{-5}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$	$5,915 \cdot 10^{-10}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$
C-TXN0S05- SDV-E-XXCD	ООП на закриття 2/4 TX 70(80) S05	$3,030 \cdot 10^{-5}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$	$5,915 \cdot 10^{-10}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$
C-TXN0S05- SDV-O-ABCD	ООП на закриття 4/4 БРУ-А	$2,435 \cdot 10^{-4}$	$3,056 \cdot 10^{-3}$	$1,052 \cdot 10^{-6}$	$3,055 \cdot 10^{-3}$
TX50S05- SDV-C	Відмова БРУ-А зміну становища	$1,723 \cdot 10^{-4}$	$1,172 \cdot 10^{-4}$	$2,035 \cdot 10^{-8}$	$1,171 \cdot 10^{-4}$
TX50S05- SDV-E	Відмова БРУ-А на закриття TX50S05	$1,620 \cdot 10^{-3}$	$2,134 \cdot 10^{-4}$	$3,461 \cdot 10^{-7}$	$2,130 \cdot 10^{-4}$
TX50S05- SDV-O	Відмова відкриття	$2,440 \cdot 10^{-3}$	$1,185 \cdot 10^{-4}$	$2,915 \cdot 10^{-7}$	$1,182 \cdot 10^{-4}$
TX60S05- SDV-C	Відмова БРУ-А зміну становища	$1,723 \cdot 10^{-4}$	$1,165 \cdot 10^{-4}$	$2,025 \cdot 10^{-8}$	$1,165 \cdot 10^{-4}$
TX60S05- SDV-E	Відмова БРУ-А на закриття TX60S05	$1,620 \cdot 10^{-3}$	$1,215 \cdot 10^{-4}$	$1,970 \cdot 10^{-7}$	$1,213 \cdot 10^{-4}$
TX60S05- SDV-O	Відмова відкриття	$2,440 \cdot 10^{-3}$	$1,176 \cdot 10^{-4}$	$2,893 \cdot 10^{-7}$	$1,173 \cdot 10^{-4}$
TX70S05- SDV-C	Відмова TX70S05 на зміну положення	$1,723 \cdot 10^{-4}$	$1,172 \cdot 10^{-4}$	$2,035 \cdot 10^{-8}$	$1,171 \cdot 10^{-4}$
TX70S05- SDV-E	Відмова БРУ-А TX70S05 на закриття	$1,620 \cdot 10^{-3}$	$2,133 \cdot 10^{-4}$	$3,459 \cdot 10^{-7}$	$2,129 \cdot 10^{-4}$
TX70S05- SDV-O	Відмова на відкриття	$2,440 \cdot 10^{-3}$	$1,184 \cdot 10^{-4}$	$2,913 \cdot 10^{-7}$	$1,181 \cdot 10^{-4}$
TX80S05- SDV-E	Відмова БРУ-А на закриття TX80S05	$1,620 \cdot 10^{-3}$	$1,216 \cdot 10^{-4}$	$1,972 \cdot 10^{-7}$	$1,214 \cdot 10^{-4}$
TX80S05- SDV-O	Відмова на відкриття	$2,440 \cdot 10^{-3}$	$1,173 \cdot 10^{-4}$	$2,886 \cdot 10^{-7}$	$1,170 \cdot 10^{-4}$
РАЗОМ:			$3,195 \cdot 10^{-2}$	$4,006 \cdot 10^{-6}$	$3,195 \cdot 10^{-2}$

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ АВАРІЙНИХ УМОВАХ

2.1 Аналіз критичності для безпеки системи регулювання тиску парогенераторів у екстремальних аварійних умовах

Умови запроектованих аварій (ЗА) відповідають наступним групам аварій ([1-15, 102 - 104] та інш.):

- проектні з порушенням принципу «одиночної відмови» (ЗА-1);
- не передбачені проектом (запроектовані) ІСА (ЗА-2);
- проектні ІСА з некваліфікованими режимами систем керування аваріями (ЗА-3).

Характерним прикладом та наслідками групи аварій в умовах ЗА-1 може бути «внутрішні» МСА «Повне тривале знеструмлення (ПТЗ) енергоблоків» Фукусімської аварії у 2011 році. Наслідками спільного екстремального зовнішнього впливу запроектованого затоплення проммайданчика АЕС Фукусіма-1 (висота хвилі біля узбережжя понад 14 м) та запроектованого землетрусу (близько 9 балів в епіцентрі) було ІСА ПТЗ енергоблоків з наступними відмовами: системи дизель-генераторів активних і відповідно зони реакторів та басейнів витримки відпрацьованого ядерного палива (БВ ВЯП). Зрештою наслідками цих відмов та помилкових дій персоналу стали ядерні (важкі) та радіаційні аварії в ЕУ та БВ ВЯП АЕС Фукусіма-1, що призвели до екологічної катастрофи.

Основна причина ядерної аварії з частковим руйнуванням ядерного палива на АЕС ТМІ-2 (США, 1979 р.) – також ЗА-1 з відмовою на закриття запобіжного клапана реактора та спочатку помилковими діями оперативного персоналу.

Характерним прикладом умов та наслідків ЗА-2 можуть бути також уроки Фукусімської аварії. Вихідна причина аварії - не передбачені технічним проектом

спільна дія запроектої висоти цунамі біля узбережжя АЕС Фукусіми-1 (за проектними обґрунтуваннями максимальна висота хвилі біля узбережжя не більше 5 м) та запроектного сейсмічного впливу [3]. За заявою експлуатуючої організації ТЕРСО такі екстремальні умови ЗА-2, що виникли, були повною несподіванкою, що в кінцевому підсумку визначило недостатню підготовленість персоналу та технічних засобів з управління аварією.

Характерним прикладом умов та наслідків ЗА 3 можуть бути результати кваліфікації гідродинамічної стійкості насосів СБ ЕУ з ВВЕР в аварійних режимах [16 - 18]. Експериментальна кваліфікація працездатності насосів активних СБ відповідно до Технологічних регламентів безпечної експлуатації (ТРБЕ) ЕУ з ВВЕР здійснюються щомісячно експлуатаційними випробуваннями в робочих режимах реактора та в процесі ППР в умовах замкнутої рециркуляції. На основі цих результатів експериментальної кваліфікації при моделюванні аварій вважається, що активні СБ забезпечують номінальну витрату протягом усієї тривалості аварії. Проте, в аварійних режимах у випадку робота насосів СБ відбувається при істотно змінному протитиску в реакторі/ПГ. У таких аварійних режимах можуть виникнути умови гідродинамічної нестійкості, наслідками яких можуть бути: значні відхилення витрат від номінальних значень, гідродинамічні та термічні удари на корпус і внутрішньокорпусні конструкції реактора/ПГ. Таким чином, відсутність кваліфікації гідродинамічної стійкості насосів СБ в аварійних режимах може суттєво вплинути на результати та висновки експлуатаційних звітів аналізу безпеки (ОАБ) ЕУ з ВВЕР.

СРД ПГ (що включає БРУ-А, БРУ-К, ПК ПГ) експериментально кваліфікована щорічними експлуатаційними випробуваннями на паровому середовищі. Однак, в умовах ЗА можливі режими закінчення в проточних частинах арматури СРД ПГ водяного/пароводяного (двофазного) середовища, які експериментально не кваліфіковані.

Тому виникає невизначеність щодо підтвердження працездатності СРД ПГ (і насамперед БРУ-А) у таких запроектних режимах. Зокрема, відмова на закриття

БРУ-А після відкриття може призвести до:

- не допустимим викидам радіоактивних продуктів у довкілля;
- непоправної втрати теплоносія і т.інш.

Водночас, модернізація чи заміна діючих клапанів потребує значних матеріальних витрат. Тому для оптимізації витрат і дотримуючись принципу ALARA (підвищення безпеки настільки, наскільки це розумно досягнуто з урахуванням технічних, економічних та соціальних факторів), необхідно спочатку вивчити питання про вплив можливої відмови БРУ-А при роботі на водяній/пароводяній середі на загальний рівень безпеки.

Якщо консервативно постулювати обов'язкову відмову БРУ-А при попаданні в нього пароводяної суміші, то ймовірність відмови БРУ-А буде визначатися ймовірністю попадання пароводяної суміші в БРУ-А (переповнення ПГ) з накладенням умов підвищення тиску в паровому колекторі ПГ до уставок відкриття БРУ-А. Оцінку ймовірності виникнення зазначеного сценарію можна провести на основі результатів поглибленого аналізу безпеки АЕС з ВВЕР 1000/В-320 [2, 3] в яких представлено моделювання перебігу аварії з течією з 1-го контуру в 2-й (див. табл. 2.1).

Аналіз результатів розрахункових обґрунтувань було проведено за таких основних припущень:

- переповнення ПГ визначалося за значеннями рівнеміра з базою 4 м при досягненні рівня ПГ значення 4 м;
- момент переповнення ПГ відповідає моменту надходження пароводяної суміші або води до патрубку БРУ-А.
- потрапляння пароводяної суміші або води до БРУ-А можливе при накладенні двох подій:
 - перевищення тиску в паропроводі вище за уставку на відкриття БРУ-А (тиск у паровому колекторі вище 7,3 МПа);
 - переповнення ПГ.

Таблиця 2.1 - Зведена таблиця з результатами аналізу поведінки БРУ-А в аваріях з середньою течією з 1-го контуру в 2-й

№ п/п	Найменування розрахунку	Заклиновання БРУ-А	БРУ-К у роботі	Знеструмлення	Час закриття БЗО К, з	Час відкриття БРУ-А за уставкою, з		Час відкриття БРУ-А на неаварійному ПГ на розхолодження	Час переповнення ПГ, з		Витрата на протікання після 100 з аварії, не більше, т	Загальна тривалість розрахунку, з	Робота БРУ-А на воді	Відкриття/закриття БРУ-А на воді
						на аварійному ПГ	на неаварійному ПГ		аварійного	неаварійного				
1	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 1	Ні	Ні	Ні	55	2500	-	9270	-	-	250	10500	Ні	Ні
2	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 2	Так	Ні	Ні	55	2500	-	-	4400	-	1000	15000	Так	Ні
3	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 3	Так	Ні	Ні	55	560	-	-	2200	-	1000	8000	Так	Ні
4	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 4	Так	Ні	Ні	55	570	-	900	1600	-	1000	14000	Так	Ні
5	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 5	Так	Ні	Ні	55	570	-	1920	1600	-	1000	15000	Так	Ні
6	АПА ЗАЕС-5 сценарій 1	Так	Ні	Так	-	15	16	-	870	-	1657	3600	Так	Ні
8	ВАБ ХАЕС-2 сценарій 1	Так	Так	Ні	0	8	-	-	1130	-	1800	2450	Ні	Ні

№ п/п	Найменування розрахунку	Заклиновання БРУ-А	БРУ-К у роботі	Знеструмлення	Час закриття БЗО К, з	Час відкриття БРУ-А за уставкою, з		Час відкриття БРУ-А на неаварійному ПГ на розхолодження	Час переповнення ПГ, з		Витрата на протікання після 100 з аварії, не більше, т	Загальна тривалість розрахунку, з	Робота БРУ-А на воді	Відкриття/закриття БРУ-А на воді
						на аварійному ПГ	на неаварійному ПГ		аварійного	неаварійного				
9	ВАБ ХАЕС-2 сценарій 2	Ні	Ні	Ні	1800	275 – 2960	1000 – 2960	1800	1000	–	360	50000	Так	Так
10	ВАБ ХАЕС-2 сценарій 2	Ні	Так	Ні	3600	–	–	3600	–	–	864	10000	Ні	Ні
11	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 6	Так	Ні	Ні	–	24	22 - 1220	–	–	–	1000	17893	Ні	Ні
12	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 7	Так	Ні	Ні	–	24	22 - 176	–	–	–	1548	10140	Ні	Ні
13	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 8	Так	Ні	Ні	–	24	–	3000	–	–	1044	20000	Ні	Ні
14	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 9	Так	Ні	Ні	–	24	22 - 1020	–	–	–	1044	20000	Ні	Ні
15	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 10	Так	Ні	Ні	–	24	22 - 176	–	3000	–	900	20300	Так	Ні

№ п/п	Найменування розрахунку	Заклиновання БРУ-А	БРУ-К у роботі	Знеструмлення	Час закриття БЗО К, з	Час відкриття БРУ-А за уставкою, з		Час відкриття БРУ-А на неаварійному ПГ на розхолодження	Час переповнення ПГ, з		Витрата на протікання після 100 з аварії, не більше, т	Загальна тривалість розрахунку, з	Робота БРУ-А на воді	Відкриття/закриття БРУ-А на воді
						на аварійному ПГ	на неаварійному ПГ		аварійного	неаварійного				
16	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 11	Ні	Так	Ні	1800	2360-5000	-	1800	2600	-	720	5000	Так	Так
17	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 12	Ні	Так	Ні	900	4150	-	-	-	-	720	8000	Ні	Ні
18	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 13	Ні	Так	Ні	900	1780 - 10900	-	-	2480	-	396	13600	Так	Так
19	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 14	Ні	Ні	Ні	30	32, 4844 - 11000	32 – 5250	10750	-	10700	900	12500	Так	Ні
20	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 15	Так	Ні	Ні	30	32	33	-	1000	-	1548	17390	Так	Ні
21	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 16	Так	Ні	Ні	30	34	34	1800	1050	4400	1548	10000	Так	Ні
22	ВАБ ЗАЕС-5	Так	Ні	Ні	180	34	35	1800	50	-	540	9000	Так	Ні

№ п/п	Найменування розрахунку	Заклиновання БРУ-А	БРУ-К у роботі	Знеструмлення	Час закриття БЗО К, з	Час відкриття БРУ-А за уставкою, з		Час відкриття БРУ-А на неаварійному ПГ на розхолодження	Час переповнення ПГ, з		Витрата на протікання після 100 з аварії, не більше, т	Загальна тривалість розрахунку, з	Робота БРУ-А на воді	Відкриття/закриття БРУ-А на воді
						на аварійному ПГ	на неаварійному ПГ		аварійного	неаварійного				
	Сценарій 17				0							0		
23	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 18	Так	Ні	Ні	20	30	32	14400	2500	-	1116	17350	Так	Ні
24	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 19	Так	Ні	Ні	-	22	25 – 93	-	2400	-	1470	37200	Так	Ні
25	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 20	Так	Ні	Ні	-	22	25 – 93	-	1750	-	1470	16390	Так	Ні
26	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 21	Так	Ні	Ні	-	22	25 – 93	2700	3000	-	1470	42470	Так	Ні
27	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 22	Ні	Ні	Так	-	-	15	-	1300	-	1550	28052	Ні	Ні
28	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 23	Ні	Ні	Ні	909	-	-	609	600	1500	1080	8920	Так	Ні

№ п/п	Найменування розрахунку	Заклинювання БРУ-А	БРУ-К у роботі	Знеструмлення	Час закриття БЗОК, з	Час відкриття БРУ-А за уставкою, з		Час відкриття БРУ-А на неаварійному ПГ на розхолодження	Час переповнення ПГ, з		Витрата на протікання після 100 з аварії, не більше, т	Загальна тривалість розрахунку, з	Робота БРУ-А на воді	Відкриття/закриття БРУ-А на воді
						на аварійному ПГ	на неаварійному ПГ		аварійного	неаварійного				
29	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 24	Ні	Ні	Так	909	-	18	609	-	1100	1080	8153	Так	Ні
30	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 25	Ні	Ні	Так	-	-	16	609	1000	1000	1260	3243	Так	Ні
31	ВАБ ЗАЕС-5 Сценарій 26	Ні	Ні	Ні	906	-	-	606	1125	-	27000	1500	Ні	Ні

Примітки до таблиці:

- Під роботою БРУ-А на воді мається на увазі витікання пароводяної суміші як через БРУ-А, відкрите під впливом пароводяної суміші, так і при вже відкритому БРУ-А. Так, при постулюванні заклинювання БРУ-А завжди спостерігається переповнення аварійного ПГ і, хоча тиск у такому аварійному ПГ нижче уставок закриття БРУ-А, через заклинений БРУ-А відбуватиметься закінчення пароводяної суміші.
- Під відкриттям/закриттям БРУ-А на воді мається на увазі ситуація із накладенням:
тиску відкриття ПГ 72 кгс/см² (або при відкритому положенні БРУ-А тиску закриття БРУ-А 68 кгс/см²);
переповнення відповідного ПГ (рівень 4 м за рівнем із базою 4 м).
- Під часом закриття БЗОК мається на увазі тривалість від початку аварії до закриття БЗОК аварійного ПГ.

Послідовність зазначених вище двох подій може бути різною:

– спочатку переповнюється ПГ, потім зростає тиск до уставки спрацьовування БРУ-А – клапан спрацьовує під впливом пароводяного середовища;

– спочатку відбувається зростання тиску в паровому колекторі до уставок спрацьовування БРУ-А (клапан спрацьовує під впливом пари), а потім відбувається переповнення ПГ, при параметрах середовища вище тиску закриття БРУ-А.

Як у першому, так і в другому випадку гіпотетично при аналізі розглядається вплив витікаючої пароводяної суміші, що призводить до відмови БРУ-А, який знаходиться у відкритому стані та його заклинювання у відкритому стані.

До основних факторів, що впливають на тиск і рівень аварійного ПГ можна віднести наступне:

1) можливість використання БРУ-К (відкриття БРУ-К при 6,8 МПа) запобігає відкриття БРУ-А (відкриття БРУ-А за 7,3 МПа);

2) підвищення тиску у 2 контурі при тривалій роботі трьох каналів САОЗ ВД на 1 контур;

3) переповнення аварійного ПГ можливе за рахунок протікання з одного контуру;

4) переповнення аварійного ПГ можливе за рахунок подачі живильної води до ПГ у разі накладення наступних подій:

5) відмова регуляторів на лінії подачі живильної води, які повинні закритися при перевищенні максимально допустимого рівня ПГ;

6) невиконання дій персоналу щодо ізоляції аварійного ПГ.

Використання БРУ-К з підтримки тиску ПГ можливе тільки, коли БЗОК відповідного ПГ відкритий. У нормальних умовах експлуатації БЗОК знаходиться у відкритому положенні.

Автоматичне закриття БЗОК відбувається при збігу наступних сигналів:

– різниця між поточною температурою 2-го контуру та температурою насичення при даному тиску дорівнює або більше 75 °С;

- температура 1-го контуру понад 200 °С;
- тиск в одному або кількох ПГ менше 4,9 МПа.

Ці уставки відповідають умовам розриву трубопроводів 2-го контуру і не реалізуються при протіканні з першого контуру в другий. Ручне закриття БЗОК оператором для аварії «Плин 1-го контуру в 2-й» прописано в ІЛА. Таким чином, у початковий період аварії підтримувати тиск нижче за уставки спрацьовування можливо, використовуючи БРУ-К. Після початку розхолодження через БРУ-А непошкоджених ПГ та зниження тиску в 1-му контурі до 7,0 МПа оператор повинен закрити БЗОК на пошкодженому ПГ, після чого БРУ-К не може запобігти можливому зростанню тиску у пошкодженому ПГ. Регулятори системи аварійної живильної води (АПЕН) TX11S05, TX21S02, TX22S02, TX12S05, TX13S05, TX31S02, TX32S02, TX14S05 підтримують номінальний рівень ПГ. Закриття відповідних регуляторів відбувається за фактом підвищення рівня ПГ більше за 2,35 м.

Регулятори системи допоміжної живильної води (ВПЕН) реалізують блокування підвищення рівня ПГ до першої межі. При підвищенні рівня ПГ до 530 мм регулятор закриває основний і пусковий РПК і засувку, при відновленні рівня до 450 мм РПО включається в роботу на підтримку рівня і засувка відкривається. Дія блокувань підвищення рівня зберігається незалежно від включення/вимкнення РПО.

Таким чином, можливе переповнення аварійного ПГ може бути пов'язане з неізоляцією аварійного ПГ по живильній воді. Відмова регуляторів на лініях подачі живильної води (відмова на закриття при перевищенні допустимого рівня ПГ) сприяє переповненню ПГ.

При виконанні аналізу аварії з течією з 1-го контуру до 2-го з точки зору відкриття/закриття БРУ-А на пароводяній суміші встановлено, що витікання через БРУ-А пароводяної суміші можливе за умови переповнення ПГ та за:

- 1) перевищення уставок на відкриття БРУ-А;

2) примусове відкриття БРУ-А оператором (наприклад, переведення БРУ-А в режим розхолодження);

3) заклинювання БРУ-А у відкритому стані при спрацьовуванні на парі.

В рамках даного дослідження необхідно визначити сценарії надходження пароводяної суміші при тиску вище тиску спрацьовування БРУ-А “уставці” спрацьовування. Тому надалі докладно буде розглянуто лише перший випадок із закінченням пароводяної суміші через БРУ-А. Системи та дії персоналу, які призводять до такого закінчення, будемо надалі називати критичними.

У найзагальнішому вигляді сценарій аварії з течією з 1-го контуру по 2-й можна подати у вигляді наступної послідовності:

- 1) поява течі з 1-го контуру в 2-ий, Ду100;
- 2) спрацювання аварійного захисту реактора (автоматично);
- 3) спрацювання БРУ-К (автоматично, за тиском у ЦПК понад 68 кгс/см²).

Якщо БРУ-К непрацездатно, то спрацьовує БРУ-А (автоматично, за тиском у ПГ понад 73 кгс/см²);

- 4) включення ВПЕН (автоматично, за фактом відключення ТПН);
- 5) включення САОЗ ВД, САОЗ НД (автоматично, сигналом $dt_s < 10$ °С);
- 6) проведення оператором ізоляції аварійного ПГ з живильної води;
- 7) відкриття оператором БРУ-А не аварійних ПГ (режим розхолодження);
- 8) закриття оператором БЗОК не аварійних ПГ і потім БЗОК аварійного ПГ

(відповідно до вимог ІЛА). При цьому БРУ-К стають недоступними.

Відповідно до вимог ІЛА оператор повинен закрити БЗОК на пошкодженому ПГ після зниження тиску в 1 контурі до 70 кгс/см². До закриття БЗОК тиск у 2 контурі може підтримуватися за допомогою БРУ-К (відкриття БРУ-К при 68 кгс/см²);

9) переведенням оператором насосів САОЗ ВД на рециркуляцію (при досягненні рівня КД 8000 мм).

Аналіз теплогідравлічних розрахунків з погляду впливу виконання ФБ виникнення пароводяного режиму закінчення через БРУ-А наведений у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Аналіз теплогідравлічних розрахунків з погляду впливу виконання ФБ на виникнення пароводяного режиму закінчення через БРУ-А

№ п/п	Код розрахунку	Заклинювання БРУ-А	Робота БРУ-А на воді	Відкриття/закриття БРУ-А на воді	Функції безпеки відповідно до умов теплогідравлічного розрахунку				Кінцевий стан активної зони
					доступність БРУ-К	ізоляція ПГ по живильній воді	відключення САОЗ ВД	розхолодження за 2-м контуром	
1	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 1	Ні	Ні	Ні	-	.	.	.	ОК
2	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 2	Так	Так	Ні	-	.	.	.	ОК
3	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 3	Так	Так	Ні	-	.	-	.	ОК
4	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 4	Так	Так	Ні	-	.	-	.	CD
5	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 5	Так	Так	Ні	-	.	-	.	CD
6	АПА ЗАЕС-5 сценарій 1	Так	Так	Ні	-	.	-	.	ОК
8	ВАБ ХАЕС-2 сценарій 1	Так	Ні	Ні	.	.	-	.	CD
9	ВАБ ХАЕС-2 сценарій 2	Ні	Так	Так	-	-	.	.	CD
10	ВАБ ХАЕС-2 сценарій 3	Ні	Ні	Ні	ОК
11	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 6	Так	Ні	Ні	-	-	-	.	CD
12	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 7	Так	Ні	Ні	-	.	.	.	CD
13	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 8	Так	Ні	Ні	-	.	.	.	ОК
14	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 9	Так	Ні	Ні	-	.	.	.	ОК
15	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 10	Так	Так	Ні	-	.	-	.	CD
16	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 11	Ні	Так	Так	.	.	-	.	ОК
17	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 12	Ні	Ні	Ні	.	-	-	-	CD
18	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 13	Ні	Так	Так	.	-	.	-	CD
19	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 14	Ні	Так	Ні	-	.	.	.	ОК
20	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 15	Так	Так	Ні	-	.	-	.	CD

№ п/п	Код розрахунку	Заклинювання БРУ-А	Робота БРУ-А на воді	Відкриття/закриття БРУ-А на воді	Функції безпеки відповідно до умов теплогідравлічного розрахунку				Кінцевий стан активної зони
					доступність БРУ-К	ізоляція ПГ по живильній воді	відключення САОЗ ВД	розхолодження за 2- м контуром	
21	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 16	Так	Так	Ні	-	·	-	·	ОК
22	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 17	Так	Так	Ні	-	·	-	·	ОК
23	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 18	Так	Так	Ні	-	·	-	·	ОК
24	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 19	Так	Так	Ні	-	-	-	·	CD
25	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 20	Так	Так	Ні	-	·	-	·	CD
26	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 21	Так	Так	Ні	-	·	-	·	CD
27	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 22	Ні	Ні	Ні	-	-	-	·	CD
28	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 23	Ні	Так	Ні	-	·	·	·	ОК
29	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 24	Ні	Так	Ні	-	·	·	·	ОК
30	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 25	Ні	Так	Ні	-	·	·	·	ОК
31	ВАБ ЗАЕС-5 сценарій 26	Ні	Ні	Ні	-	·	·	·	ОК

Примітки до таблиці:

1. Символ «>» означає виконання відповідної ФБ. Символ "-" означає невиконання відповідної ФБ.
2. Під неізоляцією по живильній воді мається на увазі відмова автоматики, яка перешкоджає підвищенню рівня в ПГ (наприклад, у розрахунку постульоване, що РППО-1 повністю відкритий).

На початковій фазі аварії високий тиск у 2-му контурі (на рівні спрацьовування БРУ-А) пов'язаний з перехідним процесом (закриття СК ТГ, відключення ТПН), течією з 1-го контуру по 2-й та високими залишковими тепловиділеннями в активній зоні. На цьому етапі критичними є БРУ-К та дії оператора щодо ізоляції аварійного ПГ по живильній воді. У разі відмови

регуляторів живильна вода подаватиметься до аварійного ПГ аж до його переповнення, а при відмові БРУ-К відбудеться відкриття БРУ-А.

Таким чином, на першій стадії аварії критичними є:

- функціональна відмова БРУ-К за функцією підтримки тиску за 2-м контуром або знеструмленням, внаслідок якого БРУ-К стає непрацездатним;
- ізоляція аварійного ПГ по живильній воді (включаючи дії оператора, відмови регуляторів та автоматики).

На наступній фазі аварії критичною є своєчасна організація відведення тепла за другим контуром через БРУ-А не аварійних ПГ. При цьому важливим моментом залишається факт ізоляції аварійного ПГ по живильній воді. У разі не ізоляції аварійного ПГ відбувається його переповнення, а відсутність відведення тепла по 2-го контуру через БРУ-А не аварійних ПГ може призвести до зростання тиску в 2-му контурі вище уставок спрацьовування БРУ-А. Якщо виконана ізоляція ПГ по живильній воді (навіть без розхолодження), то немає переповнення аварійного ПГ; якщо виконано розхолодження (навіть без ізоляції), то немає зростання тиску вище уставок спрацьовування БРУ-А.

Таким чином, на другій стадії аварії критичними є:

- ізоляція аварійного ПГ по живильній воді (включаючи дії оператора, відмови регуляторів та автоматики);
- відведення тепла по 2-му контуру в режимі розхолодження через БРУ-А не аварійних ПГ (включаючи дії оператора, відмови БРУ-А, АПЕН, ВПЕН та автоматики).

На пізній стадії після створення стоянкової концентрації борної кислоти в 1 контурі оператор повинен контролювати зростання рівня в КД і вчасно перевести насоси САОЗ ВД на рециркуляцію. У разі непереведення (невчасного переведення) САОЗ ВД на рециркуляцію відбувається:

- повне заповнення КД та починається зростання тиску в 1-му контурі;
- зі зростанням тиску в 1-му контурі збільшується витрата на протікання (у 2-й контур), зростає рівень в аварійному ПГ, можливо, аж до його переповнення;

– підвищення тиску в 1-му контурі вище уставок спрацьовування БРУ-А.

Таким чином, на пізній стадії аварії критичним є управління тиском 1-го контуру для недопущення відкриття БРУ-А (забезпечується дією оператора за своєчасним переведенням САОЗ ВД на рециркуляцію і, при необхідності, відкриттям арматур системи аварійного газовидалення YR).

Дерево подій, яке моделює можливі сценарії спрацьовування БРУ-А на пароводяній суміші при аварії з течією 1-го контуру у 2-й, представлено на рис. 2.1.

Далі наведено опис аварійних послідовностей, що призводять до спрацьовування БРУ-А на пароводяній суміші (у дереві подій дані кінцеві події позначені VB).

Аварійна послідовність (АП) № 2 являє собою послідовність, при якій відбулася відмова ФБ щодо управління тиском 1-го контуру. При цьому сценарії незалежно від ізоляції ПГ та організації розхолодження (БРУ-К недоступне через закриття БЗОК оператором) відбувається зростання тиску в 1 контурі, що призводить до переповнення аварійного ПГ та відкриття БРУ-А аварійного ПГ.

АП № 4 відповідає випадку, коли не відбулася ізоляція аварійного ПГ по живильній воді (приводить до переповнення ПГ) і немає розхолодження по 2-му контуру (приводить до зростання тиску 2-го контуру до уставок спрацьовування БРУ-А), що призводить до відкриття БРУ-А аварійного ПГ.

АП № 6 відповідає випадку, коли не відбулася ізоляція аварійного ПГ по живильній воді (приводить до переповнення ПГ), а БРУ-К непрацездатна через знеструмлення або функціональну відмову (приводить до зростання тиску 2-го контуру до уставок спрацьовування БРУ-А), що призводить до відкриття БРУ-А), що призводить до відкриття БРУ-А.

На основі проведеного аналізу можливих аварійних сценаріїв у ЕУ з ВВЕР-1000 встановлено, що виникнення запроєктних режимів витікання води/порівневого середовища через БРУ-А можливе за:

- відмови функції безпеки з управління тиском 1-го контуру в процесі аварії;
- відмові ізоляції підживлення аварійного ПГ та відмові БРУ-К.

2.2. Ймовірнісні показники впливу надійності БРУ-А на енергоустановки з парогенераторами в екстремальних умовах

Основні положення та припущення.

1) Аналіз проводиться на підставі фінальної моделі та результатів ВАБ першої фази першого рівня для внутрішніх ІСА ЗАЕС-5 (ВВЕР-1000-320).

2) Оцінка частоти виникнення необхідного сценарію проводиться для ІСА Т42 «Середня течя з першого до другого контуру (відрив кришки холодного колектора ПГ)».

3) Аналіз проводиться на підставі фінальної моделі та результатів ВАБ першої фази першого рівня для внутрішніх ІСА ЗАЕС-5 (ВВЕР-1000-320).

4) Оцінка частоти виникнення необхідного сценарію проводиться для ІСА Т42 «Середня течя з першого до другого контуру (відрив кришки холодного колектору ПГ)».

5) Відмова БРУ-К можлива як через відмову самого БРУ-К та елементів, що входять до кордонів БРУ-К, так і через відмову в системах, що забезпечують, і через знеструмлення власних потреб енергоблоку АЕС. Як модель оцінки ймовірності відмови БРУ-К прийнято функціональне дерево відмови (ФДО), представлене у ВАБ ЗАЕС-5 «Управління тиском лругого контуру» (Т42-Е2-1).

6) Ймовірність виникнення знеструмлення визначається за частотою вихідної події аварії (ІСА) Т1 «Знеструмлення всіх секцій 6 кВ нормального електропостачання». Прийнято, що накладення знеструмлення критично протягом усього інтервалу аварії, який у ВАБ приймається консервативно рівним 24 год.

7) Відмова від ізоляції ПГ по живильній воді можлива:

– або через відмову засувки на лінії основної та аварійної живильної води (як через відмову самих засувки, так і через відмову в системах, що забезпечують);

– або через помилку персоналу, пов'язану з невиконанням дій щодо ізоляції аварійного ПГ, які прописані в МЕР.

Як модель прийнято ФДО, представлене у ВАБ ЗАЕС-5 «Ізоляція аварійного парогенератора по живильній воді» (Т42-Р2).

8) Розхолодження по 2-му контуру повинно здійснюватися через БРУ-А з підживленням ПГ від АПЕН або ВПЕН. Як модель прийнято ФДО, представлене у ВАБ ЗАЕС-5 «Відведення тепла по 2-му контуру в режимі охолодження» (Т42-Е1Е3).

9) Забезпечення тиску в 1-му контурі нижче тиску спрацьовування БРУ-А на пізній стадії аварії забезпечується діями оператора щодо своєчасного переведення САОЗ ВД на рециркуляцію та періодичним відкриттям арматури системи аварійного парогазовидалення УР. Як модель прийнято ФДО, представлене у ВАБ ЗАЕС-5 «Управління тиском першого контуру для недопущення відкриття ПСУ» (Т42-Г2-2).

10) При реалізації аварійних послідовностей, позначених у дереві подій як VB, створюються умови для спрацьовування БРУ-А на пароводяній суміші. Консервативно передбачається, що обов'язково відбувається заклинювання БРУ-А у відкритому стані.

Результати розрахунків

Розрахунки проводяться використовуючи відповідні моделі та вбудовані функції SAPHIRE.

Розрахунок за ФДМ «Управління тиском другого контуру» (Т42-Е2-1) дав наступний результат $P_{упр} = 4,6 \cdot 10^{-2}$.

Розрахунок за ФДН «Ізоляція аварійного ПГ по живильній воді» (Т42-Р2) дав наступний результат $P_{и} = 1,487 \cdot 10^{-3}$.

Розрахунок по ФДО «Відведення тепла за 2-м контуром у режимі розхолодження» (Т42-Е1Е3) дав наступний результат $P_{розх} = 4,643 \cdot 10^{-2}$.

Розрахунок по ФДН «Управління тиском першого контуру для недопущення відкриття ПСУ» (Т42-Г2-2) дав наступний результат $P_{ТQ13} = 1,273 \cdot 10^{-1}$.

Ймовірність виникнення знеструмлення за інтервал, що становить 24 год оцінюється за виразом:

$$P_{06} = 1,2 \cdot 10^{-4} \quad (2.1)$$

Підставивши значення частоти ІСА Т1 «Знеструмлення всіх секцій 6 кВ нормального електропостачання» $\lambda_{T1} = 4,27 \cdot 10^{-2}$ 1/рік (2.1), отримаємо $P_{06} = 1,169 \cdot 10^{-4}$.

Ймовірність відмови БРУ-К, у тому числі і через знеструмлення, представлено «деревом подій» на рис. 2.1.

ІСА Т42	Функціональна відмова БРУ-К або знеструмлення	Ізоляція аварійного ПГ з живильної води	Відведення тепла по 2-му контуру в режимі розхолодження	Управління тиском 1-го контуру для недопущення відкриття ПСУ	№ аварійної послідовності, кінцевий стан	Обґрунтовуючий теплогідравлічний розрахунок	ППАЗ _{АП} , 1/рік
Т42	Т42-Е2-1 та р(Т1)	Т24-Р2	Т42-Е2Е3	Т42-Г2-2			
$\lambda_{Т42} = 4 \cdot 10^{-3}$ 1/рік	$P_{\text{БРУ-К}} = 4,611 \cdot 10^{-2}$	$P_i = 1,487 \cdot 10^{-3}$	$P_{\text{расх}} = 4,643 \cdot 10^{-2}$	$P_{\text{ТQ13}} = 1,273 \cdot 10^{-1}$			

1	OK	10	
2	VB	16	$5,092 \cdot 10^{-4}$
3	OK		
4	VB	18	$2,762 \cdot 10^{-7}$
5	OK	1, 19, 31	
6	VB	9	$2,743 \cdot 10^{-7}$

Рисунок 2.1 – Дерево подій «Збіг пароводяної суміші через БРУ-А при ІСА Т42

$$P_{\text{БРУ-К}} = 1 - (1 - P_{\text{упр}})(1 - P_{\text{про}}). \quad (2.2)$$

Умовна ймовірність виникнення сценаріїв зі спрацьовуванням БРУ-А на пароводяній суміші (за умови реалізації ІСА Т42) складе:

$$P_{\text{вода}} = 1 - (1 - \text{РАП2})(1 - \text{РАП4})(1 - \text{РАП6}), \quad (2.3)$$

Підставивши ймовірність реалізації окремих АП, отримаємо

$$P_{\text{вода}} = 1,274 \cdot 10^{-1}.$$

Ймовірність спрацьовуванням БРУ-А на пароводяній суміші (за умови реалізації ІСА Т42) та за умови виконання ФБ з управління тиском 1-го контуру складе:

$$P_{\text{вода}}(\text{РТQ13}=0) = 1 - (1 - \text{РАП4})(1 - \text{РАП6}).$$

Підставивши ймовірність реалізації окремих АП, отримаємо

$$P_{\text{вода}}(\text{РТQ13}=0) = 1,376 \cdot 10^{-4}.$$

Частота ІСА Т42 «Середня теча з 1-го до 2-го контуру (відрив кришки холодного колектора ПГ)» складатиме $\lambda_{\text{T42}} = 4 \cdot 10^{-3}$ 1/год.

Частота виникнення режимів зі спрацьовуванням БРУ-А на пароводяній суміші становитиме:

$$\text{ППАЗ}_{\text{БРУ-А}} = \lambda_{\text{T42}} \text{РАП2} + \lambda_{\text{T42}} \text{РАП4} + \lambda_{\text{T42}} \text{РАП6} \quad (2.4)$$

Підставивши в (2.4) відповідні значення, отримаємо:

$$\text{ЧПАЗ БРУ-А} = 5,098 \cdot 10^{-4} \text{ 1/рік.}$$

Аналіз основних складових

Основною складовою виникнення сценаріїв зі спрацюванням БРУ-А на пароводяній суміші при ІСА Т42 є помилка персоналу «РДП і МД Управління тиском 1-го контуру» (НЕР2-Т42-1YRTQ-DC), ймовірність даної помилки оцінена в ВАБ ЗАЕС-5 як РВОП = 1.

У разі виникнення ІСА Т42 та накладення лише цієї помилки персоналу реалізується сценарій зі спрацюванням БРУ-А на пароводяній суміші. Ймовірність такого сценарію $P_{\text{вода}} = 1,270 \cdot 10^{-1}$, частота виникнення сценарію зі спрацюванням БРУ-А на пароводяній суміші в цьому випадку становитиме $5,080 \cdot 10^{-4}$ 1/год.

Таким чином, внесок даного сценарію становить 99,7 % у загальну ймовірність всіх сценаріїв зі спрацюванням БРУ-А на пароводяній суміші при ІСА Т42.

Розвиток сценарію появи пароводяної суміші в БРУ-А при тиску спрацювання БРУ-А ушкодження активної зони реактора

Оскільки постульовано, що при спрацюванні БРУ-А на пароводяній суміші відбувається його заклинювання у відкритому положенні, тобто можливість пов'язати сценарії зі спрацюванням БРУ-А та пошкодженням активної зони.

Як було зазначено, основним сценарієм є виникнення ІСА Т42 та накладення помилки персоналу «РДП та МД Управління тиском 1-го контуру» (НЕР2-Т42-1YRTQ-DC). Внесок цього сценарію становить 99,7% у загальну ймовірність всіх сценаріїв зі спрацюванням БРУ-А на пароводяній суміші при ІСА Т42.

Розглянемо вплив сценарію на стан активної зони.

Реалізація помилки персоналу «РДП та МД Управління тиском 1-го контуру» (НЕР2-Т42-1YRTQ-DC) веде до невиконання ФБ «Управління тиском 1-го контуру».

Невиконання ФБ «Управління тиском 1-го контуру» веде до втрати запасу теплоносія першого контуру межі ГО і, як наслідок, відбувається випорожнення баків приямків ГО. Закриття після відкриття ПСУ аварійного ПГ є у разі обов'язковим, оскільки дозволяє мінімізувати втрати теплоносія межі ГО. Однак вище показано (і постульовано), що при реалізації помилки персоналу НЕР2-Т42-1YRTQ-DC БРУ-А заклинює у відкритому положенні.

Заклинювання БРУ-А у відкритому положенні призводить до інтенсивного закінчення теплоносія за межі ГО, що в решті-решт призведе до випорожнення баків-приямків ГО. Дана АП характеризується невиконанням 1 з 2-х ФБ, необхідних підтримки РУ в безпечному кінцевому стані:

- підтримка запасу теплоносія 1-го контуру в діапазоні низьких тисків;
- відведення тепла по 1-му контуру за допомогою САОЗ НД.

Кінцевий стан – пошкодження активної зони за високого тиску з викидом радіоактивних речовин межі ГО.

Математична модель впливу заклинювання БРУ-А при попаданні в нього пароводяної суміші (при тиску спрацьовування БРУ-А) заснована на базовому дереві подій (ДС) для ІСА Т42 «Середні течії з 1 контуру в 2 контур».

Домінантний сценарій влучення в БРУ-А пароводяної суміші (внесок 99,7%) реалізується при відмові ФБ «Управління тиском 1-го контуру», без накладення будь-яких інших відмов. У базовому ДС для ІСА Т42 це відповідає наступній траєкторії процесу аварії. Спочатку процес проходить по верхній, проєктній лінії (АП № 1) ДС до роздоріжжя по ФБ «Управління тиском 1-го контуру» (Т42-G2-2). У цьому пункті відбувається помилка персоналу НЕР2-Т42-1YRTQ-DC з ймовірністю $P_{\text{ВОП}} = 1,270 \cdot 10^{-1}$.

При цьому для забезпечення неушкодженого стану активної зони реактора необхідне виконання ФБ «Закриття після відкриття ПСУ аварійного ПГ» (Т42 - Е2 - 3). У ДС Т42 дана ФБ представлена у явному вигляді, ймовірність даної події (ймовірність закриття БРУ-А після відкриття) прийнята рівною $P_{\text{зак}}(\text{БРУ} - \text{А}) = 0,15$.

Якщо БРУ-А не кваліфіковано на роботу на пароводяній суміші, то в даному випадку необхідно консервативно прийняти $P_{\text{зак}}(\text{БРУ-А}) = 1$.

Після відмови ФБ «Управління тиском 1-го контуру» (Т42-G2-2) аварійний процес закінчується пошкодженням активної зони (АП № 15) та трансферними ДС:

– SF08 «Переведення РУ в безпечний кінцевий стан при неізоляції аварійного ПГ за 2-м контуром» (АП № 9);

– SF42 «Відновлення відведення тепла по 1-му контуру ЛПР при неізоляції аварійного ПГ для ІСА Т42» (АП № 14).

Слід зазначити, що розвилка по відмові ФБ «Управління тиском першого контуру» (Т42-G2-2), що призводить до пошкодження активної зони, в АП № 30 змінами не торкається, оскільки цей сценарій передбачає відмову всієї системи САОЗ ВД із насосами TQ13, 23, 33D0. У цій ситуації дії оператора з переведення даних насосів на рециркуляцію не потрібні, а ймовірність спрацьовування БРУ-А на пароводяній суміші є низькою і становитиме $R_{\text{вода}}(PTQ13=0) = 1,376 \cdot 10^{-4}$. Тому в даному випадку використання $P_{\text{закр}}\text{БРУ-А} = 0,15$ є консервативним та прийнятним.

Таким чином, необхідно провести перерахунок частот мінімальних перерізів для АП № 9, 14 та 15 базового ДС. З мінімальних перерізів АП № 9, 14 та 15 необхідно виключити базову подію ASG-SDV-C «Відмова на закриття БРУ-А або ПК ПГ», при цьому частоти мінімальних перерізів АП № 9, 14 та 15 необхідно розділити на

$$P_{\text{зак}}(\text{БРУ-А}) = 0,15.$$

У разі підтвердження кваліфікації БРУ-А на воді (паровій суміші) очікується зниження оцінок сумарного ЧПАЗ. Консервативна оцінка ймовірності відмови БРУ-А на закриття після відкриття можлива на підставі моделей ФДП Т1-Е2-2 закриття після відкриття БРУ-А та ПК ПГ. Оцінка за цим ФДН дає значення $P_{\text{закр}}\text{БРУ-А} = 6,614 \cdot 10^{-3}$. Для отримання зміни у значеннях ППАЗ необхідно частоти

мінімальних перерізів АП № 9, 14 та 15 розділити на $P_{\text{закр}}\text{БРУ-А} = 0,15$ та помножити на

$$P_{\text{закр}}\text{БРУ-А} = 6,614 \cdot 10^{-3}.$$

Базове значення сумарної ЧПАЗ_{база} = $4,326 \cdot 10^{-5}$ 1/рік, нове значення за відсутності кваліфікації БРУ-А ($P_{\text{закр}}\text{БРУ-А} = 1$) складе ЧПАЗ_н = $7,072 \cdot 10^{-5}$. Тобто за відсутності кваліфікації БРУ-А значення сумарного ППАЗ_у зросте в 1,6 раза.

Оцінимо зниження ППАЗ за умови виключення можливості відмови на закриття БРУ-А після відкриття в ІСА Т42, тобто при ймовірності БС ASG-SDV-C, що дорівнює 0.

В результаті отримаємо дані (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Результати оцінки ППАЗ за відсутності та наявності кваліфікації

Номер АП в ІСА Т42	Базове значення ППАЗ для АП, 1/рік	За відсутності кваліфікації БРУ-А на воді ($P_{\text{закр}}\text{БРУ-А} = 1$)		За наявності кваліфікації БРУ-А на воді ($P_{\text{закр}}\text{БРУ-А} = 6,614\text{E-}03$)	
		нове значення ППАЗ для АП, 1/рік	приріст, 1/рік	нове значення ППАЗ для АП, 1/рік	приріст, 1/рік
9-2, 9-4, 9-5, 9-6	$4,812 \cdot 10^{-6}$	$3,208 \cdot 10^{-5}$	$2,727 \cdot 10^{-5}$	$2,122 \cdot 10^{-7}$	$-4,600 \cdot 10^{-6}$
14-2	$2,626 \cdot 10^{-8}$	$1,751 \cdot 10^{-7}$	$1,488 \cdot 10^{-7}$	$1,158 \cdot 10^{-9}$	$-2,510 \cdot 10^{-8}$
15	$6,845 \cdot 10^{-9}$	$4,563 \cdot 10^{-8}$	$3,879 \cdot 10^{-8}$	$3,018 \cdot 10^{-10}$	$-6,543 \cdot 10^{-9}$
РАЗОМ	$4,845 \cdot 10^{-6}$	$3,230 \cdot 10^{-5}$	$2,746 \cdot 10^{-5}$	$2,136 \cdot 10^{-7}$	$-4,631 \cdot 10^{-6}$

Інтервал зниження ризику до БС складе (отримано за допомогою вбудованих функцій SAPHIRE)

$$RRI = ЧПАЗ_{\text{база}} - ППАЗ(P_{ASG} = 0) = 4,844 \cdot 10^{-6} \text{ 1/рік.}$$

Звідси зниження ППАЗ можливе до рівня $ППАЗ_{\text{min}} = 3,842 \cdot 10^{-5} \text{ 1/рік}$. Таким чином, за винятком можливості відмови на закриття БРУ-А після відкриття в ІСА Т42 ППАЗ знизиться в 1,841 разів (зниження на 45,7 %).

За наявності кваліфікації БРУ-А на воді ($P_{\text{закр}} \text{БРУ-А} = 6,614 \cdot 10^{-3}$) оціночне значення ППАЗ знизиться до рівня $ППАЗ_{\text{квал}} = 3,863 \cdot 10^{-5}$. Таким чином, підтвердження кваліфікації БРУ-А на воді (порівняної суміші) знизить сумарну ППАЗ від $ППАЗ_{\text{н}} = 7,072 \cdot 10^{-5}$ до $ППАЗ_{\text{квал}} = 3,863 \cdot 10^{-5}$ на 45,4 %.

Висновки до розділу 2

1. Основними факторами, що впливають на можливість потрапляння пароводяної суміші в БРУ-А при тиску вище тиску відкриття БРУ-А, є помилки персоналу щодо забезпечення тиском в 1 контурі нижче тиску спрацьовування БРУ-А. Дані дії необхідні на пізніх стадіях перебігу аварії (після організації розхолодження через БРУ-А та і полягають у:

– переведенні каналів САОЗ ВД на рециркуляцію після підвищення рівня КД більше 8000 мм;

– управління системою аварійного паро-газовидалення YR.

2. Ймовірність виникнення сценаріїв зі спрацьовуванням БРУ-А на пароводяній суміші за умови реалізації МСС «Середня течя з першого контуру в другий контур» становить $1,274 \cdot 10^{-1}$. Частота виникнення режимів зі спрацьовуванням БРУ-А на пароводяній суміші становитиме $5,098 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год}$.

3. При повному виключенні можливості відмови на закриття БРУ-А після відкриття (як на парі, так і на пароводяному середовищі та воді) в ІСА «Середня течя з першого контуру в другий контур» сумарна частота пошкодження активної зони знизиться на 45,

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВ НА НАДІЙНІСТЬ І БЕЗПЕКУ ЕНЕРГОУСТАНОВОК З ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ

3.1 Аналіз екстремальних («жорстких») умов енергоустановок з парогенераторами

Аналіз проектно-конструкторської документації, досвіду проведення експлуатаційних випробувань та технічного огляду, а також результатів поглибленого аналізу безпеки (у рамках ОАБ енергоблоків із ВВЕР 1000/320) показав [2]:

- обладнання систем, важливих для безпеки (СВБ) за результатами міжремонтних та ремонтних випробувань, можна вважати кваліфікованим для умов, передбачених проектно-конструкторською документацією для ВВЕР 1000/320;

- обладнання СВБ ВВЕР 1000/320 у загальному випадку недостатньо кваліфіковано для запроектних та/або зовнішніх і внутрішніх екстремальних подій (ВЗЕЗ – землетруси, пожежі, затоплення, падіння об'єктів тощо).

Виникнення ВЗЕЗ за певних впливів може призвести до:

- безпосередніх аварійних подій та умов, у яких працездатне обладнання СВБ не кваліфіковано відповідно до проектно-конструкторської документації та результатів експлуатаційних випробувань;

- безпосереднім відмовим обладнання СВБ (порушення працездатності та/або зниження надійності виконання призначених функцій безпеки), а відповідно – до переходу можливих проектних аварій у статус запроектних та створення некваліфікованих умов для працездатності СВБ.

Технічне обґрунтування (кваліфікація) обладнання СВБ з урахуванням ВЗЕЗ необхідно здійснювати як умов проектного протікання аварійних подій, так умов запроектних аварій.

Основним критерієм необхідності додаткової кваліфікації обладнання СВБ (в тому числі з урахуванням ВЗЕЗ) є достатньо надійне виконання призначених проєктом функцій безпеки для:

- безпечного зупинення реактора та утримання його в стані призупинення необхідний час;
- відведення від активної зони залишкового тепла протягом визначеного часу;
- обмеження наслідків аварій шляхом утримання радіоактивних речовин, що виділяються, у встановлених проєктом межах (для елементів системи, що локалізує).

У порівнянні показників безпеки (забезпечуваних в тому числі діями СВБ при ВЗЕС) із встановленими в існуючій нормативній базі критеріями безпеки (включаючи аналіз чутливості та невизначеності) можна оцінити:

- необхідність додаткової кваліфікації обладнання СВБ для умов ВЗЕС;
- значимість окремих СВБ для безпеки з урахуванням ВЗЕЗ.

За оцінками значимості окремих СВБ для показників безпеки можна здійснювати їхнє ранжування для додаткової кваліфікації та модернізації (або заміни). Основним критерієм кваліфікації обладнання СВБ при ВЗЕС є достатня надійність виконання призначених функцій безпеки в умовах процесів, спричинених ВЗЕЗ [30 – 46].

Технічне обґрунтування достатньої надійності СВБ для виконання призначених функцій безпеки в умовах процесів, спричинених ВЗЕЗ, ґрунтується на таких методах кваліфікації:

- розрахунково-аналітичний метод, що передбачає розрахункове моделювання та аналіз надійності виконання призначених функцій безпеки в умовах впливу та наслідків ВЗЕЗ;
- експериментальний метод, що передбачає проведення експериментального моделювання та аналіз надійності виконання призначених функцій безпеки на стендах/натурних установках в умовах впливу та наслідків ВЗЕС;

- комплексний метод, що використовує розрахунково-аналітичний та експериментальні методи кваліфікації.
- аналіз результатів експериментального моделювання має бути заснований на загальноприйнятих положеннях теорії надійності та статистичної обробки експериментальних даних.

Аналіз внутрішніх екстремальних впливів на надійність БРУ-А

Проведений аналіз відомих результатів ВАБ першого рівня серійного енергоблоку АЕС із ВВЕР-1000/320 [2] встановив, що у процесі деяких аварій можливі залежні відмови обладнання в результаті запарювання/затоплення приміщень, де розташоване дане обладнання, а також динамічних впливів трубопроводів, що розірвалися, і струменів води. Зазначені екстремальні дії виникають при наступних вихідних подіях аварії (ІСА):

- Т2 «Розрив/теча у системі основної живильної води»;
- Т61-2 «Розрив паропроводу, що не ізолюється за межами ГОміж ПГ та БЗОК»;
- Т62 «Ізольований розрив після БЗОК».

При ІСА Т2 може відбуватися затоплення живильною водою 2-го контуру та залежна відмова ВПЕН, БРУ-СН, БРУ-К.

Група ІСА Т61-2 охоплює комплекс можливих місць розриву паропроводу в приміщеннях А-820, А-826/1,2, А-910/1,2 та в машзалі. Залежно від місця виникнення розриву можуть відмовити такі елементи:

- електроприводна арматура (в т.ч. БРУ-А);
- датчики тиску в паропроводах та ПГ.

При ІСА Т62 відбувається запарювання машзалу, що може призвести до відмові ВПЕН.

Таким чином, з усіх зазначених МСС тільки МСС Т61-2 може вплинути(при розриві паропроводів у приміщенні А-820) на працездатність БРУ-А. Інші ІСА або не призводять до залежної відмови обладнання через затоку/запарювання та динамічні дії, або не зачіпають приміщення, в яких розташовані БРУ-А.

З аналізу аварійних послідовностей для ІСА Т61-2 випливає, що в цьому ІСА БРУ-А не несе функцій безпеки - БРУ-А не критично для даного ІСА.

Таким чином, можна зробити висновок, що відсутність кваліфікації надійності БРУ-А в умовах внутрішніх екстремальних явищ затоплення/запарювання машзалу суттєво не впливає на безпеку.

Аналіз результатів ВАБ для зовнішніх екстремальних впливів

Методика виконання ВАБ зовнішніх екстремальних впливів (ВЕВ) заснована на вимогах наступних нормативних документів - ОПБУ, НД «Вимоги до змісту звіту з аналізу безпеки енергоблоків АЕС, що діють в Україні, з реакторами типу ВВЕР» та ДНД 306.7.02/2.048-01.

Як загальні методологічні основи використовуються також положення та рекомендації міжнародно визнаних посібників [47-56]:

- NUREG/CR-5042 «Evaluation of External Hazards to Nuclear Power Plants in the United States»;
- NUREG-1407 «Процедурна і субмітальна гідність для індивідуальних планів екзаменації з зовнішніх дій (ІРЕЕЕ) для severe Accident Vulnerabilities»;
- Додаток до external hazards in probabilistic safety assessment for nuclear power plants: a safety practice, Safety Series No. 50-P-7, IAEA, Vienna, 1995;
- Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-3.3, IAEA, Vienna, 2002;
- Meteorological Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants, Safety Guide № NS-G-3.4. IAEA, Vienna, 2002;
- Зовнішні події техногенного походження в оцінці майданчика для атомних електростанцій, Посібник із безпеки № NS-G-3.1, МАГАТЕ, Відень, 2004;
- OE-STD-1020-94 «Natural phenomena hazards design and evaluation criteria for department of energy facilities», 1994;
- DOE-STD-1022-94 «Natural phenomena hazards characterization criteria», 1994;

- DOE-STD 1027-92 «Hazard categorization and accident analysis techniques for compliance with doe order 5480.23», Nuclear safety analysis reports, December 1992;
- DOE-STD-3014-96 «Accident analysis for aircraft crash in hazardous facilities», doe standard, October 1996.

Розробка ВАБ ВЕВ заснована також на методології та результатах ВАБ1-го рівня внутрішніх ІСА.

Перелік основних припущень, використаних під час проведення ВАБ ВЕУ наведено нижче:

- за вихідний стан енергоблоку у ВАБ ВЕВ приймається робота РУ на номінальній потужності;
 - у ВАБ першого рівня вже визначені ті функції та системи, які необхідні та достатні для досягнення безпечного кінцевого стану РУ у разі виникнення ІСА. Додаткові функції систем, які можуть бути додані до ВАБ ВЕВ, призначені для ліквідації впливу ВЕВ;
 - кінцеві стани ВАБ першого рівня залишаються без змін за виключенням подій, які викликають нові ІСА;
 - - передбачається, що окремі внутрішні МСС не можуть виникнути одночасно з ВЕВ, якщо вони не виникли внаслідок цього впливу;
 - - під зовнішніми екстремальними впливами розуміються екстремальні природні впливи та техногенні аварії позафізичних меж енергоблоку (зовнішні стіни, дахи, підлоги, фундаменти основ, вікна, двері, проходки і т.д.);
 - внутрішні екстремальні впливи (пожежі, затоплення, вибухи, предмети, що летять і т. інш.), що виникають у середині фізичних кордонів не враховуються.
- Для виключення ВЕВ із подальшого розгляду застосовуються такі критерії:
- частота ІСА, що ініціюється ВЕВ, значно менше, ніж 10^{-7} на рік;
 - вклад окремого ВЕВ у величину ППАЗ ВАБ 1-го рівня для внутрішніх ІСА не перевищує 1 %, при цьому сумарна ППАЗ від усіх виключених за цим критерієм ВЕВ не повинна перевищувати 10 % від базовий ППАЗ ВАБ 1-го рівня.

Загалом завдання визначення частотних характеристик ВЕВ включає такі складові:

- визначення параметрів, що характеризують інтенсивність аналізованих ВЕВ (наприклад, швидкість вітру, інтенсивність опадів тощо);
- аналіз наявних даних, що характеризують статистику виникнення ВЕВ різної інтенсивності, і вибір визначального параметру інтенсивності зовнішнього впливу;
- встановлення кореляції між величиною обраного параметра і частотами виникнення ВЕВ відповідної інтенсивності (як правило, побудова графічних залежностей «інтенсивність – частота», в яких по осі абсцис відкладаються значення параметра, що характеризує інтенсивність впливу, а по осі ординат – частоти перевищення даних значень інтенсивності).

В результаті виконаного ймовірнісного аналізу зовнішніх екстремальних впливів (ВАБ ВЕВ) 5-го енергоблоку Запорізької АЕС (ЗАЕС) визначено такий вплив землетрусів та смерчів на основний ймовірнісний показник ядерної безпеки- частота пошкодження активної зони реактора (ЧПАЗ) [2]:

- збільшення ППАЗ від впливу землетрусу дорівнює $2,0 \cdot 10^{-6}$ 1/рік, а у відсотковому відношенні 4.62% від ППАЗ ВАБ 1 рівня для внутрішніх ІСА;
- збільшення ЧПАЗ від впливу смерчу дорівнює $6,18 \cdot 10^{-6}$ 1/рік (при частоті вихідної події $6,18 \cdot 10^{-6}$ 1/рік), а у відсотковому відношенні 14,3 % від ЧПАЗ ВАБ 1 рівня для внутрішніх ІСА.
- сумарне збільшення ППАЗ від зазначених зовнішніх екстремальних впливів становить $8,18 \cdot 10^{-6}$ 1/рік, а у відсотковому відношенні 18,9 %.

Аналіз наведених результатів ВАБ ВЕВ ЗАЕС-5 дозволяє зробити наступні коментарі.

1. Недостатньо обґрунтовано виключені з ВАБ ВЕВ екстремальні ІСА внаслідок спільного виникнення кількох ВЕВ, падіння великих/вибухонебезпечних об'єктів та затоплення проммайданчиків АЕС: Один з головних уроків Фукусімської аварії в 2011 році полягає в необхідності враховувати відносну

малоймовірність. катастрофічних наслідків Таким вкрай малоймовірним і навіть не передбачуваним вихідним ВЕВ Фукусімської аварії за визнанням експлуатуючої організації ТЕРСО було спільне виникнення запроектного землетрусу (понад 8 балів в епіцентрі) і цунамі з висотою хвилі біля узбережжя понад 14 метрів (максимальна проектна висота хвилі біля узбережжя 4 метрів, а проммайданчик АЕС Фукусіма-1 розташований на висоті понад 10 метрів над рівнем моря). Наслідками такого «малоймовірного» ВЕВ стали затоплення проммайданчика АЕС Фукусіма-1, повна тривала відмова зовнішнього та внутрішнього електропостачання енергоблоків, численні відмови систем управління аваріями та інші негативні події, які зрештою призвели до ядерних та радіаційних катастроф та руйнівних пароварок. Аналіз впливу на умови безпеки падіння великих/вибухонебезпечних об'єктів особливо актуальний в екстремальних умовах воєнного часу, які можуть призвести до аварій з повним знеструмленням енергоблоків/затопленням проммайданчиків АЕС/руйнуванням захисних бар'єрів безпеки та іншими катастрофічними наслідками. Зокрема, лише за перший рік війни в Україні сталося безліч пошкоджень/руйнувань критичних систем електропостачання, що призвели до кількох десятків аварійних зупинок реакторів внаслідок зовнішнього знеструмлення енергоблоків. На основі детерміністичного аналізу наслідків ВЕВ у роботі [2] встановлена можливість затоплення проммайданчика Запорізької АЕС, розташованої на висоті близько 5 метрів над рівнем ставка-охолоджувача, внаслідок повного руйнування греблі Каховського водосховища та/або землетрусу більше 6 балів і/або смерчу більше 6 балів і/або смерчу. Ці умови затоплення характерні для інших проммайданчиків АЕС України.

2. Недостатньо обґрунтовано у ВАБ ВЕВ прийнято частоту виникнення гранично допустимих запроектних землетрусів. Так, при аналізі сейсмічного впливу в ВАБ ВЕВ без необхідних обґрунтувань прийнято гранично допустиме запроектне МРЗ з частотою виникнення 1 подія за 500 тис. років, яке значно більше проектного гранично допустимого МРЗ для обладнання систем безпеки (в т.ч. і БРУ-А) з проектною частотою виникнення 1; що зрештою визначило значно нижчу ймовірнісну оцінку впливу землетрусів на відповідне збільшення базової сумарної

ЧПАЗ (в 50 разів менше, ніж за проєктному МРЗ). Таке припущення може бути обґрунтоване лише за результатами кваліфікації надійності систем безпеки в умовах прийнятих гранично допустимих запроєктних МРЗ ВАБ ВЕВ.

3. Недостатньо обґрунтовано у ВАБ ВЕВ прийнято частоту гранично допустимого класу інтенсивності смерчу, критичного для надійності систем безпеки (в т.ч. і СРД ПГ), - 1 подія за 100 тис. років. Більшість території України (в т.ч. та райони розташування АЕС) знаходяться у смерчо-небезпечних зонах 2-го та 3-го класу інтенсивності з ймовірнісними частотами виникнення відповідних смерчів порядку 1 подія за 100/1000 років. Смерчі такого класу інтенсивності можуть пошкодити/зруйнувати критичні системи зовнішнього електропостачання енергоблоків АЕС та/або призвести до затоплення проммайданчиків АЕС [2] (аналог зовнішнього МСС Фукусімської аварії). Внаслідок екстремальної дії смерчів найбільш уразливими є системи нормального електропостачання та технічної води відповідальних споживачів [107]. Система технічної води відповідальних споживачів є найбільш критичною, оскільки призводить до залежної відмови системи аварійного електропостачання. Наслідками спільних відмов систем нормального аварійного електропостачання можуть бути ядерні (важкі) аварії з пошкодженням/руйнуванням ядерного палива (рис. 3.1).

ІСА (Т61-2)						№	Кінцевий стан
Управління реактивністю		Управління реактивністю		Ізоляція ПГ по воді	Управління тиском 1-го контуру	Відвод тепла від РУ через 1 контур	
	А3	ТК (ТВ0) або (ТQ13 та YR) або ТQ14	Закриття арматури на лінії підпитки АПГ або відключення ВПЕН	Відкриття ПК КО	САОЗ ВД та YR		
Т61-2	½ комплексів Т61-2-А	1/3 (1/3) або 1/3 (1/3+1/3) Т61-2-В1В2В3	2/2 оператор Т61-2Р2	1/3 авто Т61-2-Г2	1/3 авто, 1/3+1/3 Т61-2-Д2Г1	1	БПЗ, гаряча зупинка (ОК)
						2	ПЗ, високий тиск (CD)
						3	ПЗ, високий тиск (CD)
						4	ПЗ, повторна критичність тиск (CD)
						5	ПЗ, повторна критичність тиск (CD)
						6	ПЗ, високий тиск (CD)

Рисунок 3.1 – Дерево подій для ІСА Т61-2 «Не розрив паропроводу, який не ізолювано за межами ГО між ПГ і БЗОК» [2]

3.2 Ймовірнісний аналіз впливу зовнішніх екстремальних впливів на надійність БРУ-А

На основі представленого в попередніх розділах аналізу впливу кваліфікації надійності БРУ-А на безпеку у робочих та проєктних аварійних режимах встановлено:

- в умовах режимів нормальної експлуатації та проєктних аварій надійності БРУ-А підтверджується (кваліфікується) результатами експлуатаційних випробувань (ЕВ) та забезпечується періодичними плановими ремонтами, технічним обслуговуванням та дотриманням умов навколишнього середовища приміщень, у яких розташовано БРУ-А [108];

- в умовах режимів відхилень від умов проєктних аварій внаслідок внутрішніх екстремальних впливів можливі зміни умов довкілля приміщень БРУ-А внаслідок МССТ2 «Розрив/теча у системі основної живильної води»; ІСАТ61-2 «Не розрив паропроводу, який не ізолювано за межами ГО між ПГ і БЗОК»; ІСАТ62 «Ізолюваний розрив після БЗОК». В результаті проведеного аналізу встановлено, що відсутність кваліфікації надійності БРУ-А в умовах внутрішніх екстремальних впливів не впливає на безпеку АЕС: в МСС Т2 і Т62 параметри навколишнього середовища не змінюються в приміщеннях, де встановлені БРУ-А; а в ІСА Т61-2 можливе запарювання приміщень з БРУ-А, але для цієї групи проєктних аварій БРУ-А не є критичною системою безпеки (відсутня необхідність/не потрібно виконання БРУ-А відповідних функцій безпеки для управління аварією).

- невизначеність ймовірнісних оцінок впливу зовнішніх екстремальних впливів (ВЕВ) на базову сумарну ППАЗ внутрішніх ІСА внаслідок недостатньої обґрунтованості ймовірності частоти виникнення критичних для безпеки ВЕВ.

БРУ-А визначено як критичну систему безпеки для широкого спектру проєктних внутрішніх ІСА: знеструмлення енергоблоку; відмови/заклинювання основних циркуляційних насосів (ГЦН); відмови аварійного захисту реактора; течі

теплоносія в ПГ/гермооб'єм (ГО) ЕУ та інші. Тому, актуальним є проведення аналізу впливу ВЕВ на надійність БРУ-А управління проєктними внутрішніми ІСА.

Основні положення та припущення аналізу впливу ВЕВ на надійність БРУ-А

Аналізуються запроєктні умови аварії з внутрішнім ІСА, для яких критична надійність БРУ-А, та одночасним ВЕВ.

Домінантним ВЕВ належить запроєктний сейсмічний вплив на прикладі проммайданчика Запорізької АЕС (ЗАЕС).

Консервативно належить відмова БРУ-А в умовах відсутності кваліфікації надійності за гранично допустимим землетрусом.

Консервативно приймається відмова СРД ПГ через відмову БРУ-А.

Устаткування ЗАЕС (у тому числі і БРУ-А) було спроектовано для наступних умов сейсмічного впливу:

- проєктний землетрус (ПЗ) – 5 балів за шкалою MSK;
- максимальний розрахунковий землетрус (МРЗ) – 6 балів за шкалою MSK.

Проведені НДІ «Енергопроект» оцінки сейсмічних характеристик майданчика ЗАЕС показали, що можливі більш потужні сейсмічні впливання (більше 6 балів). У результаті було встановлено для проммайданчика ЗАЕС:

- ПЗ – 6 балів за шкалою MSK;
- МРЗ – 7 балів за шкалою MSK.

Система регулювання тиску в обсягах ПГ (СРД ПГ), у тому числі БРУ-А, не кваліфіковано проєктом на сейсмічні дії вище 6 балів [102]. Тому, гранично допустимий сейсмічний вплив покладається на закриття БРУ-А понад 6 балів.

Мета ймовірнісного аналізу впливу сейсмічних впливів на надійність закриття (після відкриття) БРУ-А у процесі запроєктної аварії полягає у визначенні наступних ймовірнісних показників:

- відносне збільшення ймовірності відмови БРУ-А/СРД ПГ внаслідок впливу землетрусу вище 6 балів у процесі запроєктної аварії;

відносне збільшення ймовірності сумарної базової ППАЗ усереднених ІСА внаслідок відносного збільшення ймовірності відмови БРУ-А/СРД ПГ гранично допустимим сейсмічним впливом.

Відповідно до традиційної методології ВАБ (наприклад, [1-3]) відносне збільшення ймовірності сумарної базової ППАЗ внутрішніх ІСА визначається частотою виникнення гранично допустимого землетрусу (j) та тривалістю аварії з внутрішнім ІСА (T_a).

У звітах з аналізу безпеки (ОАБ) ЕУ з ВВЕР тривалість аварійного процесу мала не більше 24 годин. Однак, уроки Фукусімської аварії встановили, що тривалість аварії з ІСА «Повне тривале знеструмлення енергоблоків» може бути більше 2-х діб. Тому, консервативно можна вважати $T_a = 72$ години.

Відповідно до встановлених залежностей частоти виникнення землетрусу від потужності землетрусу на проммайданчику Запорізької АЕС частота виникнення гранично допустимого землетрусу понад 6 балів:

$$j = 4 \cdot 10^{-5} \text{ /рік} \quad (3.1)$$

Тоді, відносна ймовірність відмови БРУ-А внаслідок гранично допустимого землетрусу понад 6 балів частотою виникнення (3.1) у процесі аварії з внутрішнім ІСА тривалістю 72 години [1 - 3]:

$$\Delta \text{РБРУ}_A(j; T_a) = 3,3 \cdot 10^{-6} \quad (3.2)$$

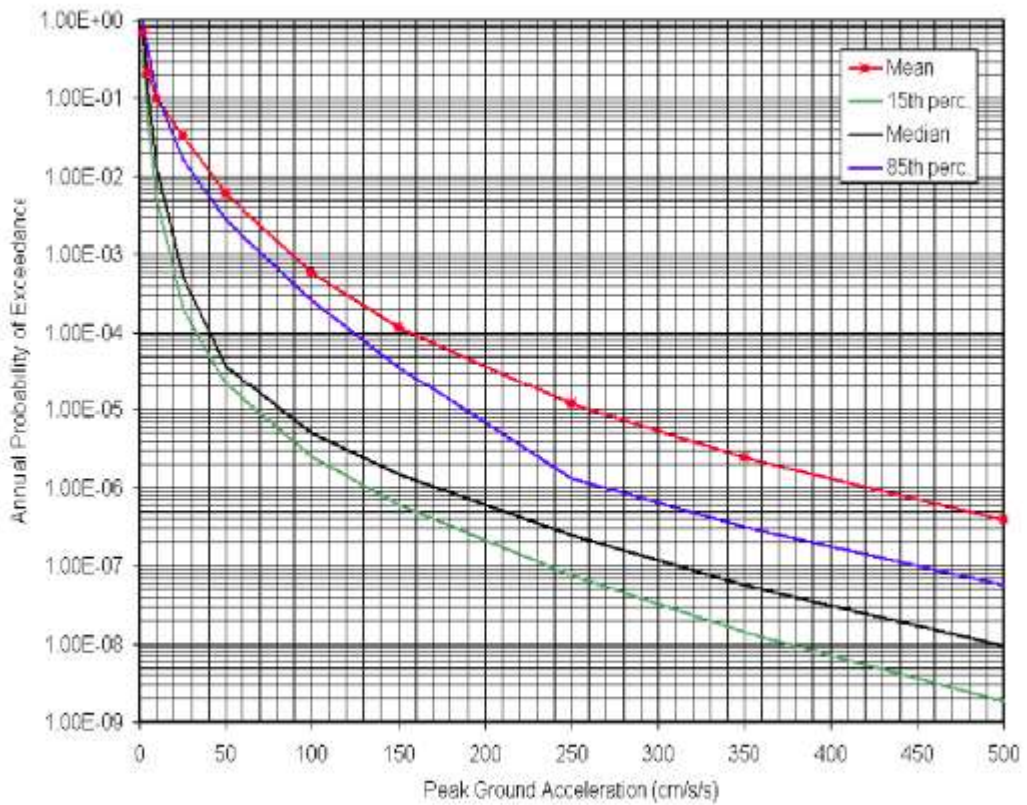


Рисунок 3.2 - Залежність частоти виникнення землетрусу від пікових значень прискорення на поверхні ґрунту для проммайданчики ЗАЕС [2]

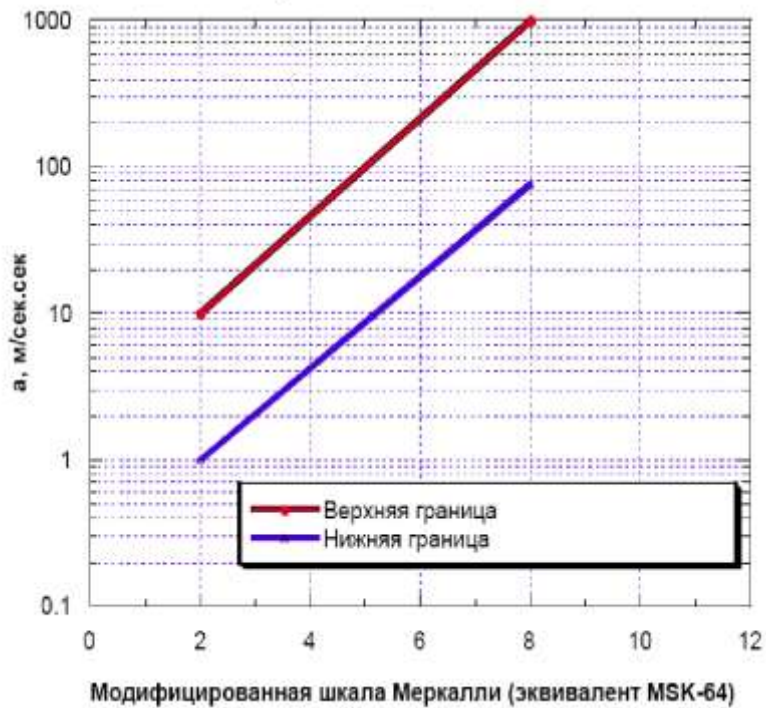


Рисунок 3.3- Залежність пікових прискорень землетрусу на поверхні ґрунту від показів шкали MSK проммайданчики ЗАЕС [2]

З урахуванням отриманого значення ймовірності відмов базових подій спрацьовування БРУ-А в процесі запроектованих аварій внутрішнім ІСА та гранично допустимим землетрусом та відповідні їм інтервали зміни ризику представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 Опис базових подій та інтервал зміни ризику

Позначення базової події	Опис базової події	Ймовірність відмови P	Значення за Бірнбаум В, 1/рік	Інтервал зміни ризику, 1/рік	
				зниження RRI	підвищення RII
C-TXN0S05-SDV-C-ABCD	ООП на зміну положення 4/4 TX50(60,70,80)S05	$1,723 \cdot 10^{-5}$	$3,021 \cdot 10^{-3}$	$7,384 \cdot 10^{-8}$	$3,021 \cdot 10^{-3}$
C-TXN0S05-SDV-E-ABCX	ООП на закриття 3/4 TX50 (60,70) S05	$2,269 \cdot 10^{-5}$	$6,033 \cdot 10^{-3}$	$1,369 \cdot 10^{-7}$	$6,033 \cdot 10^{-3}$
C-TXN0S05-SDV-E-ABXD	ООП на закриття 3/4 TX50 (60,80) S05	$2,269 \cdot 10^{-5}$	$6,033 \cdot 10^{-3}$	$1,369 \cdot 10^{-7}$	$6,033 \cdot 10^{-3}$
C-TXN0S05-SDV-E-ABXX	ООП на закриття 2/4 TX50(60) S05	$3,030 \cdot 10^{-5}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$	$5,915 \cdot 10^{-10}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$
C-TXN0S05-SDV-E-AXCD	ООП на закриття 3/4 TX50 (70,80) S05	$2,269 \cdot 10^{-5}$	$6,033 \cdot 10^{-3}$	$1,369 \cdot 10^{-7}$	$6,033 \cdot 10^{-3}$
C-TXN0S05-SDV-E-AXCX	ООП на закриття 2/4 TX50(70) S05	$3,030 \cdot 10^{-5}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$	$5,915 \cdot 10^{-10}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$
C-TXN0S05-SDV-E-AXXD	ООП на закриття 2/4 TX50(80) S05	$3,030 \cdot 10^{-5}$	$3,211 \cdot 10^{-5}$	$9,732 \cdot 10^{-10}$	$3,211 \cdot 10^{-5}$
C-TXN0S05-SDV-E-	ООП на закриття 3/4 TX60 (70,80) S05	$2,269 \cdot 10^{-5}$	$6,033 \cdot 10^{-3}$	$1,369 \cdot 10^{-7}$	$6,033 \cdot 10^{-3}$

Позначення базової події	Опис базової події	Ймовірність відмови Р	Значення за Бірнбаум В, 1/рік	Інтервал зміни ризику, 1/рік	
				зниження RRI	підвищення RII
XBCD					
C-TXN0S05-SDV-E-XBCX	ООП на закриття 2/4 TX60(70) S05	$3,030 \cdot 10^{-5}$	$2,311 \cdot 10^{-5}$	$7,004 \cdot 10^{-10}$	$2,311 \cdot 10^{-5}$
C-TXN0S05-SDV-E-XBXD	ООП на закриття 2/4 TX60(80) S05	$3,030 \cdot 10^{-5}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$	$5,915 \cdot 10^{-10}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$
C-TXN0S05-SDV-E-XXCD	ООП на закриття 2/4 TX 70(80) S05	$3,030 \cdot 10^{-5}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$	$5,915 \cdot 10^{-10}$	$1,952 \cdot 10^{-5}$
C-TXN0S05-SDV-O-ABCD	ООП на відкриття 4/4 БРУ-А	$2,435 \cdot 10^{-4}$	$3,056 \cdot 10^{-3}$	$1,052 \cdot 10^{-6}$	$3,055 \cdot 10^{-3}$
TX50S05-SDV-C	Відмова БРУ-А зміну становища	$1,723 \cdot 10^{-4}$	$1,172 \cdot 10^{-4}$	$2,035 \cdot 10^{-8}$	$1,171 \cdot 10^{-4}$
TX50S05-SDV-E	Відмова БРУ-А на закриття TX50S05	$1,620 \cdot 10^{-3}$	$2,134 \cdot 10^{-4}$	$3,461 \cdot 10^{-7}$	$2,130 \cdot 10^{-4}$
TX50S05-SDV-O	Відмова на відкриття	$2,440 \cdot 10^{-3}$	$1,185 \cdot 10^{-4}$	$2,915 \cdot 10^{-7}$	$1,182 \cdot 10^{-4}$
TX60S05-SDV-C	Відмова БРУ-А зміну становища	$1,723 \cdot 10^{-4}$	$1,165 \cdot 10^{-4}$	$2,025 \cdot 10^{-8}$	$1,165 \cdot 10^{-4}$
TX60S05-SDV-E	Відмова БРУ-А на закриття TX60S05	$1,620 \cdot 10^{-3}$	$1,215 \cdot 10^{-4}$	$1,970 \cdot 10^{-7}$	$1,213 \cdot 10^{-4}$
TX60S05-SDV-O	Відмова на відкриття	$2,440 \cdot 10^{-3}$	$1,176 \cdot 10^{-4}$	$2,893 \cdot 10^{-7}$	$1,173 \cdot 10^{-4}$
TX70S05-SDV-C	Відмова TX70S05 на зміну положення	$1,723 \cdot 10^{-4}$	$1,172 \cdot 10^{-4}$	$2,035 \cdot 10^{-8}$	$1,171 \cdot 10^{-4}$
TX70S05-SDV-E	Відмова БРУ-А TX70S05 на закриття	$1,620 \cdot 10^{-3}$	$2,133 \cdot 10^{-4}$	$3,459 \cdot 10^{-7}$	$2,129 \cdot 10^{-4}$
TX70S05-SDV-O	Відмова на відкриття	$2,440 \cdot 10^{-3}$	$1,184 \cdot 10^{-4}$	$2,913 \cdot 10^{-7}$	$1,181 \cdot 10^{-4}$
TX80S05-	Відмова на зміни	$1,723 \cdot 10^{-4}$	$1,165 \cdot 10^{-4}$	$2,025 \cdot 10^{-8}$	$1,165 \cdot 10^{-4}$

Позначення базової події	Опис базової події	Ймовірність відмови Р	Значення за Бірнбаум В, 1/рік	Інтервал зміни ризику, 1/рік	
				зниження RRI	підвищення RII
SDV-C	положення				
TX80S05-SDV-E	Відмова БРУ-А на закриття TX80S05	$1,620 \cdot 10^{-3}$	$1,216 \cdot 10^{-4}$	$1,972 \cdot 10^{-7}$	$1,214 \cdot 10^{-4}$
TX80S05-SDV-O	Відмова на відкриття	$2,440 \cdot 10^{-3}$	$1,173 \cdot 10^{-4}$	$2,886 \cdot 10^{-7}$	$1,170 \cdot 10^{-4}$
РАЗОМ:			$3,195 \cdot 10^{-2}$	$4,006 \cdot 10^{-6}$	$3,195 \cdot 10^{-2}$

Відповідно до результатів табл. 3.1 максимальне відсоткове збільшення ймовірності відмови БРУ-А в процесі запроектних аварій із внутрішнім ІСА та гранично допустимим землетрусом щодо проектних умов аварій складе 4,9 %.

Максимальне сумарне відносне збільшення ППАЗ внаслідок відсутності кваліфікації БРУ-А ЕУ із ВВЕР-1000 на умови максимального розрахункового землетрусу понад 6 балів – 18,5 %.

3.3 Аналіз гранично допустимого для надійності БРУ-А землетрусу енергоустановки з парогенераторами

Відповідно до проекту у геолого-структурному відношенні район розміщення Запорізької АЕС (ЗАЕС) розташований у межах Придніпровського блоку Українського кристалічного щита (УЩ), який з північного сходу обмежується Дніпровсько-Донецьким авлакогеном; а з півдня - Причорноморською западиною. Кристалічний фундамент, що виходить на поверхню в північній частині Придніпровського блоку УЩ, поступово занурюється у південному напрямку. Потужність земної кори тут становить 47 км. Складна складчасто-глибова будова УЩ сформувалося на докембрійському етапі розвитку.

Глибинні розломи фундаменту закладені у ранній протерозойський час. Найближчим до проммайданчика (мінімальна відстань – 10км) є Конський розлом довжиною до 500 км, який ускладнений серією розривів нижчого порядку та

простежується у суб-меридіональному напрямку. Амплітуда зміщення по Конкському розлому зростає із заходу Схід з 80 до 400 м. Східніше вузла перетину із Західно-Дніпровським розломом, Конкський розлом виявляв тектонічну активність у час, і амплітуда усунення у цій частині за неоген-четвертичне час склала порядку .

Ще одним активним розломом району ЗАЕС є Євпаторійсько-Криворізько-Кременчуцький суб-меридіональний розлом, що проявив свою активність у новітній час на відрізку, обмеженому вузлами перетину з Девладівським та Конським розломами. Найближча відстань від активної частини розлому до проммайданчика становить 110 км.

Всі інші з перерахованих вище розломів є консолідованими і не виявляли тектонічної активності на сучасних етапах розвитку регіону.

Відповідно до СНіП-II-7 «Будівництво в сейсмічних районах» та картою сейсмічного районування (СР-78), територія будівництва ЗАЕС знаходиться в сейсмічній зоні рівня 5 балів. Відповідно до проекту сейсмічність території будівництва ЗАЕС складала:

- проєктний землетрус (ПЗ) – 5 балів за шкалою MSK;
- максимальний розрахунковий землетрус (МРЗ) – 6 балів за шкалою MSK.

Найбільш небезпечними при землетрусі є ділянки із заболоченими ґрунтами та виходами на поверхню ґрунтових вод (особливо берегова зона Каховського водосховища).

Проєктні пікові значення «відгуків» прискорення сейсмічного впливу на поверхні ґрунту проммайданчика ЗАЕС для ПЗ (проєктна ймовірність виникнення – 1 подія за 100 років) та МРЗ (проєктна ймовірність виникнення - 1 подія за 10000 років) чи:

- 42,8 см/сек² (0,04g) для ПЗ (5 балів);
- 156,5 см/сек² (0,15 g) для МРЗ (6 балів).

У процесі експлуатації ЗАЕС з'явилися передумови перегляду проектних критеріїв (показників) сейсмостійкості, серед яких можна виділити, наприклад, такі:

1. За останніми даними інституту геофізики НАН України, які опублікували карту сейсмічного районування території України встановлено, що район розташування ЗАЕС відповідає рівню сейсмічності більше 7 балів і суттєво перевищує наслідки впливу землетрусу від прийнятих у проекті.

2. При аналізі впливу сейсмічних дій на окремі будови 5-го енергоблоку ЗАЕС прийнята 1-а категорія сейсмостійкості (МРЗ 7 балів за шкалою MSK, ПЗ - 6 балів) на підставі того, що за відсутності необхідних даних щодо стійкості будівель/споруд та обладнання до сейсмічним впливам, що перевищують проектне МРЗ, відбуваються множинні відмови обладнання систем важливих для безпеки (СВБ), що призводять до пошкодження активної зони реактора (умови ядерних аварій)що визначає актуальність кваліфікації надійності систем безпеки (в т.ч. БРУ-А/СРД ПГ) в умовах запроєктних МРЗ.

3. Перегляд критеріїв (показників) ПЗ та МРЗ для проммайданчика ЗАЕС потребує відповідної кваліфікації, так як запропоновані значення МРЗ понад 6 балів суперечать проектним дослідженням сейсмічного стану району ЗАЕС, а також окремим сучасним дослідженням. Так, у рамках проектів ISA Ліверморською Національною Лабораторією США було отримано основні характеристики сейсмічних впливів для всіх АЕС України. Зокрема, відповідно до встановленими залежностями частоти виникнення землетрусу від потужності (рівня) землетрусу, ймовірність виникнення МРЗ 7 балів та пікового прискорення ґрунту близько 400 см/сек^2 для проммайданчика ЗАЕС на кілька порядків менше ймовірності виникнення проектного МРЗ. Відповідно до чинних нормативних ухвал, такі землетруси не можуть бути віднесені до проектного (ПЗ) і максимального розрахункового землетрусу (МРЗ): ймовірність ПЗ –1 подія за 100 років, а МРЗ -1 подія за 10 тис. років, тому, землетруси понад 6 балів із повторюваністю менше одного разу на 10 тис. років відносять до умов запроєктних аварій.

4. У 2007 році запроваджено нові сейсмічні норми загального призначення – ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України», що включають результати макро-сейсмічного районування України (картки ОСР 2004). Найбільш жорсткі умови за рівнем ймовірності сейсмічних впливів максимальної інтенсивності містять карти з індексом "С", що відповідають періоду повторюваності максимальної інтенсивності один раз на 5000 років. Відповідно до п.1.1.1 ДБН В.1.1-12:2006 карти з індексом «В» слід застосовувати під час проектування та будівництва особливо відповідальних об'єктів та споруд, пошкодження чи руйнування яких при впливі землетрусу може призвести до надзвичайної ситуації державного рівня. Відповідно до зазначених карток та рекомендацій обов'язкового Додатка А до ДБН В.1.1-12:2006 для м. Енергодару Запорізької області слід приймати:

- при повторюваності один раз на 1000 років – 6 балів за шкалою MSK;
- при повторюваності один раз на 5000 років – 7 балів за шкалою MSK.

При цьому ДБН В.1.1-12:2006 обумовлено що сейсмічну інтенсивність майданчика будівництва слід визначати з урахуванням результатів сейсмічного мікрорайонування, що виконується для районів із сейсмічності 6 і більше балів відповідно до складу робіт, зазначених у нормативних документах, тобто. у цьому випадку – для АЕС у відповідність до рекомендацій ПНАЕ Г-5-006-87. Таким чином, нові норми до показників/критерій ПЗ та МРЗ визначають необхідність перегляду результатів ВАБ ВЕВ щодо впливу запроектованих землетрусів на ППАЗ.

5. Компанією «Stevenson and Associated» (Cleveland, Ohio, USA) було проведено та опубліковано аналіз рівнів сейсмічності майданчиків АЕС в Україні, відповідно до якого величина пікового горизонтального прискорення на поверхні ґрунту для Запорізької АЕС рекомендована не менше 0,1g, що відповідно до інструментальної частини шкали MSK-64 відповідає діапазону прискорень сейсмічного впливу інтенсивністю 7 балів. Така рекомендація була підтверджена МАГАТЕ в 1997 р. в документі «Проблеми безпеки атомних електростанцій з реакторами ВВЕР-1000/320», розробка за результатами роботи місії МАГАТЕ в Україні.

6. Ймовірність виникнення запроектованих землетрусів може бути значно меншою (на кілька порядків) ймовірності виникнення проектних ПЗ та МРЗ. Однак, один із основних уроків Фукусімської аварії 2011 року полягає в необхідності враховувати екстремальні події (в т.ч. і землетруси) щодо малої ймовірності, але мають катастрофічні наслідки.

У пост-фукусімський період у рамках «Плану заходів подальшого підвищення безпеки АЕС України з урахуванням уроків аварії на АЕС Фукусіма-1» НАЕК Енергоатом - ДІЯРУ було проведено галузеву програму розрахункової кваліфікації надійності СВБ (в т.ч. БРУ-А/СРД ПГ) ЕУ з ВВЕ-3 з ВВЕ-3 Внаслідок реалізації цієї програми було встановлено кваліфікацію надійності БРУ-А в умовах запроектованого землетрусу 7 балів.

Далі наведено порівняльний аналіз результатів проектної та «пост-фукусімської» кваліфікації надійності БРУ-А в умовах сейсмічних впливів.

Проектна кваліфікація надійності БРУ-А в умовах сейсмічних впливів ґрунтується на вимогах та методичному забезпеченні нормативної документації ядерної енергетики України.

Відповідно до нормативних вимог, перевірка обладнання та трубопроводів (в т.ч. і системи БРУ-А) на сейсмічні дії повинна виконуватися розрахунковими та/або експериментальними методами. Перевірку розрахунковими методами необхідно виконувати відповідно до «Норм розрахунку на міцність обладнання та трубопроводів АЕУ» (ПНАЕ Г-7-002-86). Відповідно до вимог Правил та Норм з ядерної та радіаційної безпеки (ПНАЕ) системи БРУ-А є системами нормальної експлуатації, що поєднують функції захисту.их систем безпеки,та відносяться до 1-ї категорії сейсмостійкості за ПНАЕ Г-5-006-87, до групи В за ПНАЕ Г-7-008-89 та до класу безпеки 2 (класифікаційне позначення 2НЗ) за ОПБО.

Методичне забезпечення розрахунків на міцність при сейсмічних впливах представлено у ПНАЕ Г-7-002-86 та конкретизовано у методиці проектно-конструкторської документації на БРУ-А.

Відповідно до ПНАЕ Г-7-002-86 сейсмічні навантаження на обладнання та трубопроводи визначають з урахуванням одночасного сейсмічного впливу у двох

горизонтальних та вертикальних напрямках. Для визначення сейсмічних навантажень можуть бути використані:

- 1) три акселерограми для трьох взаємно перпендикулярних напрямків;
- 2) спектри реакцій, що відповідають заданим акселерограм;
- 3) узагальнені діапазони реакцій.

Значення відносного демпфірування приймають рівним $k = 0,02$.

Обладнання та трубопроводи 1-ї категорії повинні розраховуватися відповідно до вимог на поєднання навантажень у нормальних умов безпеки (НУЕ) та ПЗ, МРЗ.

Суть розрахунків міцності зводиться до аналізу співвідношення значень напруг, що виникають при сейсмічних впливах (проектний землетрус - ПЗ, максимальний розрахунковий землетрус - МРЗ) і допускається напруги, що визначається конструкційними характеристиками системи БРУ-А.

Поєднання навантажень і напруги, що допускаються, для обладнання та трубопроводів

Поєднання навантажень	Розрахункова група категорій напруг	Допустима напруга
НУЕ + МРЗ	(σ)1	1,4[σ]
	(σ)2	1,8[σ]
НУЕ + ПЗ	(σ)1	1,2[σ]
	(σ)2	1,6[σ]

Поєднання навантажень і напруги, що допускаються, для болтів і шпильок

Поєднання навантажень	Розрахункова група категорій напруг	Допустима напруга
НУЕ + МРЗ	(σ)mw	1,4[σ]w
	(σ)4w	2,2[σ]w
НУЕ + ПЗ	(σ)mw	1,2[σ]w
	(σ)4w	2,0[σ]w

Поєднання навантажень і напруги змінання, що допускаються

Поєднання навантажень	Категорія напруг	Допустима напруга
НУЕ + МРЗ	(σs)s	2,7[σ]
НУЕ + ПЗ		2,5[σ]

Поєднання навантажень і напруги, що допускаються, дотичні напруги зрізу

Поєднання навантажень	Категорія напруг	Допустима напруга	
		у болтах та шпильках	в елементах конструкцій, крім болтів та шпильок
НУЕ + МРЗ	(τs)s	0,7[σ]w	0,7[σ]
НУЕ + ПЗ		0,6[σ]w	0,6[σ]

Розрахункові навантаження для обладнання 1-ї категорії сейсмостійкості визначаються схематично:

$$\begin{aligned} & \text{НУЕ} + \text{МРЗ} \\ & \text{ННУЕ} + \text{МРЗ} \\ & \text{НУЕ} + \text{ПА} + \text{ПЗ} \\ & \text{ННУЕ} + \text{ПЗ}, \end{aligned}$$

де ННУЕ – порушення нормальних умов експлуатації; ПА – проектна аварія
У ПНАЕ Г-7-002-86 наведено узагальнені спектри відповіді горизонтальних та вертикальних коливань енергоблока потужністю 1000 МВт АЕС із ВВЕР при сейсмічності майданчика 9 балів.

Графіки представлені на рис. 3.4 та 3.5 є оригінальними спектри відповіді при горизонтальних і вертикальних сейсмічних впливах при нормуванні пікових значень прискорень:

- для горизонтальних сейсмічних впливів 0,4g;
- для вертикальних сейсмічних впливів 0,2g.

Слід зазначити, що спектри відповіді («відгуку»), представлені ПНАЕ Г-7-002-86, відносяться тільки до технологічного обладнання і трубопроводів, а сейсмостійкість електротехнічного обладнання I і II категорії сейсмостійкості (шаф, панелей, складальних вузлів, кабельних конструкцій і т.п.) обґрунтовується експериментальним шляхом (випробуванням на спеціальних методах). 17516.1-90.

Проектні обґрунтування міцності елементів БРУ-А ЗАЕС були виконані в діапазоні сейсмічних навантажень проектних землетрусів та підтверджено у Технічному обґрунтуванні безпеки (ТОБ) енергоблоку № 5 ЗАЕС. В результаті цих проектних обґрунтувань (кваліфікації) встановлено гранично допустимі сейсмічні навантаження (МРЗ) – 6 балів.

Результати розрахунків на міцність для землетрусів рівня 7 балів наведено у додаткових матеріалах за безпеки (ДМАБ) енергоблоку № 5 ЗАЕС системах приміщення А-820 (в т.ч. БРУ-А) з урахуванням змін у нових редакціях нормативно-технічної документації (НТД).

Проведене порівняння нових редакцій НТД із раніше чинними показало, що основні відмінності полягають у наступному:

- відмінності вимог щодо вибору та налаштування запобіжних пристроїв;
- зміна окремих методів та обсягів контролю;
- зміна окремих видів оброблення кромки.

Ці відмінності не є принциповими і практично не впливають на результати розрахунків на міцність обладнання СВБ і СНЕ важливих для безпеки.

Перевірочні розрахунки на міцність клапанів БРУ-А серій 1115-300/350-Е та 960-300/350-Е були проведені для ПЗ = 6 балів та МРЗ = 7 балів відповідно до проектно-конструкторської методики.

Розрахунки на міцність були проведені з урахуванням результатів обґрунтувань максимальних (поверхових) прискорень та спектрів відповіді для промайданчика ЗАЕС, в яких для приміщення А 820 (відм.+31,0) визначено наступні значення максимальних прискорень:

- 1) Для ПЗ = 6 балів:
 - горизонтальні $a_x = a_y = 3646 \text{ м/сек}^2$;

- вертикальні $a_z = 2,022 \text{ м/сек}^2$.

2) Для $MP3 = 7$ балів:

- горизонтальні $a_x = a_y = 7,292 \text{ м/сек}^2$;

- вертикальні $a_z = 4,184 \text{ м/сек}^2$.

Узагальнені спектри відповіді вертикальних та горизонтальних коливань на позначці +31,0 при $P3 = 6$ балів та $MP3 = 7$ балів.

В результаті перевірочних розрахунків у ДМАБ ЗАЕС-5 встановлено виконання умов міцності для клапанів БРУ-А серій 1115-300/350-Е та 960-300/350-Е при сейсмічних впливах $P3 = 6$ балів, $MP3 = 7$ балів в поєднанні розрахункових навантажень $PA + MP3$ (PA - проектна аварія з міжконтурними течами).

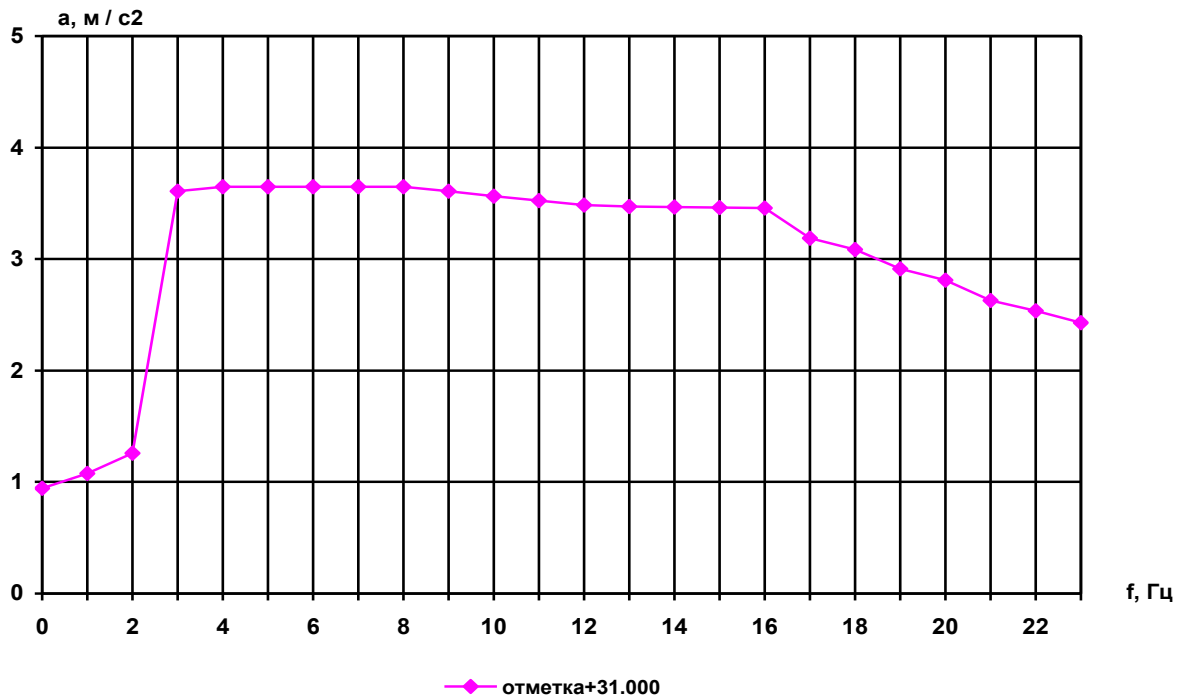


Рисунок 3.4 – Узагальнені спектри відповіді горизонтальних коливань на позначці +31.000. $P3 = 6$ балів

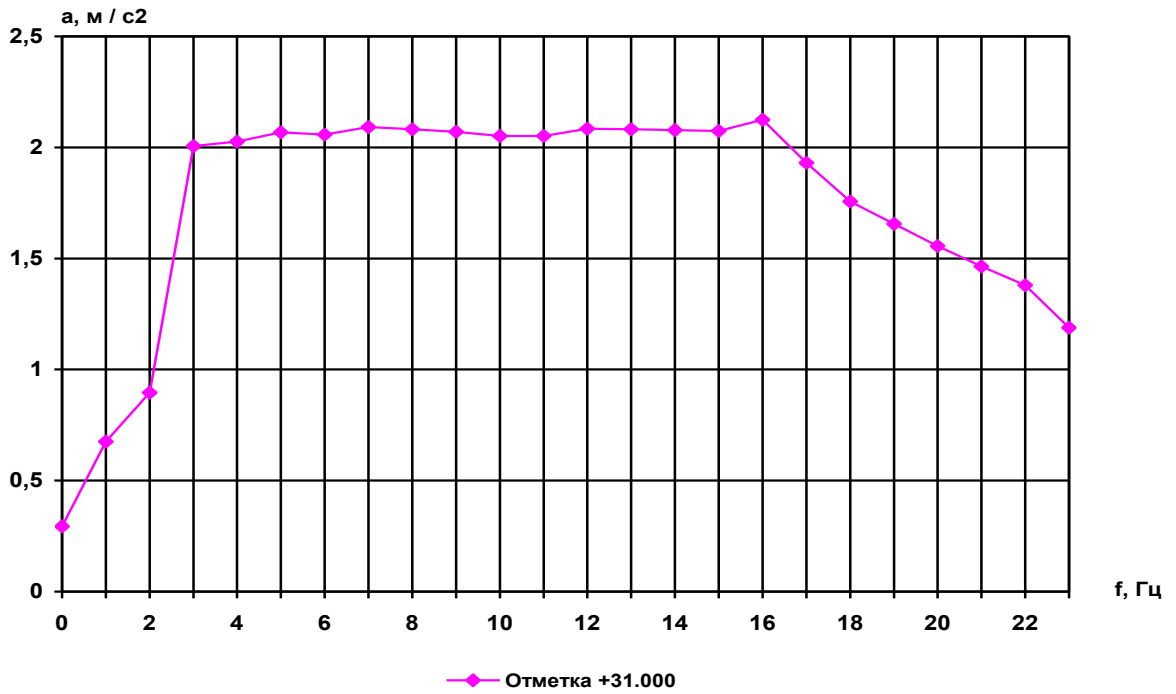


Рисунок 3.5 – Узагальнені спектри відповіді вертикальних коливань на позначці +31000. ПЗ = 6 балів

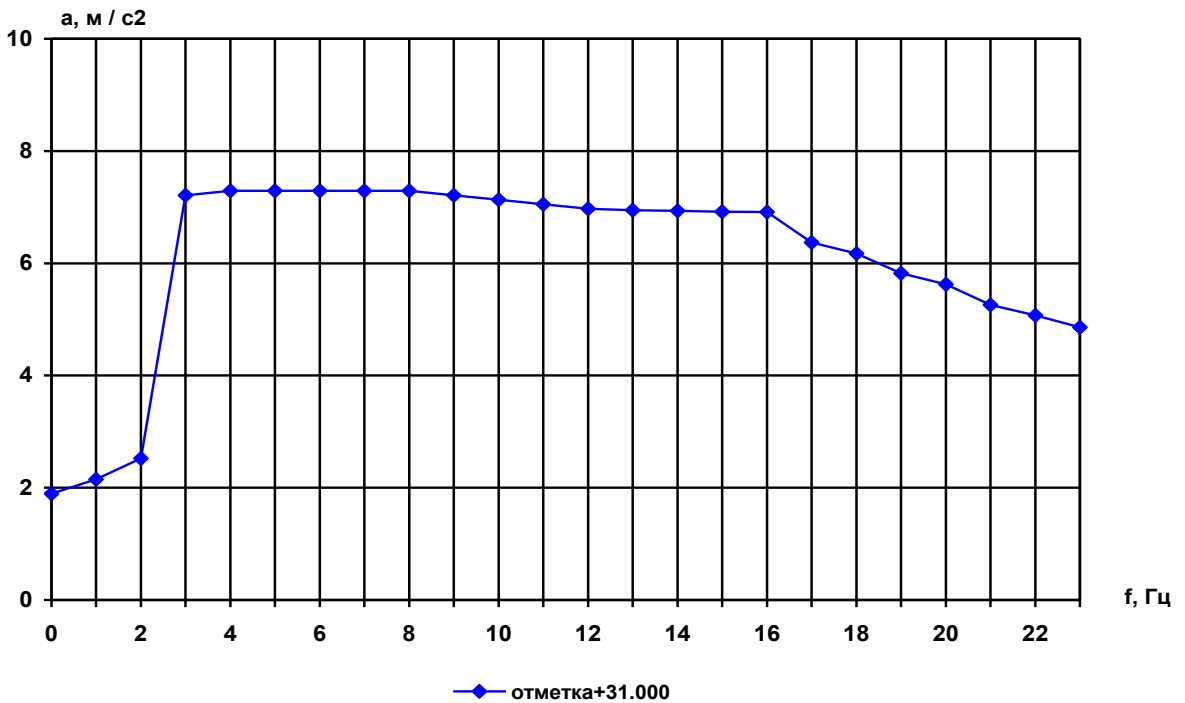


Рисунок 3.6 – Узагальнені спектри відповіді горизонтальних коливань на позначці +31.000. МРЗ = 7 балів.

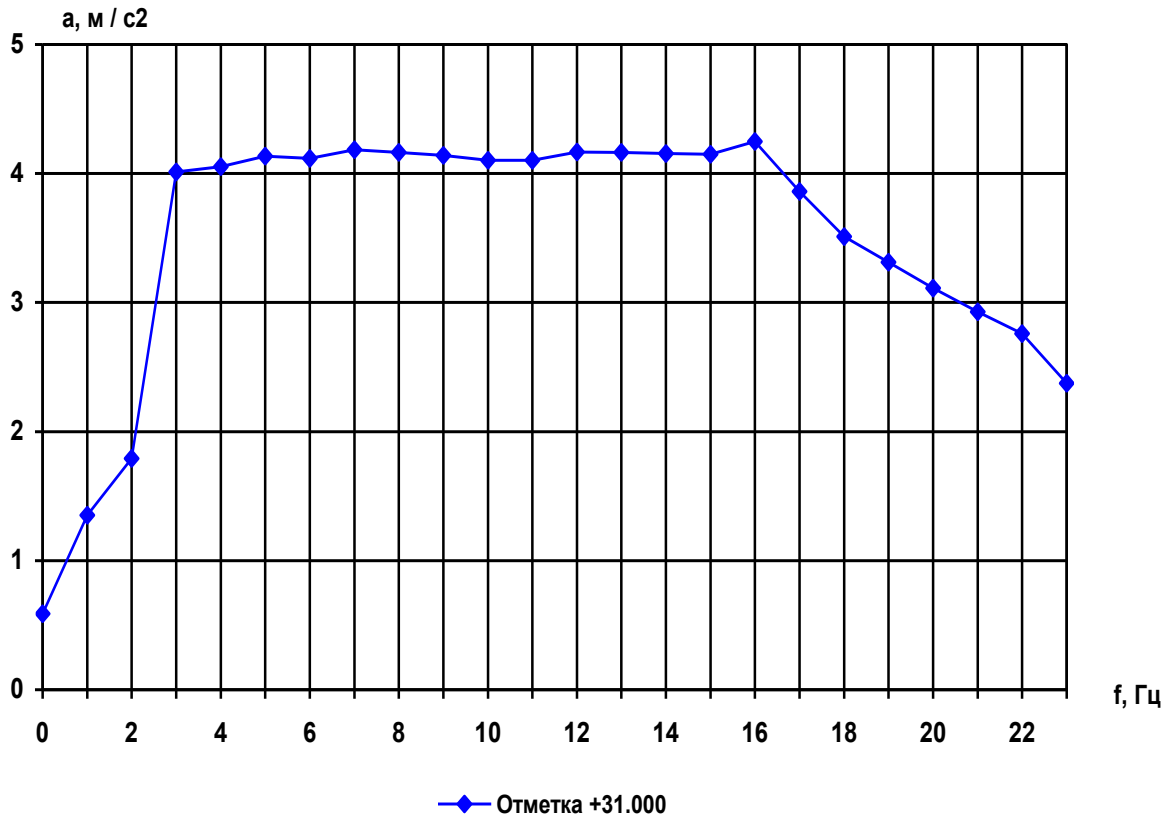


Рисунок 3. 7 – Узагальнені спектри відповіді вертикальних коливань на позначці +31.000. МРЗ = 7 балів.

Таким чином, основний результат кваліфікації ДМАБ гранично допустимого сейсмічного впливу на БРУ-А (МРЗ=7 балів) істотно відрізняється від результатів проектної кваліфікації - МРЗ=6 балів. Основними причинами цих розбіжностей можуть бути:

- неідентичність властивостей міцності металу в проектній та ДМАБ кваліфікаціях, що визначає розбіжності в умовах міцності.

- розбіжності у методичному забезпеченні розрахункових коштів/у нодалізації розрахункових моделей/у прийнятих припущеннях моделювання проектної та ДМАБ кваліфікаціях (негативні ефекти «відмінності розрахункових коштів/кодів» та/або «відмінності користувачів розрахунковими засобами/кодами»).

- неідентичність граничних умов розрахункового моделювання. Так, для прикладу, відповідно до встановлених для проммайданчика ЗАЕС залежностей між

визначальними параметрами рівня (потужності) землетрусів діапазон значень “відгуку” прискорень сейсмічних впливів на поверхні ґрунту - 0,02g...0,2g для МРЗ=6 балів; а МРЗ = 7 балів - 0,04g...0,6g. Тому могли бути розбіжності в граничних умовах розрахункового моделювання за визначальним параметром прискорень сейсмічних впливів на поверхні ґрунту; відповідно і розбіжності у консервативності граничних умов. З іншого боку, у проєктній кваліфікації сейсмічне вплив МРЗ = 6 балів моделювалося як НУЕ і ННУЭ, а кваліфікації сейсмічне вплив МРЗ = 7 балів як аварії з між контурними течами. В аварійних режимах динамічні навантаження на БРУ-А можуть бути більшими, ніж в умовах НУЕ/ННУЕ навіть за ідентичних МРЗ. Тому результати кваліфікації ДМАБ у цьому питанні можна визнати суперечливими та недостатньо обґрунтованими.

Висновки до розділу 3

1. Проведений аналіз зовнішніх екстремальних впливів (ВЕВ) серійного енергоблоку з ВВЕР-1000 встановив:

- недостатньо обґрунтовано виключено вплив на безпеку ЕУ ВЕВ з падінням великих/вибухонебезпечних об'єктів та затопленням проммайданчика АЕС на підставі уроків Фукусімської аварії та поточних екстремальних умов експлуатації атомної енергетики України

- недостатньо обґрунтовані ймовірності (частоти) виникнення гранично допустимих для безпеки ЕУ землетрусів та смерчів на підставі уроків Фукусімської аварії та сучасних результатів реального стану сейсмонебезпечності та смерченебезпечності районів розташування АЕС України

- суттєвий вплив на ймовірнісні показники безпеки ЕУ відмов БРУ-А в умовах запроєктних аварій з внутрішніми вихідними аварійними подіями (ІСА) та сейсмічними впливами з урахуванням консервативно обґрунтованих оцінок тривалості аварії та ймовірності (частоти) виникнення гранично допустимих для безпеки ЯАЗУ.

2. Проведений порівняльний аналіз результатів проектної та «пост-фукусімської» кваліфікації надійності БРУ-А серійного енергоблоку з ВВЕР-1000 в умовах гранично допустимого для безпеки ЕУ сейсмічного впливу встановив, що гранично допустимий сейсмічний вплив на БРУ-А рівня 7 балів за шкалою MSK (обґрунтовано стосовно результатів проектної кваліфікації гранично допустимого сейсмічного впливу рівня 6 балів внаслідок не ідентичності граничних умов розрахункової кваліфікації, а також можливого впливу на результати кваліфікації негативних ефектів «відмінності розрахункових засобів (кодів) кваліфікації»/»відмінності користувачів розрахунковими засобами (кодами)».

РОЗДІЛ 4**МЕТОДИ КВАЛІФІКАЦІЇ НАДІЙНОСТІ БРУ-А В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ
УМОВАХ НЕКВАЛІФІКОВАНИХ ЕКСПЛУАЦІЙНИМИ
ВИПРОБУВАННЯМИ РЕЖИМІВ****4.1 Метод адаптації результатів експериментальної кваліфікації
надійності БРУ-А до умов режимів двофазних потоків**

БРУ-А є основним елементом СРД ПГ та критичною системою безпеки для переважної більшості ІСА в ЕУ з ВВЕР (див. розділи 1.2).

У разі проектних аварій (ПА) спрацьовування БРУ-А (відкриття/закриття клапанів) відбувається у проектних режимах течії у проточної частини клапанів парової фази. Експериментальна кваліфікація надійності відкриття/закриття клапанів регламентована щорічними експлуатаційними випробуваннями (ЕВ) на паровій фазі у процесі ППР енергоблоків.

В умовах запроектних аварій (ЗПА) режими перебігу двофазного потоку в проточній частині клапанів можливі у процесі наступних домінантних для безпеки ЕУ груп запроектних ІСА (див. розділ 3):

- ІСА «Течі реакторного контуру в гермооб'єм (ГО) та відмови систем контролю тиску та рівня теплоносія в реакторі»;
- ІСА «Міжконтурні течі в ПГ і відмови від аварійної ізоляції живильного трубопроводу ПГ».

Найбільш критична для безпеки відмова від закриття після відкриття клапанів БРУ-А, тому що така відмова не дублюється спрацьовуванням інших елементів СРД ПГ (ПК ПГ та БРУ-К).

Можливість експериментальної кваліфікації закриття БРУ-А у некваліфікованому режимі двофазного потоку шляхом ЕВ практично виключена, т.к. у цьому випадку можуть виникнути запроектні умови ядерних та радіаційних аварій. Проте експериментальна кваліфікація надійності відкриття/закриття клапанів БРУ-А принципово можлива на модельних стендах.

Експериментальна кваліфікація шляхом проведення випробувань на парі, пароводяній суміші та воді була проведена для клапанів БРУ-А серії 936-150/250-Е, встановлених в АЕС «Моховці» (ВВЕР-440), на модельному стенді FRAMATOM та представлена у звіті «Qualification of the Secondary Relies Valve for Water Discharge operation: EEXDC 0038E» [1]. Як кваліфікований клапан був БРУ-А 936-150/250-Е, який також встановлено використовуваний на АЕС з ВВЕР 440 на енергоблоках № 1 і № 2 Рівненської АЕС).

Клапан БРУ-А серії 936-150/250-Е є запірно-дросельним клапаном. Клапани встановлені на горизонтальних ділянках паропроводів у положенні штоком нагору, приєднані до трубопроводу за допомогою зварювання. БРУ-А складається із запірно-дросельного клапана з електродвигуном і двох послідовно встановлених дросельних ґрат. Основні технічні характеристики БРУ-А представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Технічні характеристики БРУ-А серії 936-150/250-Е

Найменування параметру		Тип клапану 936-150/250-Е
Розрахункові (максимальні) параметри	тиск, МПа (кгс/см ²)	7,8 (80)
	температура, °С	300
Робочі параметри	тиск, МПа (кгс/см ²)	5,9 (60)
	температура, °С	275
Максимальний момент, що крутить, на шпинделі, Н·м		880
Потужність електродвигуна, кВт		4.5
Хід штока, мм		75
Час відкриття електроприводом, с		11
Витрата пари, т/год		200

Конструкційне креслення та приєднувальні параметри БРУ-А 936-150/250-Е наведено на рис. 4.1 та у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Приєднувальні розміри БРУ-А

Тип	Приєднувальний розмір, мм					
	H	L	D1	D2	D3	D4
936-150/250-E	1770	650	142	180	244	280

Хронологія проведення єдиного експерименту стенду FRAMATOM щодо кваліфікації надійності клапана БРУ-А цієї серії в режимі двофазного потоку наведена далі [1]:

1) Підсистема подачі та встановлення параметрів робочого середовища забезпечувала досягнення тиску до уставки спрацьовування БРУ-А на відкриття (7,3 МПа) та відповідної температури насичення води.

2) Відкриттям клапана БРУ-А забезпечувалося зниження тиску та відповідне закипання води в системі з подальшим перебігом двофазного потоку в проточній частині клапана БРУ-А протягом 10 сек.

3) Через 10 секунд - успішне закриття клапана БРУ-А

На основі результату цього експерименту було зроблено висновок про успішну експериментальну кваліфікацію БРУ-А 936-150/250-E при витіканні води/пароводяної суміші.

Міжнародними стандартами QME-ASME встановлено основні вимоги до результатів експериментальної кваліфікації надійності систем/устаткування ЕУ [1]. Одна з основних вимог – досить обґрунтована адаптація результатів експериментальної кваліфікації до реальних (натурних) умов ЕУ. Забезпечення умов цієї вимоги може бути кваліфіковано детерміністичним методом адаптації експериментальних результатів модельних стендів до реальних умов ЕУ на основі критеріїв подібності до термодинамічних процесів в експериментальних та натурних умовах (АП-метод) [106].

Основні положення АП-методу БРУ-А

1. Для досить обґрунтованої адаптації результатів експериментальної кваліфікації БРУ-А ВВЕР 440, отримані на модельному стенді FRAMATOM, натурні умови спрацьовування БРУ-А ВВЕР 1000/В-320 з двофазним середовищем необхідно встановити загальні критерії подібності термодинамічних процесів, засновані на математичних моделях двофазних потоків у проточній частині клапанів БРУ-А.

2. Розробка узагальнених критеріїв термодинамічної подоби БРУ-А в натурних та експериментальних умовах заснована на загальних положеннях теорії термодинамічної подоби в системах і нерівноважної математичної моделі двофазних потоків, де засновані сучасні детерміністичні коди (ДК) моделювання аварійних процесів в ЕУ [1 - 23].

3. Модель проточної зони БРУ-А при повному відкритті представлена на рис. 4.2.

Проточна частина БРУ-А умовно розділена в одновимірному наближенні на вхідну (I) та вихідну камери (II). Умовною межею поділу камер є переріз із мінімальною площею прохідного перерізу F_{min} .

4. Зовнішніми втратами тепла та силою гравітації двофазного потоку у проточній частині клапану БРУ-А нехтується.

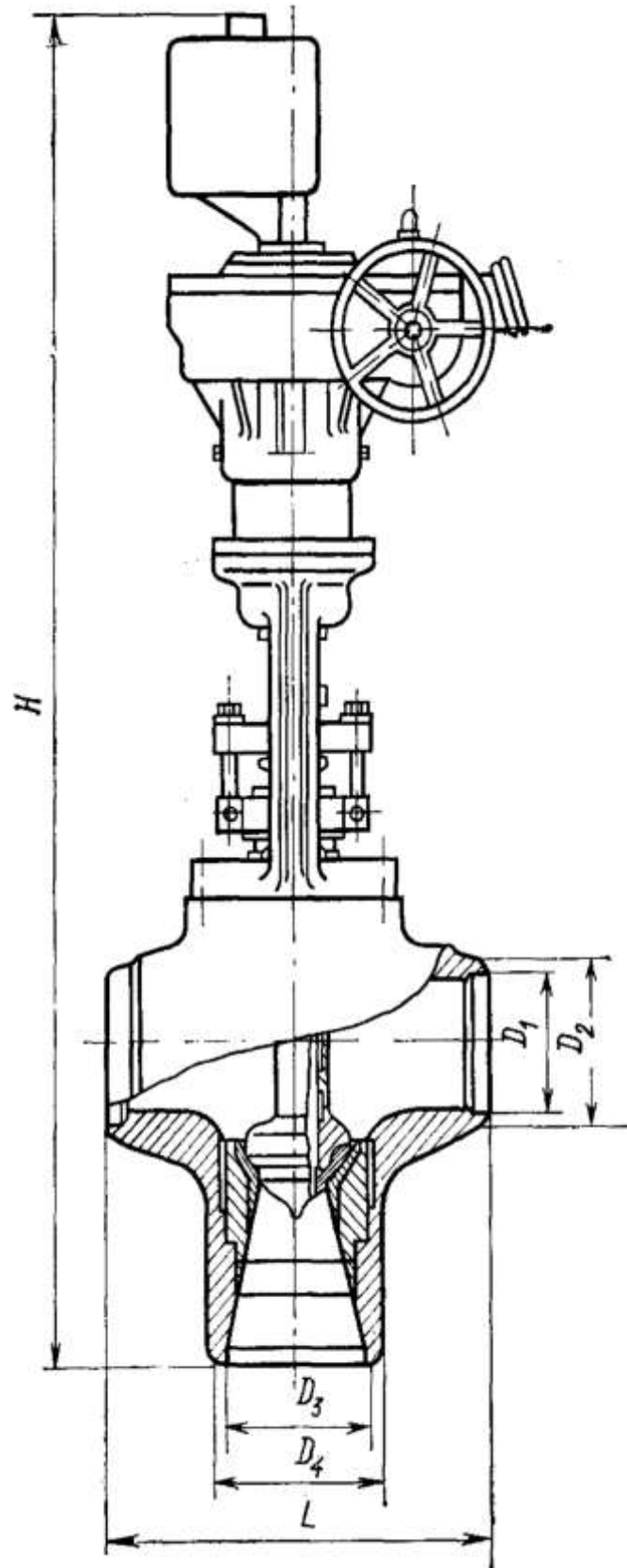


Рисунок 4.1 – Креслення запірно-дросельного клапану серій 936-150/250-Е

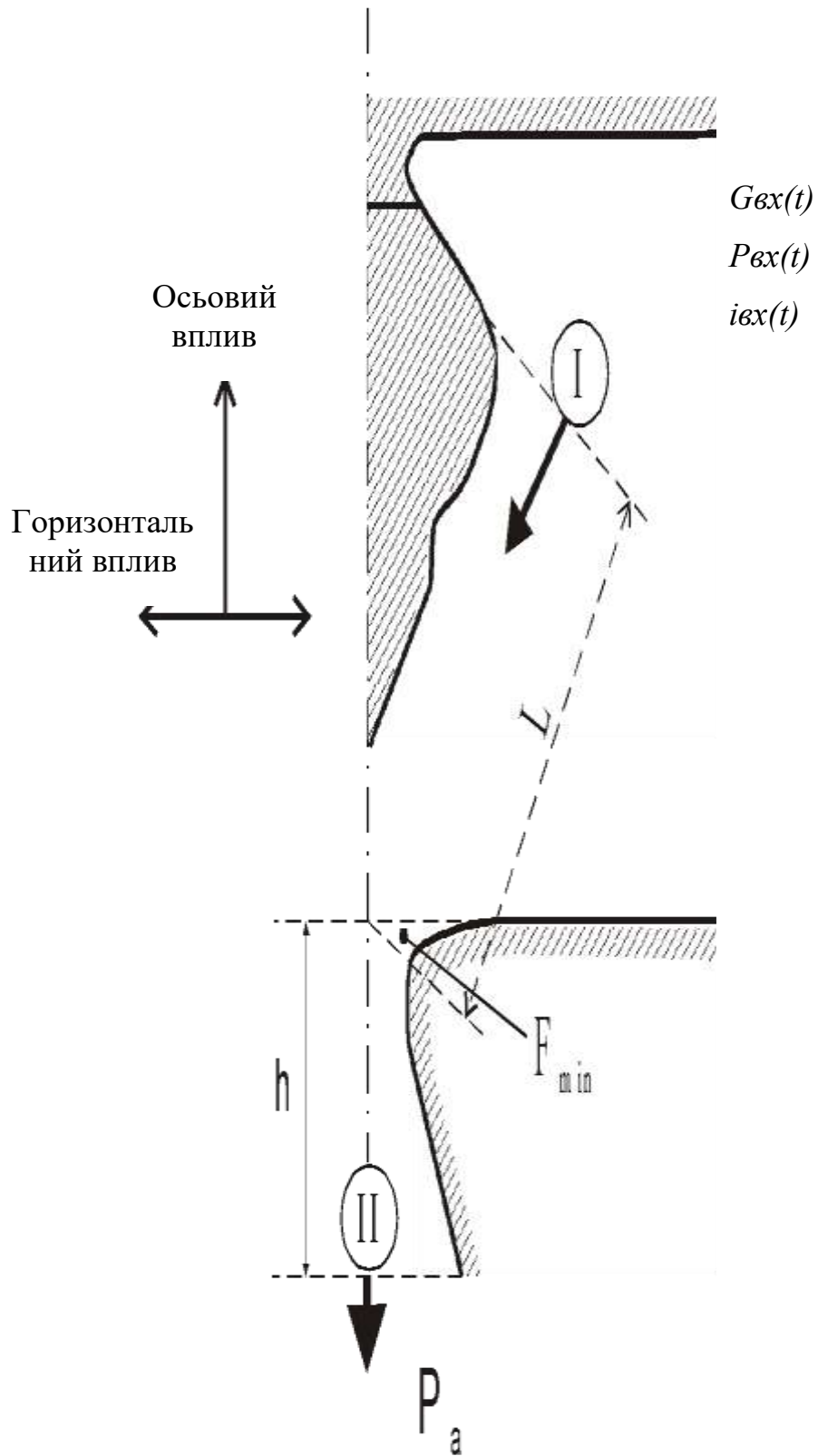


Рисунок 4.2 - Модельна схема проточної частини клапану БРУ-А при повному відкритті

Тоді, з урахуванням прийнятих положень/допущень математична модель нерівноважного двофазного потоку у проточній частині БРУ-А в одновимірному наближенні:

$$F \frac{\partial \rho_{ж} \varphi_{ж}}{\partial t} + F \frac{\partial \rho_{п} \varphi_{п}}{\partial t} + \frac{\partial G_{ж}}{\partial z} + \frac{\partial G_{п}}{\partial z} = 0, \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} & \rho_{п} F \varphi_{п} \frac{\partial W_{п}}{\partial t} + \rho_{ж} F \varphi_{ж} \frac{\partial W_{ж}}{\partial t} + G_{п} \frac{\partial W_{п}}{\partial z} + G_{ж} \frac{\partial W_{ж}}{\partial z} = \\ & = -\xi \frac{G^2 \Pi_{см}}{8 \rho F^2} - F \frac{\partial P}{\partial z} + \Gamma_{п} F (W_{п} - W_{ж}), \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$F \frac{\partial}{\partial t} [\rho_{ж} \varphi_{ж} i_{ж} + \rho_{п} \varphi_{п} i_{п}] + \frac{\partial G_{п} i_{п}}{\partial z} + \frac{\partial G_{ж} i_{ж}}{\partial z} = F \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (4.3)$$

$$F \frac{\partial \rho_{п} \varphi_{п}}{\partial t} + \frac{\partial G_{п}}{\partial z} = F \Gamma_{п}, \quad (4.4)$$

де $\rho_{ж}$, $\rho_{п}$ – щільність рідини та пари відповідно;

G , $G_{п}$, $G_{ж}$ – відповідно масова витрата суміші, пари та рідини ($G = G_{п} + G_{ж}$;
 $x = G_{п}/G$);

$W_{п}$, $W_{ж}$ – середня за перерізом швидкість пари та рідини;

z , t - поздовжня координата і час;

P – тиск теплоносія;

ξ – наведений коефіцієнт гідродинамічних втрат;

$\Pi_{см}$ - змочений периметр перерізу проточної частини;

$i_{ж}$, $i_{п}$ – питома ентальпія рідини та пари відповідно;

F - площа прохідного перерізу проточної частини;

$\Gamma_{п}$ - наведена на одиницю площі інтенсивність міжфазного теплообміну.

Початкові умови:

$$\begin{aligned} G(0, z) &= G_0 \\ P(0, z) &= P_0, \\ i(0, z) &= i_0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Граничні умови для вхідної камери:

$$\begin{aligned} G(t, 0) &= G_{вх}(t); \\ P(t, 0) &= P_{вх}(t); \\ i(t, 0) &= i_{вх}(t). \end{aligned} \quad (4.6)$$

Граничні умови для вихідної камери:

$$\begin{aligned} G(t, L) &= GL; \\ P(t, L) &= PL; \\ i(t, L) &= iL; \\ P(t, h) &= P_a. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Відповідно до загальноприйнятих положень теорії подоби термодинамічних процесів для визначення критеріїв подібності введемо масштабний параметр кожної незалежної змінної V_m ($\bar{V} = V/V_m$ – безрозмірний параметр змінної). Тоді рівняння (4.1) - (4.4) у безрозмірному вигляді матимуть такий вигляд:

$$\begin{aligned} K_1 \bar{F} \frac{\partial \bar{\rho}_{ж} \bar{\varphi}_{ж}}{\partial \bar{t}} + K_2 \bar{F} \frac{\partial \bar{\rho}_{п} \bar{\varphi}_{п}}{\partial \bar{t}} + K_3 \frac{\partial \bar{G}_{ж}}{\partial \bar{Z}} + \frac{\partial \bar{G}_{п}}{\partial \bar{Z}} &= 0, \\ K_4 \bar{\rho}_{п} \bar{\varphi}_{п} \bar{F} \frac{\partial \bar{W}_{п}}{\partial \bar{t}} + K_5 \bar{\rho}_{ж} \bar{\varphi}_{ж} \bar{F} \frac{\partial \bar{W}_{ж}}{\partial \bar{t}} + K_6 \bar{G}_{п} \frac{\partial \bar{W}_{п}}{\partial \bar{Z}} + \bar{G}_{ж} \frac{\partial \bar{W}_{ж}}{\partial \bar{Z}} &= \\ = -K_7 \frac{\bar{\xi} \bar{G}^2 \bar{\Pi}_{см}}{8 \bar{\rho} \bar{F}^2} - K_8 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{Z}} \bar{F} + K_{13} \bar{F} \bar{\Gamma}_{п} \bar{W}_{п} + K_{14} \bar{F} \bar{\Gamma}_{п} \bar{W}_{ж}, & \\ K_9 \bar{F} \frac{\partial (\bar{\rho}_{ж} \bar{\varphi}_{ж} \bar{i}_{ж})}{\partial \bar{t}} + K_{10} \bar{F} \frac{\partial (\bar{\rho}_{п} \bar{\varphi}_{п} \bar{i}_{п})}{\partial \bar{t}} + K_{11} \frac{\partial (\bar{G}_{п} \bar{i}_{п})}{\partial \bar{Z}} + \frac{\partial (\bar{G}_{ж} \bar{i}_{ж})}{\partial \bar{Z}} &= K_{12} \bar{F} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{t}}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$K_{15} \bar{F} \frac{\partial \bar{\rho}_{II} \bar{\Phi}_{II}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \bar{G}_{II}}{\partial Z} = K_{16} \bar{F} \bar{\Gamma}_{II} \quad (4.9)$$

де критерії подібності мають вигляд:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{F_M \rho_M Z_M}{G_M t_M}, \\ K_2 &= \frac{F_M \rho_{II} Z_M \Phi_{II}}{G_{II} t_M}, \\ K_3 &= \frac{F_M Z_M \Gamma_{II}}{G_{II}}, \\ K_4 &= \frac{Z_M G_{II}}{G_{JM} t_M W_{JM}}, \\ K_5 &= \frac{Z_M}{t_M W_{JM}}, \\ K_7 &= \frac{\xi_M G_M^2 \Pi_{сшМ} Z_M}{\rho_M F_M^2 G_{JM} W_{JM}}, \\ K_8 &= \frac{F_M P_M}{G_{JM} W_{JM}}, \\ K_9 &= \frac{F_M \rho_{II} Z_M \Phi_{II} i_{II}}{G_{JM} t_M i_{JM} \Phi_{JM}}, \\ K_{10} &= \frac{F_M \rho_{II} Z_M \Phi_{II} i_{II}}{G_{JM} t_M i_{JM} \Phi_{JM}}, \\ K_{12} &= \frac{F_M Z_M P_M}{t_M G_{JM} i_{JM}}, \\ K_{13} &= F_M \Gamma_{II} W_{II}, \\ K_{14} &= F_M \Gamma_{II} W_{JM}, \\ K_{15} &= \frac{F_M \rho_{II} Z_M \Phi_{II}}{G_{II} t_M}, \\ K_{16} &= \frac{F_M Z_M \Gamma_{II}}{G_{II}}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Умова забезпечення подібності термодинамічних процесів у натурних та експериментальних умовах:

$Kn \equiv 1$, де $n = 1, \dots, 16$.

Для вирішення (4.10) можна задати відомі масштаби:

$Z_M = L + h$ - довжина проточної частини клапана БРУ-А;

$F_M = F(z)$ - поточна площа прохідного перерізу;

$\Pi_{cm} = \Pi_{cm}(z)$ – поточний периметр прохідного перерізу;

$G_M = G_0$ - пропускна здатність БРУ-А;

$P_M = P_0$ - уставка спрацьовування на відкриття БРУ-А;

$i_{PM} = i_P(P_0) = i_{P0}$; $i_{JM} = i_J(P_0) = i_{J0}$;

$\rho_{PM} = \rho_P(i_{P0}, P_0) = \rho_{P0}$; $\rho_{JM} = \rho_J(i_{J0}, P_0) = \rho_{J0}$;

$\varphi_{PM} = 1$; $\varphi_{JM} = 1$.

Пропускна здатність G_0 є технічною характеристикою БРУ-А та визначається за результатами передексплуатаційних та експлуатаційних випробувань/експериментів.

Тоді з умов (4.10) йдуть і інші масштаби незалежних змінних:

$$t_M = \frac{F(z)Z_M\rho_{J0}}{G_0}; \quad W_{PM} = \frac{G_0}{F(z)Z_M\rho_{J0}}; \quad G_{PM} = G_0 \frac{\rho_{P0}}{\rho_{J0}}; \quad (4.11)$$

$$\Gamma_M F_M = \frac{G_0\rho_{P0}}{Z_M\rho_{J0}}; \quad W_{JM} = \frac{G_0}{F(z)\rho_{J0}}; \quad G_{JM} = \frac{\rho_{P0}}{\rho_{J0}} G_0.$$

З урахуванням заданих та отриманих масштабів, а також початкових та граничних умов остаточно отримаємо наступні узагальнені умови подоби тірмодинамічних процесів у натурних та експериментальних умовах БРУ-А:

$$\Pi_1 = \frac{\rho_{P0}}{\rho_{J0}} \equiv idem \quad (4.12)$$

$$\Pi_2 = \sqrt{\frac{F_0 \sqrt{2\rho_{P0}\Delta P}}{G_0}} \cdot \frac{\Pi_{cm}(z)Z_M}{F(z)} \equiv idem \quad (4.13)$$

$$\Pi_3 = \frac{P_0 F^2(z) \rho_{ж0}}{G_0^2} \equiv idem \quad (4.14)$$

$$\Pi_4 = \frac{i_{л0}}{i_{ж0}} \equiv idem \quad (4.15)$$

$$\Pi_5 = \frac{P_0}{\rho_{ж0} i_{ж0}} \equiv idem \quad (4.16)$$

$$\Pi_6 = \frac{P_{BX}}{P_0} \equiv idem \quad (4.17)$$

$$\Pi_7 = \frac{i_{BX}}{i_0} \equiv idem \quad (4.18)$$

$$\Pi_8 = \frac{G_{BX}}{G_0} \equiv idem \quad (4.19)$$

$$\Pi_9 = \frac{G_L}{G_0} = idem \quad (4.20)$$

$$\Pi_{10} = \frac{P_L}{P_0} = idem \quad (4.21)$$

$$\Pi_{11} = \frac{i_L}{i_0} = idem \quad (4.22)$$

$$\Pi_{12} = \frac{P_a}{P_0} = idem \quad (4.23)$$

Аналіз встановлених умов термодинамічної подоби (4.12) - (4.23) у БРУ-А ЕУ з ВВЕР та модельного стенду FRAMATOM дозволяє зробити наступні коментарі.

1. Об'єктивна оцінка здійсненності всіх умов термодинамічної подібності не представляється можливою внаслідок відсутності експериментальної даних про витрату (швидкості) потоку і пароутриманні на вході в проточну частину клапана, а також про протитиск на виході з проточної частини клапану; т.к. визначальний параметр надійності закриття клапана - динамічний натиск тиску на робочий орган клапану, що залежить від щільності двофазного потоку (а відповідно від паровмісту) і від квадрата швидкості потоку, що «набігає» (а відповідно від швидкості потоку на вході в проточну частину клапану).

2. Для запроектних аварій із вимушеним переповненням ПГ режим двофазного потоку з різним рівнем паровмісту на вході в проточну частину клапана БРУ-А буде основним. Тому відсутність експериментальної інформації про паровміст потоку на вході в проточну частину клапана не виключає можливість проведення єдиного експерименту в умовах «вологої» пари в проточній частині клапану БРУ-А.

3. У загальному випадку конструкційно-технічні характеристики БРУ-А ЕУ з ВВЕР-1000 відрізняються від БРУ-А ЕУ з ВВЕР-440 (див. розділ 1), що також визначає необґрунтованість адаптації результатів експериментальної кваліфікації модельного стенду FRAMATOM до аварійних умов ЕУ ПГ.

На основі цих коментарів можна зробити висновок про недостатність результатів експериментальної кваліфікації надійності закриття клапану БРУ-А в режимі двофазного потоку для їх обґрунтованої адаптації до аварійних умов ЕУ як з ВВЕР-440, так і з ВВЕР-1000.

4.2 Метод розрахунково-експериментальної кваліфікації надійності БРУ-А за умов режимів двофазного потоку

Актуальність розрахункової кваліфікації надійності БРУ-А в умовах запроектних режимів двофазного потоку визначається такими положеннями:

В результаті проведеного в розділі 3 аналізу встановлено, що некваліфікований експлуатаційними випробуваннями режим двофазного потоку в проточній частині БРУ-А може виникнути в наступних домінуючих для безпеки ЕУ груп запроектних аварій:

– ІСА «Течі реакторного контуру в гермооболонці ЕУ та відмови систем регулювання тиску в реакторному контурі»;

– ІСА «Міжконтурні течі в обсягах парогенератора та відмови аварійної ізоляції підживлення ПГ турбо-живильним насосом (ТПН)».

1. Відомі результати експериментальної кваліфікації надійності закриття клапанів БРУ-А в режимі двофазного потоку, наведені в розділі 5.1, недостатні для обґрунтованої їх адаптації до аварійних режимів запроєктних аварій ЕУ з ВВЕР.

2. Проведений у роботах [1, 24 - 28] аналіз відомих результатів галузевих програм кваліфікації надійності систем, важливих для безпеки (СВБ) ЕУ з ВВЕР в аварійних умовах, встановив:

- необґрунтованість ймовірнісних методів розрахункової кваліфікації надійності СВБ в аварійних умовах

- відсутність досить обґрунтованих детерміністичних методів розрахункової кваліфікації надійності закриття клапанів БРУ-А в режимі двофазного потоку.

У розділі розроблено детерміністичний розрахунково-експериментальний метод кваліфікації надійності закриття клапанів БРУ-А як двофазного потоку [109].

Основні положення та припущення методу

1. Визначальний параметр кваліфікації - динамічні навантаження потоку робочий орган (шток) при закритті клапана БРУ-А.

2. Режим парового потоку в проточній частині клапану БРУ-А належить кваліфікованим щорічним експлуатаційним випробуванням, технічним обслуговуванням та ремонтом.

3. Умови успішної кваліфікації - динамічні навантаження шток двофазного потоку (на вході в проточну частину клапана) не перевищують динамічні навантаження шток експериментально кваліфікованих режимів парового потоку.

4. Розрахункова модель формування динамічних навантажень парового/двофазного потоків на шток представлена на рис. 4.2. Проточна частина клапана умовно поділена на три зони:

- конфузорна (вхідна) зона потоку;
- зона робочого органу (штока) клапана з мінімальною площею прохідного перерізу потоку;
- дифузорна (вихідна) зона.

5. Термодинамічні моделі формування динамічних навантажень парового/двофазного потоків консервативно прийняті в одновимірному та квазістаціонарному наближеннях

6. Конструкційно-технічні характеристики клапанів БРУ-А ВВЕР-1000 представлені у розділі 1.

7 Динамічні впливи, що перешкоджають виконанню функції закриття клапана, можна умовно розділити як осьові та горизонтальні дії на шток клапана (рис. 4.2).

Для осьових динамічних впливів умови кваліфікації:

$$SD(\rho) \leq SD(\rho\Pi) \quad (4.24)$$

Для горизонтальних впливів умови кваліфікації:

$$SH(\rho) \leq SH(\rho\Pi) \quad (4.25)$$

де SD - динамічне навантаження подолання перепаду тиску за висотою штока;

S_H - динамічне навантаження «набігаючого» потоку на шток;

$\rho, \rho\Pi$ - щільність двофазного потоку та пари відповідно.

Максимальні динамічні осьові навантаження можуть бути наслідком трансзвукових режимів потоку в зоні розташування штока з мінімальною площею прохідного перерізу потоку (рис. 5.2). У разі трансзвукових режимів середня швидкість потоку відповідає швидкості звуку потоці (критерій Маха: $M=1$). Внаслідок трансзвукового режиму формуються умови імпульсної термодинамічної нестійкості [1, 2] - відбувається імпульсне гальмування потоку, при якому кінетична енергія гальмування потоку переходить в імпульсне збільшення внутрішньої енергії потоку з імпульсним збільшенням локального тиску і конденсацією парової фази.

Максимальні осьові динамічні навантаження на шток внаслідок трансзвукових режимів:

$$S_D = \Delta P, \quad (4.26)$$

де ΔP – амплітуда імпульсу тиску «гідродинамічного удару» в зоні мінімального перерізу проточної частини клапану [18, 19].

Максимальні горизонтальні динамічні навантаження визначаються динамічним тиском «набігаючого» на шток потоку, який залежить від щільності та середньої швидкості «набігаючого» потоку (W):

$$S_H = \rho W. \quad (4.27)$$

Тоді, з урахуванням прийнятих положень та припущень критерії та умови кваліфікації надійності закриття БРУ-А у режимі двофазного потоку

$$K_D = \left| \frac{\Delta P}{\Delta P_{II}} \right| \leq 1 \quad (4.28)$$

$$K_{SH} = \frac{\rho W^2}{\rho_{II} W_{II}^2} \leq 1 \quad (4.29)$$

Таким чином, кваліфікація надійності закриття клапанів БРУ-А в режимі двофазного потоку зводиться до визначення параметрів експериментально кваліфікованого експлуатаційними випробуваннями (ЕВ) потоку пари та експериментально некваліфікованого двофазного потоку в конфузорній (вхідній) частині проточної ділянки клапану.

Термодинамічні моделі парового та двофазного потоку в проточних зонах клапана БРУ-А

З урахуванням прийнятих консервативних припущень рівняння збереження парового однофазного потоку в нестационарних умовах мають такий вигляд:

$$F(z) \frac{\partial \rho_{II}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{II} W_{II} F(z)}{\partial z} = 0 \quad (4.30)$$

$$\rho_{II} F(z) \frac{\partial W_{II}}{\partial t} + G_{II} \frac{\partial W}{\partial z} = -\xi \frac{G_{II} \Pi_C(z)}{8 \rho_{II} F^2(z)} - F(z) \frac{\partial P}{\partial z} \quad (4.31)$$

$$i_{II} = i_{II}(P), \quad \rho_{II} = \rho_{II}(P) \quad (4.32)$$

$$P(t, 0) = P_{BX}(t) \quad (4.33)$$

$$P(0, z) = P_0(z) \quad (4.34)$$

$$P(t, h) = P_a(t) \quad (4.35)$$

$$G_{II}(0, z) = G_0(t) \quad (4.36)$$

де ρ_{II} , W_{II} , G_{II} , i_{II} – відповідно щільність, швидкість, витрата та питома ентальпія пари; P – тиск; t , z – час та поточна координата; ξ – наведений коефіцієнт тертя; $F(z)$, $\Pi_C(z)$ – площа та периметр прохідного перерізу.

У квазі-стаціонарних умовах (при фіксованому положенні штока) рівняння (4.30) - (4.36) перетворюються на систему нелінійних рівнянь щодо градієнтів середньої швидкості парового потоку та тиску в конфузорній зоні:

$$\frac{dW_{II}}{dz} = -W_{II} \frac{\frac{dF(z)}{dz} + \xi \frac{\Pi_C(z)}{8}}{(1 - M^2) F(z)} \quad (4.37)$$

$$\frac{dP}{dz} = \rho_{II} W_{II}^2 \frac{\frac{dF(z)}{dz} - \xi \frac{\Pi_C(z)}{8}}{(1 - M^2) F(z)} \quad (4.38)$$

$$P(z = 0) = P_{BX} \quad (4.39)$$

$$W_{II}(z = 0) = G_{II}(0) / (\rho_{II} F_0) \quad (4.40)$$

$$P(z = h) = P_a \quad (4.41)$$

де критерій Маха для потоку пари:

$$M = \frac{W_{II}}{a_{II}} \quad (4.42)$$

а швидкість звуку в парі

$$a_{II} = \sqrt{\frac{dP}{d\rho_{II}}} \quad (4.43)$$

Гомогенна рівноважна модель двофазного потоку у квазістаціонарному та одновимірному наближенні у конфузійній зоні клапану БРУ-А:

$$\frac{dW}{dz} = -W \frac{\frac{dF}{dz} + \xi_{\partial} \frac{\Pi_C(z)}{8}}{(1-M^2)F(z)} \quad (4.44)$$

$$\frac{dP}{dz} = \rho W^2 \frac{\frac{dF(z)}{dz} - \xi_{\partial} \frac{\Pi_C(z)}{8}}{(1-M^2)F(z)} \quad (4.45)$$

$$\frac{dX}{dz} = \frac{-\left[\frac{di'}{dp}(1-x) + \frac{di''}{dp}x\right]}{[i'' - i']} \rho W^2 \frac{\frac{dF(z)}{dz} - \xi_{\partial} \frac{\Pi_C(z)}{8}}{(1-M^2)F(z)} \quad (4.46)$$

$$W(z=0) = G_0 / \rho F_0 \quad (4.47)$$

$$P(z=0) = P_{Bx} \quad (4.48)$$

$$x(z=0) = x_0 \quad (4.49)$$

$$P(z=h) = P_a \quad (4.50)$$

де W – середньомасова швидкість двофазного потоку;

ξ_{∂} – наведений коефіцієнт тертя для двофазного потоку;

$\rho = \rho'(1-\varphi) + \rho''\varphi$ - щільність потоку;

i', i'' – відповідно питома ентальпія рідини та пари;

x - масовий паровміст;

$M = W / \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}$ – критерій Маха для двофазного потоку;

φ - справжній об'ємний паровміст.

Аналіз результатів кваліфікації

Інтегрування диференціальних нелінійних рівнянь виду (4.37) - (4.41) та (4.44) - (4.50) виконано за допомогою методу Рунге-Кутта для модифікацій БРУ-А ВВЕР-1000 (див. розділ 1) при заданих граничних умовах:

- значення паровмісту потоку від 0 (однофазна вода на вході в клапан) до 1 (однофазна пара на вході до клапану);
- відносна мінімальна площа прохідного перерізу від 100 % (повністю відкритий клапан) до 0 % (закритий клапан).

Встановлено на основі одержаних результатів розрахунків:

1. У всьому діапазоні зміни граничних умов для обох модифікацій БРУ-А ВВЕР-1000 у зоні розміщення штока спостерігається «парове» або «низько вологе» парове середовище.

Отриманий результат можна інтерпретувати наступним чином:

- у конфузорній ділянці через локальне зменшення площі прохідного перерізу потік прискорюється, а його середня швидкість зростає, досягаючи максимального значення в перерізі з найменшою площею (див. рис. 4.2);
- унаслідок локального прискорення потоку в конфузорній зоні тиск зменшується і досягає мінімального значення в перерізі з найменшою площею, що за відсутності трансзвукового режиму відповідає атмосферному тиску;
- унаслідок значного зниження тиску в конфузорній зоні (від 7,8 МПа до 0,1 МПа) відбувається інтенсивне закипання потоку, що в підсумку визначає кінцевий результат.

Таким чином, умови кваліфікації (4.29) виконуються для всього діапазону розглянутих граничних умов.

2. Режим однофазного водного потоку в зоні штока може виникнути за умови, що температура води на вході до проточних частин клапана БРУ-А є нижчою за 373 К. Теоретично такий режим можливий у випадку запроектої аварії зі «щільним» реакторним контуром і відмовою ізоляції аварійного підживлення парогенератора. Однак аналіз подібних запроектних аварій практично виключає можливість реалізації режиму, за якого температура води на вході до БРУ-А буде нижчою за 373 К.

Трансзвуковий режим у зоні штока може виникати за відносної мінімальної площі прохідного перерізу менше 50%. Водночас щорічні експлуатаційні випробування закриття БРУ-А в паровому режимі не виявили критичного впливу

трансзвукового режиму на процес закриття клапана. Крім того, як було встановлено вище, у всьому діапазоні паровмісту потоку на вході до конфузornoї зони в зоні штока реалізуються умови однофазної або слабководлової пари. Отже, умови кваліфікації (4.28) можна вважати виконаними [112].

Висновки до розділу 4

Розроблено метод адаптації результатів експериментальної кваліфікації надійності БРУ-А у режимах двофазного потоку на модельних установках до умов запроектних аварій у ЕУ ПГ на основі ідентичності критеріїв термодинамічної подібності. На основі розроблених критеріїв термодинамічного проведено аналіз результатів експериментальної кваліфікації надійності закриття клапанів БРУ-А у режимах двофазних потоків, отриманих у модельній установці FRAMATOM, до умов запроектних аварій у ЕУ ПГ. На основі проведеного аналізу встановлено недостатню обґрунтованість результатів експериментальної кваліфікації надійності на закриття БРУ-А в режимах двофазного потоку, отриманих на модельному стенді FRAMATOM, до умов запроектних аварій в ЕУ ПГ.

Розроблено детерміністичний метод розрахунково-експериментальної кваліфікації надійності закриття БРУ-А в режимах однофазного потоку в режимах однофазного потоку з режимами однофазного потоку клапана.

Основні результати розрахунково-експлуатаційної кваліфікації надійності закриття 2-х модифікацій конструкцій БРУ-А полягають у наступному:

- встановлені умови кваліфікації виконуються у всьому діапазоні пароутримань потоку на вході в проточну зону клапана та проміжного положення штока в процесі закриття клапану;

- встановленим умовам кваліфікації не відповідає режим однофазного потоку води на вході в проточну зону клапана з температурою менше 373 К.

РОЗДІЛ 5**МЕТОД КВАЛІФІКАЦІЇ НАДІЙНОСТІ БРУ-А ПРИ МАКСИМАЛЬНИХ
ГІДРО-ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ****5.1 Аналіз допустимих навантажень на шток БРУ-А**

Умови максимальних навантажень під час закриття БРУ-А виникають у режимі течії однофазного водного потоку (ОВП) у проточних зонах клапанів БРУ-А. Необхідна умова режиму ОВП у проточних зонах клапанів БРУ-А – температура водного потоку на вході у проточну зону клапанів БРУ-А менше 373 К.

Консервативний аналіз надійності закриття клапанів БРУ-А у режимі ОВП може бути здійснений на основі консервативного методу кваліфікації надійності БРУ-А ІПП НАН України [1].

Основні припущення та положення консервативного аналізу надійності закриття БРУ-А при максимальних навантаженнях:

- температура водного потоку на вході до проточної зони клапанів БРУ-А менше 373 К (режим ОВП);
- нехтується незворотними втратами потоку у проточній зоні БРУ-А (режим «потенційної» течії).

Кінематична схема БРУ-А є дві послідовно з'єднані передачі – черв'ячну та гвинтову, які забезпечують безповоротне переміщення штока (див. вище рис. 1.6, 1.7).

Для проведення аналізу роботи даної схеми, виходячи з проєктних характеристик двигунів - 797-EP-O (для БРУ-А 1115-300/350-Е) та 876-EP-O (для БРУ-А 960-300/350-Е), у табл. 5.1 наведено вихідні дані для розрахунків.

Таблиця 5.1 Вихідні дані щодо паспорта до електродвигунів 797-EP-O та 876-EP-O

Найменування величини	Позначення	Величина
Потужність двигуна, кВт	N	11,8
Частота обертання валу двигуна, об/хв	$n_{дв}$	1500
Частота обертання вихідного валу, об/хв	$n_{вих}$	40,3 (для 797-EP-O) 42,3 (для 876-EP-O)
Діаметр різьблення, м	D_p	0,07

Розрахунок проєктного зусилля на штоку для переміщення запірною органу від електродвигуна

Моменти на валах редуктора [1]:

$$M_1 = 9,55 \cdot 103(N/n_{дв}) = 75,0 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_2 = M_1 \cdot n_{вих} = 3172,5 \text{ Н}\cdot\text{м.} \text{ – для 876-EP-O}$$

$$M_2 = M_1 \cdot n_{вих} = 3022,5 \text{ Н}\cdot\text{м} \text{ – для 797-EP-O}$$

Зусилля на шток:

$$F = \frac{M_2}{\mu \cdot D_p} = 348626 \text{ Н} = 34 \text{ тс} \quad \text{– для 876-EP-O,}$$

$$F = \frac{M_2}{\mu \cdot D_p} = 332142 \text{ Н} = 33 \text{ тс} \quad \text{– для 797-EP-O}$$

де μ - коефіцієнт, що враховує тертя у гвинтовій передачі

Розрахунок максимального зусилля на шток, необхідного для переміщення запірною органу при максимальному тиску середовища

Повне зусилля на шток, необхідне переміщення запірною органу [1]:

$$Q_n = Q_m + Q_z,$$

де:

- зусилля тертя в сальниковому ущільненні, кгс,

$$Q_m = \pi \cdot D_{ш} \cdot H_c \cdot P_{уд} \cdot \mu ;$$

- осьове зусилля на штоку, необхідне для переміщення запірнього органу, кгс

$$Q_z = Q_{zp} - Q_v;$$

- осьове зусилля на золотник від перепаду тиску, кгс

$$Q_{zp} = \frac{\pi}{4} \cdot P_d \cdot (D_{cp}^2 - D_{ш}^2) ;$$

- виштовхувальне зусилля, що діє на шток, кгс

$$Q_v = \frac{\pi}{4} \cdot D_{ш}^2 \cdot (P^2 - P_d^2) ;$$

- необхідний питомий тиск на набивання сальника, кгс/мм²

$$P_{уд} = \left(\sqrt{P} \cdot \frac{0,02 H_c}{C} \right)^2 ;$$

- середній діаметр ущільнювальних поверхонь, мм

$$D_{cp} = \frac{D_i + D_a}{2} ;$$

- ширина набивання сальникового ущільнення штока, мм

$$C = \frac{D_s + D_{ш}}{2}$$

- коефіцієнт тертя у сальнику

$$\mu = 0,044 P_{уд}^{-1/2};$$

Розрахунок крутного моменту на шпинделі

Крутний момент на втулці шпинделя, Н·м

$$M_k = Q_n \cdot L,$$

де:

- повне зусилля на штоку, необхідне для переміщення запірний орган, кгс

$$Q_n = 31546;$$

- умовне плече моменту

$$L = \frac{D_{sr}}{2} \tan(\alpha_{ln} + \alpha_{lt})$$

– кут нахилу гвинтової лінії, радий

$$\alpha_{ln} = \arctg \left(\frac{Hr \cdot Nzr}{\pi \cdot Dsr} \right)$$

– кут тертя, радий

$$\alpha_{lt} = \arctg (\mu r);$$

– середній діаметр різьблення шпинделя, мм

$$Dsr = Dnr - 0,5Hr;$$

– коефіцієнт тертя у різьбовій парі

$$\mu r = 0,25.$$

Розрахунок стійкості штока

Коефіцієнт запасу по навантаженню на шток, що допускається:

$$N_{доп} = \frac{Q_d}{Q_p} = 2,14;$$

де:

– повне зусилля на штоку (див. вище), кгс (тс):

$$Q_P = Q_M + Q_Z = 31546 (31,5),$$

– навантаження, що допускається на шток, кгс (тс):

$$Q_d = \frac{Q_m}{\nu} = 67523 \cdot (67,5)$$

– мінімальний коефіцієнт запасу стійкості = 2;

– мінімальне критичне навантаження на шток, кгс:

$$Q_M = \min (Q_{упр}, Q_{тек})$$

– критичне навантаження при пружному стані, кгс:

$$Q_{упр} = \frac{\pi^3 \cdot D_{сп}^2 \cdot E}{4 \cdot L_{ам}^2}$$

$L_{ам}$ - гнучкість штока

$$L_{ам} = \frac{\mu_1 \cdot L}{I_m};$$

$\mu_1 = 0,81 - 1,17x + 1,1x^2$ - коефіцієнт наведеної довжини шпинделя;

$x = \frac{\min(L, L - B)}{L}$ - допоміжна величина;

$I_m = \frac{D_{ср}}{4}$ - радіус інерції розрахункового перерізу;

$D_{ср} = \frac{D_{гл} + D_0}{2}$ - середній розрахунковий діаметр штока;

E – модуль пружності матеріалу штока

Критичне навантаження за межами плинності в місці проточки штока, кгс:

$$Q_{тек} = \frac{\pi}{4} \cdot D_0^2 \cdot \sigma_{0,2};$$

де $\sigma_{0,2}$ - межа плинності матеріалу штока, кгс/мм².

5.2 Аналіз надійності БРУ-А при максимальних гідродинамічних навантаженнях

Відповідно до прийнятого консервативного припущення потенційності перебігу режиму ОВП в проточних зонах клапана БРУ-А (відсутність незворотних втрат) потенціал швидкості руху рідини є скалярною функцією радіус-вектору точки простору і часу виду $\Phi = \Phi(x, y, z, t)$

$$\Phi = grad\varphi = \nabla\varphi \quad (5.1)$$

або у проєкціях на осі прямокутної декартової системи координат отримуємо наступні визначальні співвідношення:

$$U_x = \frac{\partial\varphi}{\partial x}; \quad U_y = \frac{\partial\varphi}{\partial y}; \quad U_z = \frac{\partial\varphi}{\partial z}; \quad (5.2)$$

Рівняння стану для баротропного процесу можна записати в наступному вигляді [86 -91, 110]:

$$\frac{p + A}{p_0 + A} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^k, \quad (5.3)$$

$$\text{де } A = \frac{\rho_0 c_0^2}{k}; c_0 = \sqrt{\frac{k p_0}{\rho_0}} .$$

Підставивши співвідношення (5.1) у рівняння руху Ейлера [92-101], отримаємо інтеграл Коші-Лагранжа [102 – 109]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \varphi)^2 + \int \frac{\partial p}{\rho} = C(t) \quad (5.4)$$

При русі рідини зі стану спокою при $\varphi(t = 0) = 0$ і, використовуючи рівняння стану можна визначити C - константу і отримати вираз для тиску

$$p = p_0 - \rho_0 \left[\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \varphi)^2 - \frac{1}{2c_0^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla \varphi)^2 \right)^2 \right], \quad (5.5)$$

У циліндричних координатах ($x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$, $r = r$) оператор Лапласа набуває форми [111-118]:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \quad (5.6)$$

При вирішенні рівняння необхідно визначити початкові умови:

$\varphi = (x, y, z, t = 0) = \varphi_0$, $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = (x, y, z, t = 0) = \dot{\varphi}_0$, і граничні умови Диріхле, Неймана або змішаного типу. Якщо нестационарний рух ідеальної рідини обумовлено малими збуреннями термодинамічних параметрів, то рівняння перетворюється на лінійне хвильове рівняння наступного виду:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \quad (5.7)$$

Для рідини що стискається $c_0 = \infty$ і рівняння (5.7) перетворюється на рівняння Лапласа

$$\nabla^2 \varphi = 0, \quad (5.8)$$

а гідродинамічний тиск визначається наступною залежністю:

$$p = p_0 - \rho_0 \left[\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \varphi)^2 \right] \quad (5.9)$$

Дослідження стаціонарного руху рідини обмежується вирішенням крайового завдання рівняння Лапласа. Двовимірне рівняння Лапласа вирішується методом кінцевих елементів за допомогою процедури Бубнова-Галеркіна. Потенціал швидкості в межах кінцевого елемента апроксимується виразом наступного виду:

$$\varphi(r, s) = \sum_{i=1}^n N_i(r, s) \varphi_i = [N] \{\varphi\}, \quad (5.10)$$

де $[N(r, s)] = [N_1, N_2, \dots, N_n]$ - матриця функцій форм і $\{\varphi\}$ - Вектор вузлових узагальнених координат елемента. Використовуються чотирикутні кінцеві ізопараметричні елементи, тобто $n = 4$ (рис. 5.1).

Підставивши вираз (5.7) у рівняння Лапласа (5.8) та застосувавши процедуру Бубнова-Галеркіна, отримуємо наступне співвідношення:

$$\int_A [N]^T \nabla^2 ([N] \{\varphi\}) dA = 0 \quad (5.11)$$

Проінтегрувавши отриманий вираз частинами, отримаємо наступне матричне рівняння для визначення кінцевого елемента:

$$[k^{(e)}] \{\varphi\} = \{f^{(e)}\}, \quad (5.12)$$

$$[k^{(e)}] = \int_{A'} \left(\left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]^T \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]^T \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \right) x^y \partial A \quad \dots\dots\dots (5.13)$$

$$[f^{(e)}] = \int_{\Gamma'} [N]^T x^y \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} I_x + \frac{\partial \varphi}{\partial y} I_y \right) \partial \Gamma ; \quad (5.14)$$

де I_x, I_y - напрямні косинуси; $\gamma = 1$ використовуючи циліндричні координати при осесиметричному русі ($x = r, y = z$).

– умова Діріхле - на контурі відоме значення потенціалу швидкості:

$$\varphi = \varphi_0 ; \quad (5.15)$$

– умова Неймана - відома швидкість руху рідини u_n по нормалі до контуру:

$$u_n = \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} I_x + \frac{\partial \varphi}{\partial y} I_y . \quad (5.16)$$

Похідні функцій форм $N_i(r, s)$ за глобальними координатами x і y визначаються з наступного виразу:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (5.17)$$

Похідні функцій форм $N_i(r, s)$ за глобальними координатами x і y визначаються з наступного виразу:

де $[J]$ - матриця Якобі,

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i^n \frac{\partial N_i}{\partial r} x & \sum_i^n \frac{\partial N_i}{\partial r} y \\ \sum_i^n \frac{\partial N_i}{\partial s} x & \sum_i^n \frac{\partial N_i}{\partial s} y \end{bmatrix} . \quad (5.18)$$

Елементарна площа кінцевого елемента визначається співвідношенням:

$$\partial A = x^y \partial x \partial y = x^y \det[J] \partial r \partial s \quad (5.19)$$

Елементарна довжина контуру для сторін 1 і 3 ($ds = 0$) кінцевого елемента набуває наступного вигляду:

$$\partial \Gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial r}\right)^2} dr \quad (5.20)$$

а для сторін 2 та 4 ($dr = 0$) вона становить величину

$$\partial \Gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial s}\right)^2} ds \quad (5.21)$$

Тоді загальна система рівнянь наступного загального виду:

$$[K]\{\Phi\} = \{F\} \quad (5.22)$$

Інтегрування рівнянь (5.1) - (5.22) для визначення максимальних гідродинамічних навантажень на шток клапанів БРУ-А виконано методом кінцевого елемента (КЕ) розрахунковими засобами моделювання (кодами) для 3-х діапазонів повного ходу штока клапанів (від 0 мм до 120 мм):

- 1) хід штока від 0 мм до 40 мм – КЕ-модель коду CHINK («щілина»);
- 2) хід штока від 40 мм до 90 мм – КЕ-модель коду MIDDLE («проміжне положення»);
- 3) хід штока від 60 мм до 120 мм – КЕ-модель коду FULL OPEN («повне відкриття»).

Дані моделі обрані та розроблені для взаємної верифікації розрахункової методології без розривів та з перекриттям ходу штока клапанів. Проектні характеристики «хід-витрата» для БРУ-А серій 960-300/350-Е та 1115-300/350-Е наведені на рис. 5.3.

Приклади відповідних вузлових 3D-моделей обсягів із робочим середовищем представлені на рис. 5.4-5.5.

На рис. 5.6 - 5.8 представлені характерні приклади результатів розрахункового моделювання розподілу тиску (гідродинамічних навантажень) у проточних зонах клапанів обох модифікацій БРУ-А 3-х КЕ-моделей.

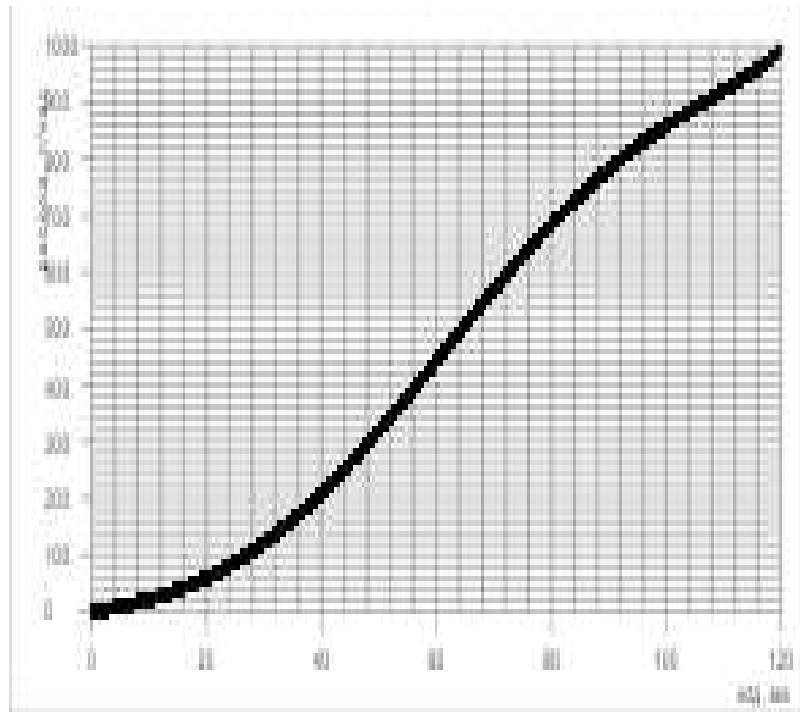
На рис. 5.9 - 5.11 подано характерні приклади результатів розрахункового моделювання розподілу тиску по ходу штока клапанів обох модифікацій БРУ-А 3 - х КЕ-моделей.

В результаті розрахункового моделювання встановлено:

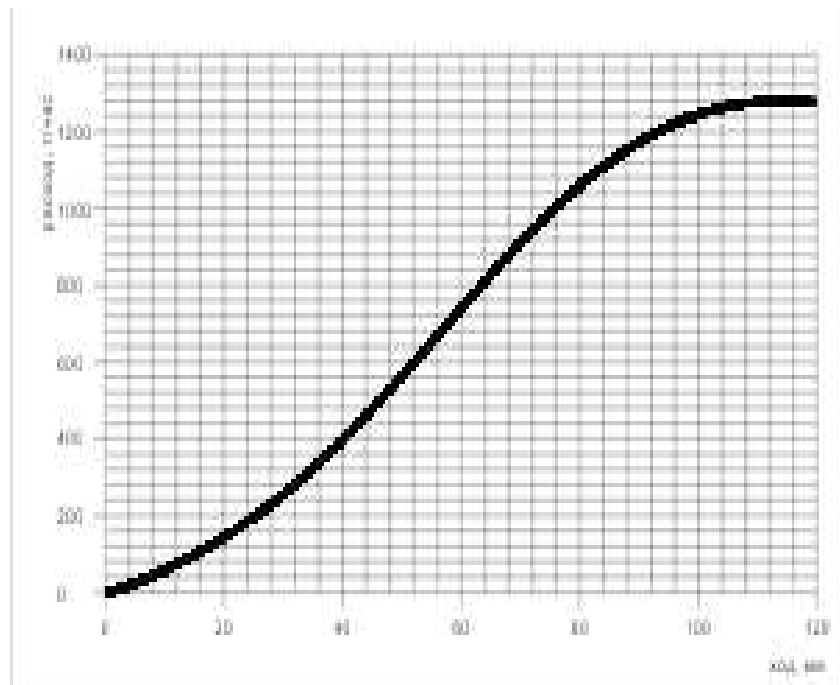
1. У всіх положеннях штока (повне відкриття, проміжне положення, щілина) виконуються умови надійності закриття клапанів БРУ-А при максимальних гідродинамічних навантаженнях режимів ОВП в обох модифікаціях БРУ-А ВВЕР-1000.

2. Не визначені аварійні ситуації з надходженням холодної води з температурою менше 373 К з ПГ в проточну зону клапанів БРУ-А. Однак, враховуючи уроки Фукусімської аварії (щодо необхідності враховувати малоймовірні події, але мають серйозні наслідки), отримані результати також становлять практичний інтерес.

3. Наведені розрахункові коди кваліфікації надійності БРУ-А режимах ОВП необґрунтовані для умов двофазних потоків в проточних зонах клапанів, тому що не враховують ефекти закипання та прискорення потоків у конфузорних зонах клапанів (див. розділ 4).



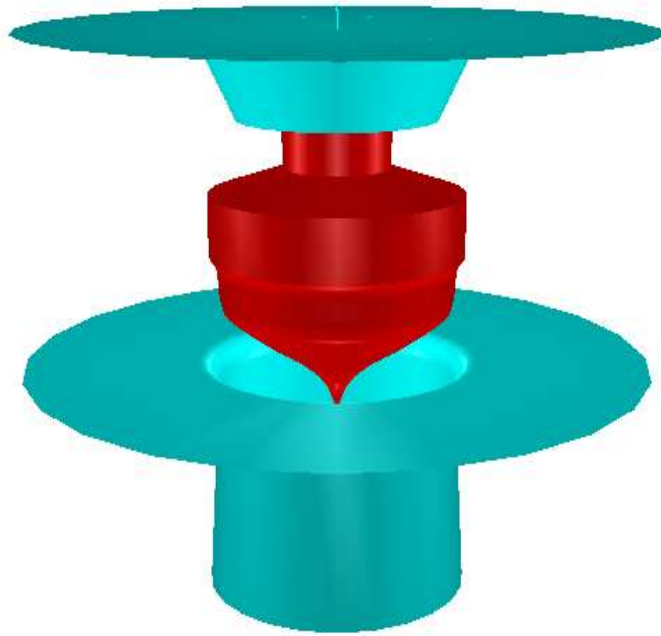
А)



Б)

Рисунок 5.3 – Характеристики «хід-витрата» для БРУ-А серій 960-300/350-Е (А) та 1115-300/350-Е (Б) [111]

А)



Б)

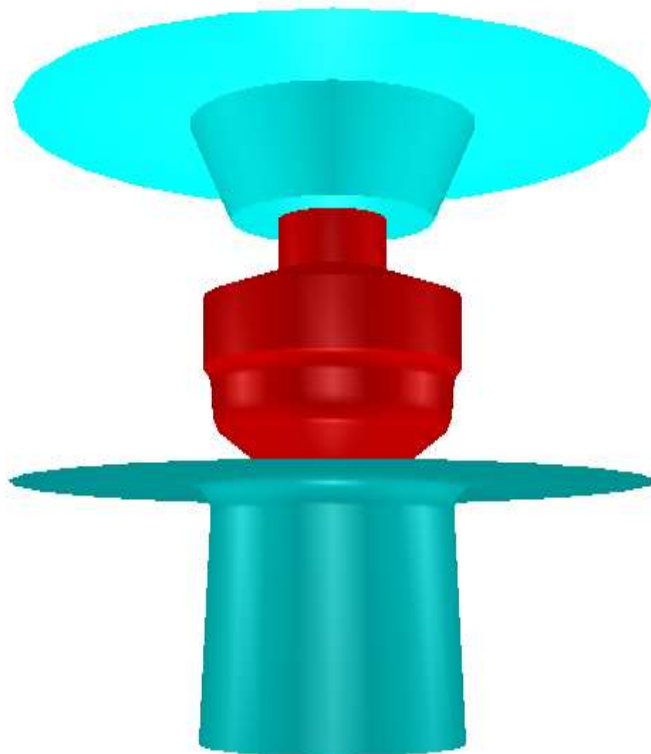
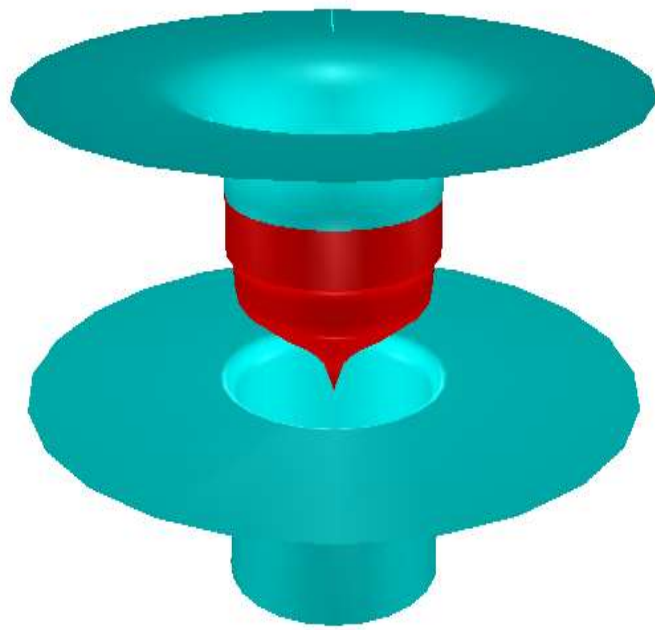


Рисунок 5.4 – Приклад 3D-моделі поверхонь, що обмежують об'єм із робочим середовищем для розрахункової KE-моделі MIDDLE («проміжне положення»)

А) – вид зверху. Б) – вид збоку

А)



Б)

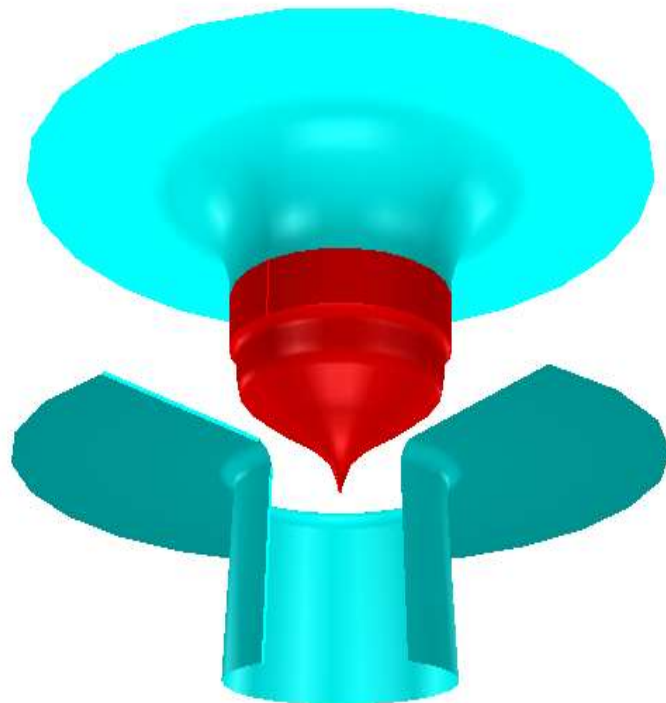


Рисунок 5.5 – Приклад 3D-моделі поверхонь, що обмежують об'єм із робочим середовищем для розрахункової KE-моделі FULL OPEN («повне відкриття»)

А) вид зверху ззовні. Б) вид знизу зсередини випускного патрубкa

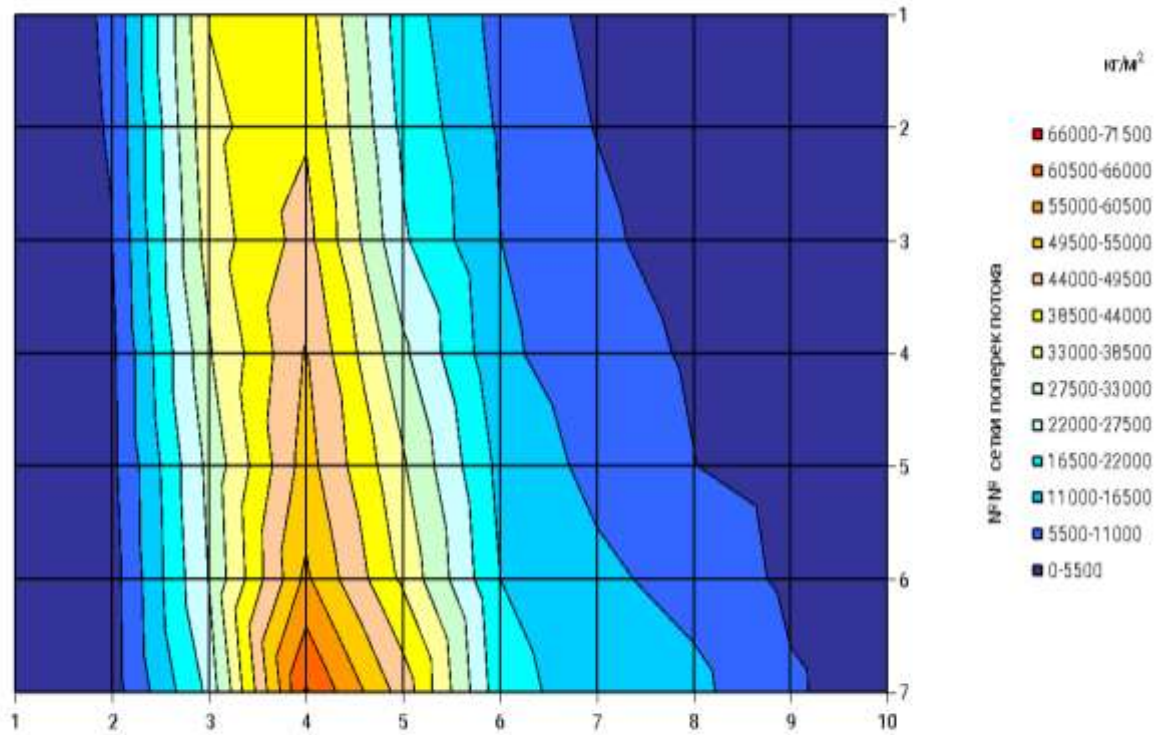


Рисунок 5.6 – Розподіл тиску води за розрахунковим перерізом (по топологічній ділянці) КЕ-моделі «щілина»

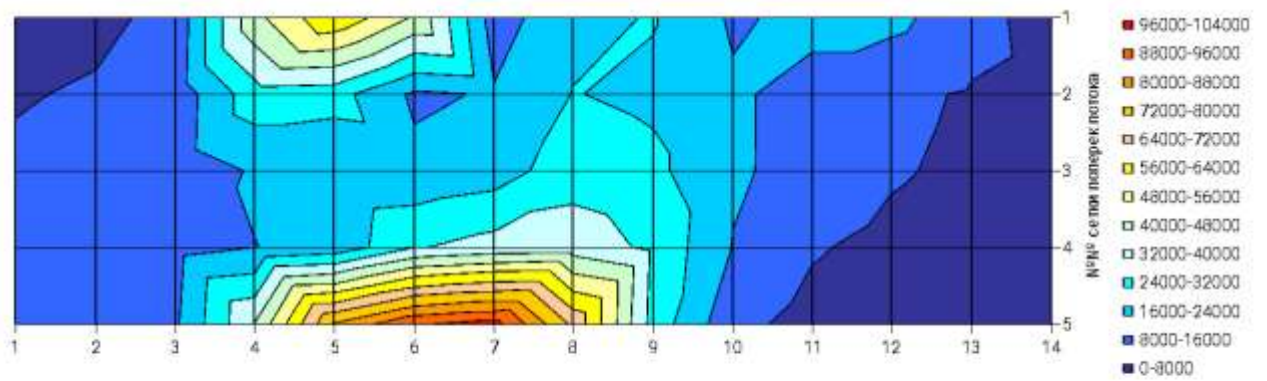


Рисунок 5.7 – Розподіл тиску води за розрахунковим перерізом (по топологічній ділянці) КЕ-моделі «повне відкриття»

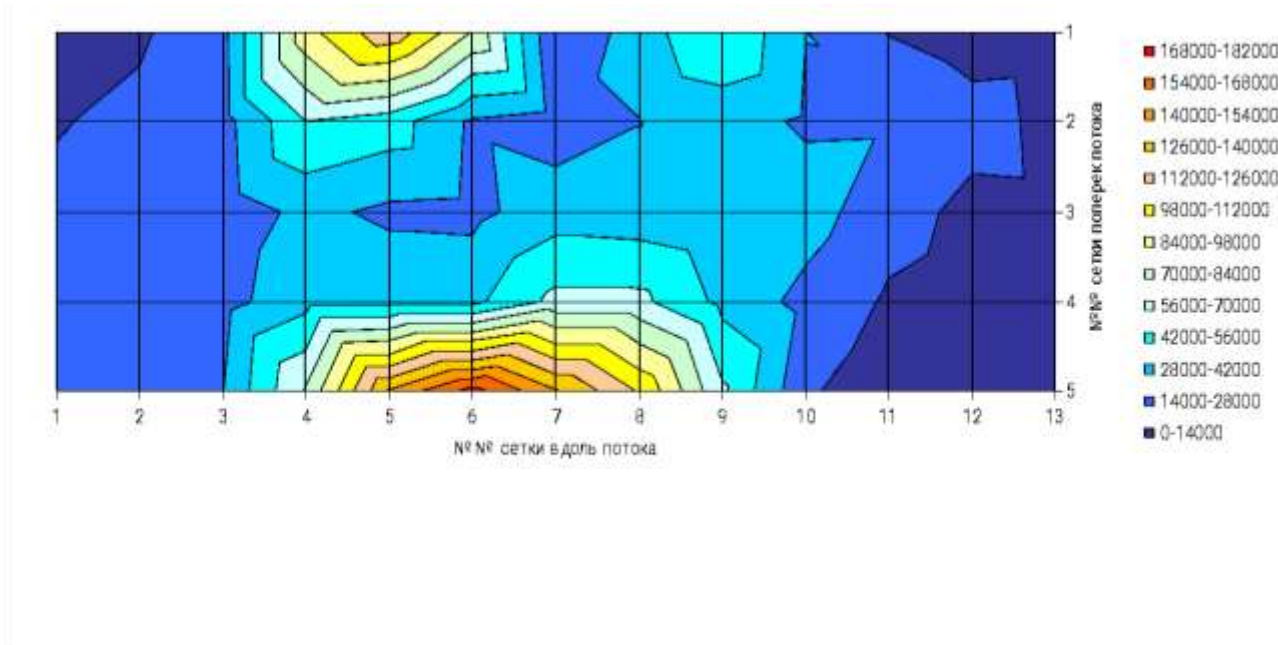


Рисунок 5.8 – Розподіл тиску води за розрахунковим перерізом (по топологічній ділянці) КЕ-моделі «проміжне положення»,

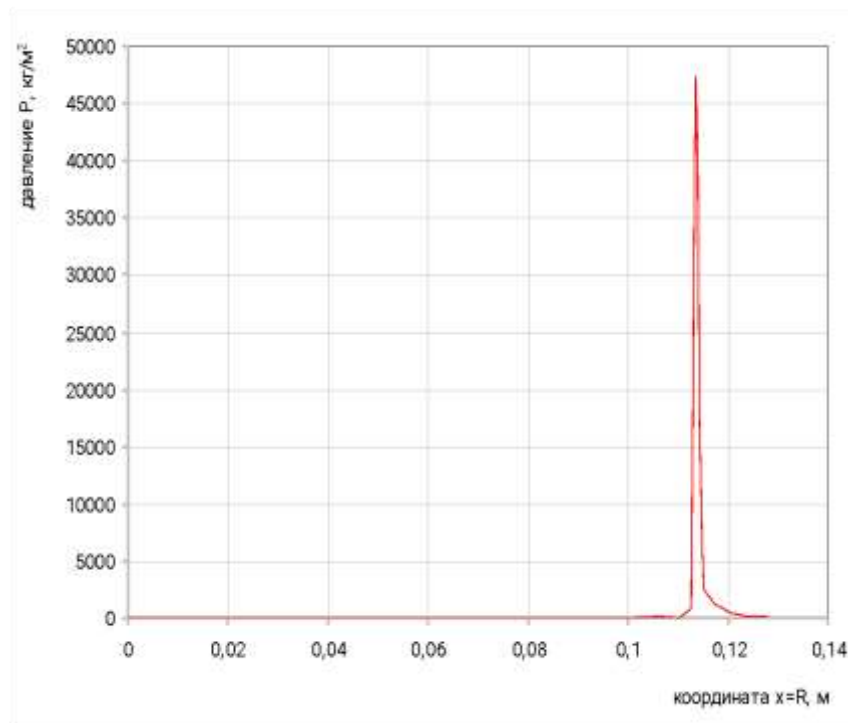


Рисунок 5.9 – Розподіл тиску води на вузлах штока КЕ-моделі «щілина»

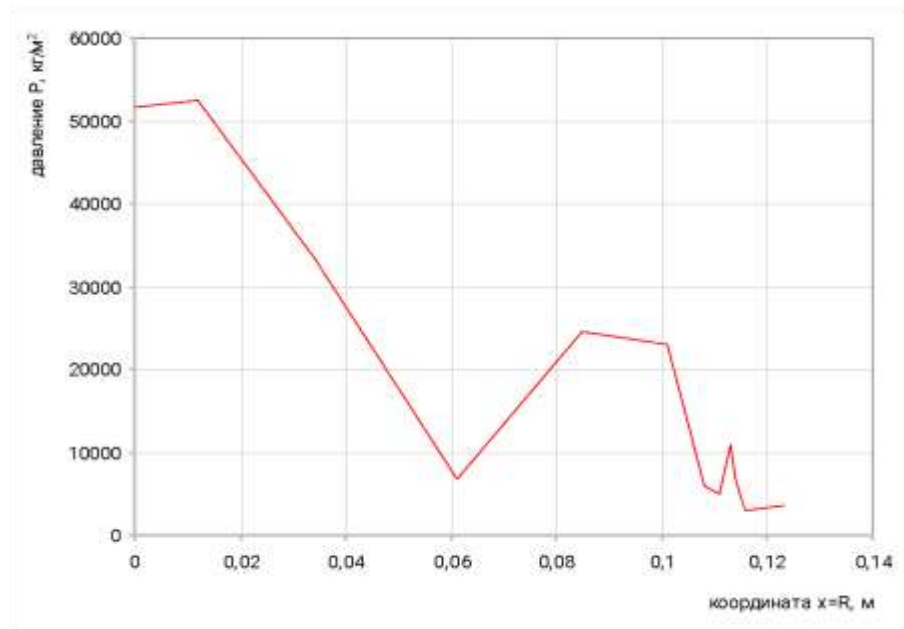


Рисунок 5.10 – Розподіл тиску води на вузлах штоку KE-моделі «повне відкриття»

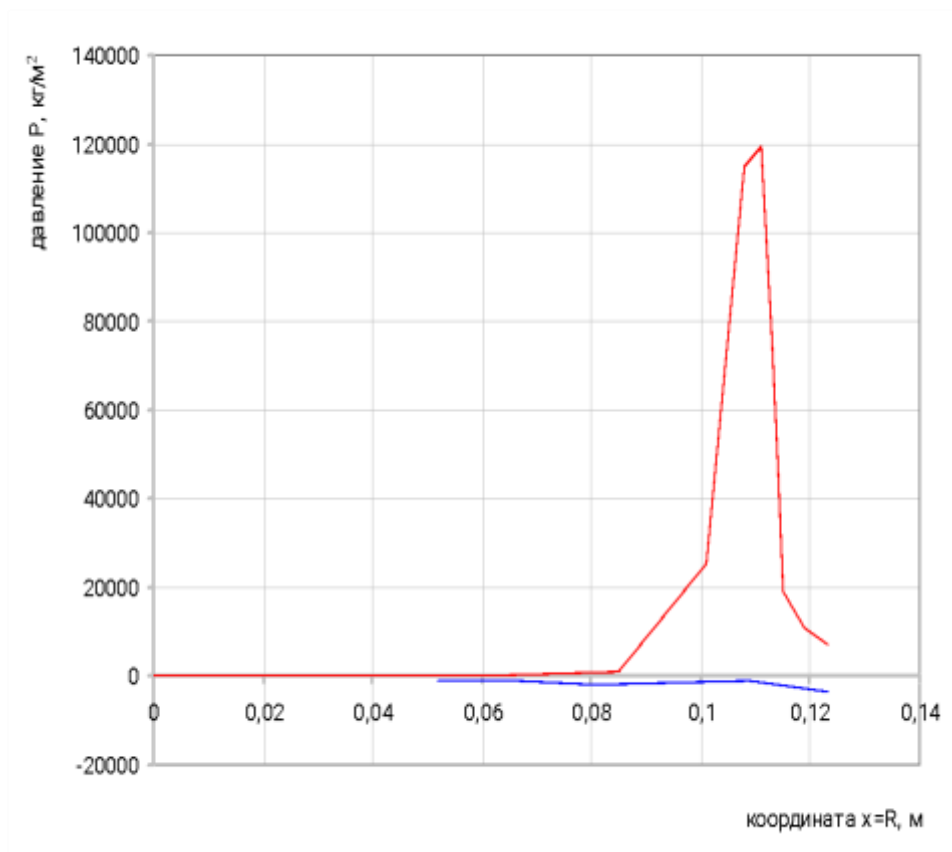


Рисунок 5.11 – Розподіл тиску води на вузлах штока KE-моделі «проміжне положення»

Висновки до розділу 5

1. Проведено консервативний аналіз надійності закриття клапанів БРУ-А в умовах максимальних гідро-динамічних навантажень на шток однофазного водного потоку з температурою менше 373 К.

2. В результаті проведеного аналізу встановлено достатню надійність закриття клапанів на всіх етапах руху штока - від моменту повного відкриття прохідного перерізу клапана до моменту закриття.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведено ризик-орієнтований аналіз впливу екстремальних умов експлуатації енергоустановок на надійність системи регулювання тиску в об'ємі парогенераторів (СРД ПГ). Наслідками відмови СРД ПГ в екстремальних умовах може бути аварійні ситуації з критичними пошкодженнями обладнання енергоустановок. На підставі ризик-орієнтованого аналізу встановлено:

- у разі постульованої відмови всіх систем зниження тиску у доквілля (БРУ-А) сумарна базова ймовірність відмови СРД ПГ зростає у 740 разів;

- найбільш значний вплив відмов БРУ-А на ймовірнісні показники надійності енергоустановок встановлені для груп аварій з між контурними течами у парогенераторах;

- в умовах аварій з меж контурними течами у парогенераторах енергоустановок (ЕУ) може бути некваліфіковані експлуатаційними випробуваннями режими пароводяної/ водяної течі у БРУ-А;

- недостатньо обґрунтовано враховується вплив на надійність енергоустановок екстремальних умов експлуатації з падінням великих/ вибухонебезпечних об'єктів та сучасних результатів реального стану сейсмічної- та смерченебезпеки районів розташування ЕУ України.

Проведений порівняльний аналіз результатів проектної та удосконаленої кваліфікації надійності БРУ-А серійного енергоблоку в екстремальних умовах експлуатації встановив :

- гранично допустимий сейсмічний вплив на БРУ-А рівня 7 балів за шкалою MSK;

- гранично допустимий динамічний вплив на БРУ-А внаслідок падіння великих/вибухонебезпечних об'єктів еквівалентен умовам землетрусу рівня 7 балів.

Розроблено метод адаптації результатів експериментальної кваліфікації надійності БРУ-А у режимах двофазного потоку на модельних установках до умов аварій з меж контурними течами у парогенераторах ЕУ на основі ідентичності критеріїв термодинамічної подібності. На підставі встановлених критеріїв

проведено аналіз результатів експериментальної кваліфікації надійності закриття клапанів БРУ-А у режимах двофазних потоків, отриманих у модельній установці FRAMATOM, та встановлено недостатню обґрунтованість цих результатів щодо практичного впровадження.

Розроблено детерміністичний метод розрахунково-експериментальної кваліфікації надійності закриття БРУ-А в режимах пароводяного/ водяного потоку.

На підставі розробленого метода головні результати розрахунково-експлуатаційної кваліфікації надійності закриття 2-х модифікацій конструкцій БРУ-А ЕУ полягають у наступному:

Встановлені умови кваліфікації виконуються у всьому діапазоні пароутримань потоку на вході в проточну зону клапана та проміжного положення штока в процесі закриття клапана.

Встановленим умовам кваліфікації не відповідає режим однофазного потоку води на вході в проточну зону клапана з температурою менше 373 К.

Проведено консервативний аналіз надійності закриття клапанів БРУ-А в умовах максимальних гідро-динамічних навантажень на шток однофазного водного потоку з температурою менше 373 К. В результаті проведеного аналізу встановлено достатню надійність закриття клапанів на всіх етапах руху штока - від моменту повного відкриття прохідного перерізу клапана до моменту закриття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Науково-технічні основи заходів підвищення безпеки АЕС з ВВЕР// Скалозубов В.І., Ключніков А.А., Комаров Ю.А., Шавлаков А.В. – Інститут проблем безпеки АЕС НАН України. – Чорнобиль. – 2010 р. –200 с.
2. Основи управління аваріями на АЕС з ВВЕР// Скалозубов В.І., Ключніков А.А., Колиханов В.М. – Інститут проблем безпеки НАН України. – Чорнобиль – 2010 р. – 400 с.
3. Комплекс методів переоцінки безпеки атомної енергетики України з урахуванням уроків екологічних катастроф у Чорнобилі та Фукусімі// за загальною редакцією професора В.І. Скалозубова. – Одеський національний політехнічний університет. - Астропринт. – 2013 р. – 244 с.
4. Основи продовження експлуатації АЕС з ВВЕР // Скалозубов В.І., Ключніков А.А., Лещетна О.С. – Інститут проблем безпеки АЕС НАН України. – Чорнобиль – 2011 р. – 384 с.
- 5.Заключний звіт щодо ймовірного аналізу безпеки при внутрішніх аварійних подіях енергоблоку №5 Запорізької АЕС // ДП НАЕК «Енергоатом" – 2006 р. – 596 с.
- 6.Звіт з аналізу безпеки. Аналіз проєктних аварій. Блок 5 Запорізька АЕС// ДПНАЕК "Енергоатом"-2004 р. - 423с.
- 7.Запорізька АЕС. Енергоблок №5. Звіт з аналізу безпеки. Ймовірнісний аналіз безпеки. ВАБ для зовнішніх екстремальних впливів: Фінальний звіт//ДП НАЕК "Енергоатом". - 2008 р. -9 с.
8. «Загальні положення безпеки атомних станцій», НП 306.2.141-2008, 2008.
- 9.NUREG/CR-5042 "Evaluation of External Hazards to Nuclear Power Plants in the United States"// NRC USA - 2014 - 473 p.
- 10.NUREG-1407 "Процедурна і субмітивна підготовка для індивідуального плану екзаминтації зовнішності (IPEEE) для severe Accident Vulnerabilities". NRC США. - 2015 - 243 p.

11. Treatment of external hazards in probabilistic safety assessment for nuclear power plants: a safety practice. - Safety Series No. 50-P-7, IAEA, Vienna-1995
12. Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants. - Safety Standards Series No. NS-G-3.3, IAEA, Vienna, 2002;
13. Meteorological Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants, Safety Guide № NS-G-3.4. IAEA, Vienna, 2002;
14. Зовнішні події техногенного походження в оцінці майданчика для атомних електростанцій//Посібник з безпеки № NS-G-3.1, МАГАТЕ, Відень, 2004р. - 49С.
15. DOE-STD-3014-96 " Accident analysis for aircraft crash in hazardous facilities ", doe standard, October 1996.
17. Карта уставок технологічних захистів та блокувань реакторного відділення енергоблоку № 5 Запорізької АЕС: 05.РО.00.КУ.01. НАЕК "Енергоатом", ВП Запорізька АЕС. СДСЕР, 1998.
18. Інструкція з ліквідації аварії та аварійних ситуацій на реакторній установці: 00.ПТ.ГТ.ІЭ.05.А. – ВП «Запорізька АЕС», 1993.
19. Паспорт на клапан запірно-дросельний. Позначення 960-300/350-Е (БРУ-А). Заводський номер №605997. Блок №3. ЗАЕС.
20. Технічний паспорт на запірно-дросельний клапан 960-300/360-Е (БРУ-А). Заводський номер 583015. Блок №2. Запорізька АЕС. – 1988.
21. Технічний паспорт на запірно-дросельний клапан 1115-300/360-Е (БРУ-А). Заводський номер 630095. Блок №5. Запорізька АЕС. – 1988.
22. Безпека залежить від їх ranking для WWER 1000 model 320 NPP : IAEA-EBP-WWER-05. - Vienna: IAEA, 1996.
23. Qualification of Secondary Relies Valve for Water Discharge operation : EEXDC 0038E.- 2014
24. Qualification of Active Mechanical Equipment Used in NPP : QME-1. - ASME Books, 2007.
25. Моделювання аварій на ЯЕУ АЕС / Васильченко В. Н., Кім В. В., Скалозубов В.І. – Одеса: «Резон 2000», 2002. – 466 с.

26. ETE Road Map. Згідно з пунктом IV і V у “Навмиснення в Melk Process and Follow-Up”. Item 2 // Qualification of Valves Final Monitoring Report до Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water. Management of Austria. -Vienna, May 2005.
27. В.Б.Хабенський, В.А.Герліга. Нестабільність потоку теплоносія в елементах енергообладнання // «Наука», 1994.
28. В.А. Герліга, В.І. Скалозубов. Двофазні потоки в енергообладнанні АЕС// Енергоатоміздат - 1992.
29. Ю.Л. Коврижкін, В.І. Скалозубов. Термоакустична нестійкість ВВЕР // Вид. ТЕС. - 2003.
30. Кондратьєв А. Д., Костильов В. Ф. Причини гідравлічних ударів у деаераторах енергоблоків та шляхи їх усунення // Електричні станції. 1966. № 6. С. 33-36.
31. Кузнецов М.В., Букринський А.М. Про механізм нестійкості процесу барботажної конденсації пари в системах локалізації аварії на АЕС // Теплоенергетика, 2011. № 12. С. 56-58.
32. Лещинський Г.А. Нестационарний рух пароводяних середовищ у трубопроводах та їх вібраційний стан: Автореф. дис. ...канд. техн. наук. Харків: Харків. авіац. ін-т, 1983. 23 с.
33. AhyuzUi K, Vezirogly T., Kakac S., Dogan T. Finite difference analysis of two-phase flow pressure-drop and density wave oscillations // Warme- und Stoffubertragung. 1980. Vol. 14. P. 253-267.
34. Dogan Tt Kakac S., Vezirogly T. Lumped parametr analysis of two-phase flow instabilities//Int. Heat Transfer Conf. Munchen, 1982. N 5. P. 213-218.
35. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки АС (ОПБУ-2008).
36. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій (ПБЯ РУ АС-89). 1991.
37. ПН АЕ Г-10-021-90 (НП-010-98). Правила влаштування та експлуатації локалізуючих систем безпеки атомних станцій, затверджені ДПАН СРСР. 1990.
38. ПН АЕ Г-01-036-95. Вимоги до змісту звіту щодо обґрунтування безпеки атомної станції з реактором типу ВВЕР (ТС ООБ). 1995.

39. ПН АЕ Г-03-33-93. Розміщення атомних станцій. Основні критерії та вимоги щодо забезпечення безпеки. 1993.
40. Accident management programs in nuclear power plants : Guidebook // Technical Report Series No 368. Vienna : IAEA, 1994.
41. Severe accident management implementation and expertise / G. Vayssier et al. AMM-SAMIME(00)-P009. European Commission, 2000.
42. OECD Workshop на Implementation of Severe Accident Management Measures. September 10–13, 2001, Villigen-PSI, Switzerland.
43. EPRI TR-103389. Severe accident management guidance : Technical basis report. V. 1 і 2. 1992.
44. OECD Specialist Meeting on Severe Accident Management Program Development. September, 1991, Rome, Italy.
45. OECD Specialist Meeting on Severe Accident Management Implementation, June 12 – 14, 1995, Niantic, Connecticut, USA.
46. Challenges left в районі в-vessel melt retention / V. Asmolov et al. EU Research in Reactor Safety Conclusion Symposium (FISA-99).
47. Dorofeev S. Turbulent combustion і DDT events є як нижній край для hydrogen mitigation techniques. OECD/NEA/CSNI Workshop на Implementation of Hydrogen Mitigation Techniques. May 13-15, 1996, Winnipeg, Manitoba, Canada.
48. Severe accident management measures for Tianwan npp with WWER-1000 / VV Bezlepkin et al. OECD Workshop на Implementation of Severe Accident Management Measures. September 10–13, 2001, Villigen-PSI, Switzerland.
49. IAEA-EBP-WWER-05. Safety issues and they ranking for wwer-1000 model 320 nuclear power plants. March, 1996.
50. NUREG/CR-6338. Resolution of direct containment heating for all Westinghouse plants with large dry or subatmospheric containments / MM Pilch et al. 1996.
51. 5-Е-УНІК. Інструкція з ліквідації аварій та аварійних ситуацій на РУ енергоблоку № 4 Рівненської АЕС із реактором ВВЕР-1000. ДП НАСК «Енергоатом», 2003.

52. 23.00.ГТ.Рг.04А. Посібники з управління запроектними аваріями енергоблоків ЗАЕС. 1998.
53. Beclman Ronald J. Soviet-designed pressurized water reactor symptomatic emergency operating instruction analytical validation procedure. International Nuclear Safety Program. 2000, Idaho 83401, США.
54. Пристрій для використання PRA оцінки в ризик-поставлених рішеннях про конкретні зміни статей до обмеження принципів : Regulatory Guide 1.177. US NRC, 1998.
55. Проект поглибленого аналізу безпеки енергоблоку №5 Запорізької АЕС. Аналіз аварійних послідовностей (моделювання подій) : Посібник із проекту ВОА 1900083-А-Р4 (ZPG-4). ДП НАЕК «Енергоатом», 2001.
56. Розвиток та оптимізація систем контролю АЕС з ВВЕР/В. І. Скалозубов та ін.; за заг. ред. В. І. Скалозубова. Чорнобиль: ІПБ АЕС НАН України, 2008.
57. Моделювання аварій на ядерних енергетичних установках атомних електростанцій / В. М. Васильченко та ін.; за заг. ред. В. І. Скалозубова. Одеса: «Резон 2000», 2002.
58. 1.ЯБ 1273.ІЕ-97. Посібники з управління запроектними аваріями на енергоблоці № 1 Хмельницької АЕС. Держкоматом України.
59. Вимоги до змісту звіту щодо аналізу безпеки діючих енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР : Керівний документ. Запроваджено наказом Держкоматому України № 386 від 27.11.95.
60. КНД 306.302-96. Вимоги до змісту звіту щодо аналізу безпеки АС з реакторами типу ВВЕР на стадії видачі дозволу на введення в експлуатацію : Керівний нормативний документ.
61. 1.1-209В27. Посібник з управління запроектними аваріями на енергоблоках № 1 та 2 Південноукраїнської АЕС. Південноукраїнська, 1994.
62. 3-Е-УНІК. Посібник з управління запроектними аваріями на енергоблоці № 3 Рівненської АЕС. Міністерство енергетики України, НАЕК «Енергоатом», Рівненська АЕС, 1995/1998.

63. 43-923.203.254.ОБ.19.03-2003. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2: Звіт з аналізу безпеки (ОАБ). Т. 19. ІАБ. Ч. 3. Кількісна оцінка.
64. НП 306.2.106-2005. Вимоги до проведення модифікацій ядерних установок та порядку оцінки їхньої безпеки. ДКЯР України, 2005.
65. 10054 DL13R. Запорізька АЕС. Енергоблок № 5: Звіт з аналізу безпеки (ОАБ). 2000.
66. Звіт про виконання державної експертизи ЯРБ «Ймовірнісний аналіз безпеки» енергоблоку № 5 ЗАЕС. ДП ДНТЦ ЯРБ, 2002.
67. РУ.00.ПТ.ГТ.ІЕ.05.А. Інструкція з ліквідації аварій та аварійних ситуацій. Запорізька АЕС, 1993.
68. Звіт з аналізу безпеки. 5-й блок Запорізької АЕС. ДП НАЄК «Енергоатом».
69. Звіт з аналізу безпеки. 2-й блок Хмельницької АЕС. ДП НАЄК «Енергоатом».
70. Звіт з аналізу безпеки. 4-й блок Рівненської АЕС. ДП НАЄК «Енергоатом».
71. Короткий опис поточних ситуацій в Україні щодо використання розрахункових кодів: Звіт. ДП ДНТЦ ЯРБ, 1998.
72. Розрахунково-технічне обґрунтування протиаварійних процедур АЕС з ВВЕР-1000 / О.М. Шкаровський та ін. Вісті вишів. Ядерна енергетика. 2007. № 3, вип. 1. С. 54-63.
73. Розробка керівництва з управління запроєктними аваріями для реакторів РБМК-1500 ІАЕС / В. Власкін та ін. Енергетика. 2007. № 2, т. 53.
74. Кочарьянц О. Аналіз протиаварійних дій персоналу з використанням повномасштабного тренажера ЗАЕС. Eighth Intern. Exchange Forum on Safety Analysis for Nuclear Power Plants of VVER/RBMK. 2004, Preston, Словаччина.
75. INSAG-12. Основні специфічні принципи для Nuclear Power Plants. Vienna: IAEA, 1999.
76. Термомеханічні властивості цирконіума базуються на всіх oxidized claddings в LOCA simulating conditions / Yu.K. Bibilashvili et al. IAEA Technical Committee Meeting "Fuel Behaviour under Transient and LOCA Conditions". September 10–14, 2001, Halden, Norway.

77. Thermomechanickі властивості irradiated Zr1%Nb будь-які введення в LOCA simulating conditions / NB Sokolov et al. Fuel Safety Research Specialists' Meeting (JAERI-Conf 2002-009). March 4–5, 2002, Tokai, Japan.
78. Oh MD, Corradini ML A не-equilibrium model для великої ваги vapor explosions. Third Intern. Topical Meeting Reactor Thermal Hydraulics. 15-18 жовтня, 1985, Newport, USA.
79. Design Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants : Safety Guide No NS-G-1.10. IAEA Safety Standards Series. 2004.
80. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. Rev. CV2. 2001.
81. Glaeser H., Pochard R. Review on uncertainty methods for thermal hydraulic computer codes. Pisa, 1994.
82. D'Auria F., Leonardi M., Pochard R. Методологія для оцінки thermallydraulic codes accuracy. Pisa, 1994.
83. Perrel C., Barre F. Зміна методу DASM застосовується для чутливості до аналізу і невизначеного оцінки в CATHARE-2. NURETH-8. September 30–October 4, 1997, Kyoto, Japan.
84. Технічні обґрунтування безпеки Тяньванської АЕС. СПБАЄП, 2008.
85. Sauvage E., Musoyan G. Nuclear reactor severe accident analysis : Applications and management guidelines. SARnet 17. April 1–11, 2008, Budapest, Hungary.
86. Козачков І.В., Могаддам Алі Хасан. Моделювання теплогідравлічних процесів за тяжких аварій на АЕС. Київ, 2008. 172 с.
87. IAEA Training in Level 2 PSA. Severe Accident Phenomena.
88. Hofmann P., Hagen S., Schanz G., Skokan A. Reactor core матеріалів interactions at дуже high temperatures. Nuclear Technology 87. 1989. P. 146-186.
89. EP24-2004.210.ОД.2. Коригування та оновлення ІАБ енергоблоку №5 ЗАЕС. Аналіз надійності персоналу.
90. ІАБ 1-го рівня для роботи енергоблоку на зниженому рівні потужності та в стані зупинки : ОАБ 5-го блоку ЗАЕС. 21.5.59.ОБ.04.4.

91. Запорізька АЕС. Енергоблок № 5: Звіт з аналізу безпеки. Вірогідний аналіз безпеки. Аналіз наслідків від порушень тепловідведення басейну витримки та перевантаження палива. 05.ТН.ЗП.ОТ.92.
92. Звонарьов Ю., Будаєв М., Кобзар В., Волчек О. Валідація комп'ютерного коду ASTEC та застосування для аналізу безпеки АЕС з ВВЕР. Перший European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2005). November 14–16, 2005, Aix-en-Provence, France.
93. Data base on the behavior of high burnup fuel rods with Zr-1%Nb cladding and UO₂ fuel (VVER type) under reactivity initiated accident conditions / L.Yegorova et al. NUREG/IA-0165 (IPSN99/08-02, NSI RRC KI 2179). 1999.
94. Asmolov V., Yegorova L. Russian RIA вивчає програму: motivation, definition, execution and results. Nuclear Safety. 1996. Vol. 37, No 4.
95. French studies on high burnup fuel transient behavior under RIA conditions / J. Papin et al. Nuclear Safety. 1996. Vol. 37, No 4.
96. Розробка даних бази з механічними властивостями з- і преірадиативного VVER cladding / V. Asmolov et al. Twenty-Fifth Water Reactor Safety Information Meeting (NUREG/CP-0162). 1997.
97. Experimental study of VVER high burnup fuel rods в BIGR реактор під напругою pulse conditions / Yu. Bibilashvili et al. 2000 р. Intern. Topical Meeting on LWR Fuel Performance. April 10-13, 2000, Park City, Utah, USA.
98. VVER-1000 type fuel assembly tests on electroheated facilities in LOCA simulating conditions / Yu. До Bibilashvili et al. IAEA Technical Committee Meeting “Fuel Behaviour under Transient and LOCA Conditions”. September 10–14, 2001, Halden, Norway.
99. CORA-W2 Experiment on Severe Fuel Damage для Російського типу PWR / M. Firnhaber et al. OECD/NEA-CSNI International Standard Problem ISP36. GRS-120, February 1996.
100. Knudson DL, Rempe JL SCDAP/RELAP5-3D: Будинок арт-документів для sever accident analyses. 2002 RELAP5 Intern. Users Seminar. 2002, Park City, Utah, USA.

101. Lajtha G., Raimond E., Kostka P. Severe accident codes for L2 PSA (ASTEC requirements). ERMSAR meeting. September 1, 2008, Bulgaria.
102. Станіславов Володимир. Системи регулювання тиску енергоустановок. Монографія. LAMBERT (Німеччина). Затверджено рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» (протокол №8 від 11.03.2026 р.) – 2026 р. – 69 с. – ISBN 978-620-8-45626-9.
103. Станіславов Володимир. Кваліфікація надійності системи регулювання тиску. Монографія. LAMBERT (Німеччина). Затверджено рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» (протокол №8 від 11.03.2026 р.) – 2026 р. – 72 с. – ISBN 978-613-9-77076-2.
104. Станіславов Володимир. Кваліфікація надійності систем регулювання тиску парогенераторів енергоустановок в екстремальних умовах// Монографія. LAMBERT (Німеччина). Затверджено рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка». (протокол №№8 від 11.03.2026 р.) – 2026 р. – 144 с. – ISBN 978-620-6-71314-2. <https://www.morebooks.shop/shop-ui/shop/product/978-620-6-71314-2>.
105. А. Мазуренко, В. Кравченко Г. Лужанська, В. Шавров, В. Станіславов. Особливості організації течії примежового шару в міждисковому просторі турбін Tesla. *Праці Одеського політехнічного університету*. Вип. 1(67), 2023 стор. 49-54. <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/19..> DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.67.2023.06>. Журнал реферується в зарубіжних базах даних «Україніка наукова», Ulrich's periodicals directory (США), Index Copernicus
106. A. Mazurenko, A. Pustovit, P. Shylov, D. Shylov, V. Stanislavov. Determination of the probability of failures in the operation of elements of urban heat supply systems in extree operating conditions. *Proc. of Odessa Polytechnic University (Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi)*. Issue 1(71), 2025, p. 98-103. <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/510>. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.71.2025.11>. Журнал реферується в

- зарубіжних базах даних «Україніка наукова», Ulrich's periodicals directory (США), Index Copernicus.
107. Мазуренко, А., Кандеєва, В., Чиченін, В., Пустовіт, А., Станіславов, В. (2025). Оцінка ризиків забезпечення надійного теплопостачання споживачів в умовах зовнішнього руйнування. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(3). DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3274>.
108. Ж.Ф. Дорошенко, В.Д. Станіславов, Ю.К. Бессатьян, С.І Грищенко, А.Ю. Каверін. Застосування відновлювальних джерел енергії в торгівельно-розважальних центрах для потреб теплопостачання з урахуванням режимів експлуатації. *Холодильна техніка та технологія*, 61(4), 2025. <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/reftech/article/view/3331>. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3331>.
109. Лужанська Г.В., Сергеев І.В., Бессатьян Ю.К., Тарасюк О.С., Станіславов В.Д. Підвищення енергоефективності будівель. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference «Actual problems of personality psychology in the modern world» (April 09 – 12, 2024) Rome, Italy. International Science Group. 2024. Pp. 294-297. <https://isg-konf.com/actual-problems-of-personality-psychology-in-the-modern-world/>
110. Мазуренко А.С., Лужанська Г.В., Фуркаленко О.Л., Станіславов В.Д., Муренко І.В. Альтернативні установки систем незалежного енергопостачання. Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference. San Francisco, USA. 2023. Pp. 454-456. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-foundations-of-scientists-and-modern-opinions-regarding-the-implementation-of-modern-trends/>. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.25>.
111. Лужанська Г.В., Ануфрієв С.С., Каверін А.Ю., Костін К.К. Станіславов В.Д. Основні прилади інструментального енергетичного обстеження // Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. “Scientific achievements of contemporary society” (October 10-12, 2024) Cognum Publishing House, London, United Kingdom. 2024. Pp. 180-183. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna->

[naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-achievements-of-contemporary-society-10-12-10-2024-london-velikobritaniya-arhiv/](#)

112. Лужанська Г.В., Станіславов В.Д., Фуркаленко О.Л., Грищенко С.І., Рак О.В. Використання пінополіуретану в якості утеплювача будівельних огорожувальних конструкцій // Global trends in science and education. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. (April 7-9, 2025) SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2025. Pp. 377-380. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-trends-in-science-and-education-7-9-04-2025-kiyiv-ukrayina-arhiv/>

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ І ВІДОМОСТІ
ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. **Станіславов Володимир**. Системи регулювання тиску енергоустановок. Монографія. LAMBERT (Німеччина). Затверджено рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» (протокол №8 від 11.03.2026 р.) – 2026 р. – 69 с. – ISBN 978-620-8-45626-9.

2. **Станіславов Володимир**. Кваліфікація надійності системи регулювання тиску. Монографія. LAMBERT (Німеччина). Затверджено рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» (протокол №8 від 11.03.2026 р.) – 2026 р. – 72 с. – ISBN 978-613-9-77076-2.

3. **Станіславов Володимир**. Кваліфікація надійності систем регулювання тиску парогенераторів енергоустановок в екстремальних умовах// Монографія. LAMBERT (Німеччина). Затверджено рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка». (протокол №№8 від 11.03.2026 р.) – 2026 р. – 144 с. – ISBN 978-620-6-71314-2. <https://www.morebooks.shop/shop-ui/shop/product/978-620-6-71314-2>.

4. А. Мазуренко, В. Кравченко Г. Лужанська, В. Шавров, **В. Станіславов**. Особливості організації течії примежового шару в міждисковому просторі турбін Tesla. *Праці Одеського політехнічного університету*. Вип. 1(67), 2023 стор. 49-54. <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/19..>
DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.67.2023.06>. Журнал реферується в зарубіжних базах даних «Україніка наукова», Ulrich's periodicals directory (США), Index Copernicus

5. А. Mazurenko, А. Pustovit, Р. Shylov, D. Shylov, **V. Stanislavov**. Determination of the probability of failures in the operation of elements of urban heat supply systems in extreme operating conditions. *Proc. of Odessa Polytechnic University (Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi)*. Issue 1(71), 2025, p. 98-103. <https://pratsi.op.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/510>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.71.2025.11>. Журнал реферується в зарубіжних базах даних «Україніка наукова», Ulrich's periodicals directory (США), Index Copernicus.

6. Мазуренко, А., Кандеєва, В., Чиченін, В., Пустовіт, А., **Станіславов, В.** (2025). Оцінка ризиків забезпечення надійного теплопостачання споживачів в умовах зовнішнього руйнування. *Refrigeration Engineering and Technology*, 61(3). DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3274>.

7. Ж.Ф. Дорошенко, **В.Д. Станіславов**, Ю.К. Бессатьян, С.І Грищенко, А.Ю. Каверін. Застосування відновлювальних джерел енергії в торгівельно-розважальних центрах для потреб теплопостачання з урахуванням режимів експлуатації. *Холодильна техніка та технологія*, 61(4), 2025. <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/reftech/article/view/3331>. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i4.3331>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Лужанська Г.В., Сергеев І.В., Бессатьян Ю.К., Тарасюк О.С., Станіславов В.Д. Підвищення енергоефективності будівель. Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference «Actual problems of personality psychology in the modern world» (April 09 – 12, 2024) Rome, Italy. International Science Group. 2024. Pp. 294-297. <https://isg-konf.com/actual-problems-of-personality-psychology-in-the-modern-world/>

9. Мазуренко А.С., Лужанська Г.В., Фуркаленко О.Л., Станіславов В.Д., Муренко І.В. Альтернативні установки систем незалежного енергопостачання. Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference. San Francisco, USA. 2023. Pp. 454-456. URL: <https://isg-konf.com/theoretical-foundations-of-scientists-and-modern-opinions-regarding-the-implementation-of-modern-trends/>. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.25>.

10. Лужанська Г.В., Ануфрієв С.С., Каверін А.Ю., Костін К.К. Станіславов В.Д. Основні прилади інструментального енергетичного обстеження //Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. “Scientific achievements of

contemporary society” (October 10-12, 2024) Cognum Publishing House, London, United Kingdom. 2024. Pp. 180-183. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-achievements-of-contemporary-society-10-12-10-2024-london-velikobritaniya-arhiv/>

11. Лужанська Г.В., Станіславов В.Д., Фуркаленко О.Л., Грищенко С.І., Рак О.В. Використання пінополіуретану в якості утеплювача будівельних огорожувальних конструкцій // Global trends in science and education. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. (April 7-9, 2025) SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2025. Pp. 377-380. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-trends-in-science-and-education-7-9-04-2025-kiyiv-ukrayina-arhiv/>

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ



в.о. ректора

Сергій НЕСТЕРЕНКО
2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Цей акт є підтвердженням того, що результати дисертаційного дослідження аспіранта Національного університету «Одеська політехніка» Володимира Станіславова на тему «Кваліфікація надійності систем регулювання тиску парогенераторів енергоустановок в екстремальних умовах», представлена на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 Теплоенергетика, впроваджені в навчальний процес кафедри теплових електростанцій та енергозберігаючих технологій Національного університету «Одеська політехніка» при підготовці здобувачів вищої освіти, а саме:

1) В навчальну дисципліну професійної підготовки «Перспективні теплоенергетичні системи та обладнання», рік затвердження 2025 р.

- лекції на тему «Аналіз стану енергетичного устаткування на ТЕС, ТЕЦ, ГЕС та АЕС. Особливості режимів експлуатації устаткування на ТЕС, ТЕЦ, ГЕС та АЕС. Проблеми використання нетрадиційних видів енергії в умовах України» (підрозділ дисертації 2.2 «Аналіз критичності для безпеки системи регулювання тиску парогенераторів у екстремальних аварійних умовах» (пункт 2.2.1);

- в практичне заняття № 4 включено виконання розрахунків за темою «Оцінка ресурсу окремих основних та допоміжних елементів ТЕС та АЕС» (підрозділ 2.2 дисертації).

2) В навчальну дисципліну професійної підготовки «Надійність експлуатації та безпека енергопідприємств», рік затвердження 2025 р., включена тема лекційного заняття «Небезпека технічних систем. Наслідки аварій на ТЕС та АЕС» (підрозділ дисертації 3.1 «Аналіз екстремальних («жорстких») умов енергоустановок з парогенераторами»).

3) при виконанні кваліфікаційних робіт бакалаврів за спеціальністю 144 Теплоенергетика:

- Колесниченко П.В., гр. ТП - 2002 Підвищення надійності та економічності роботи блоку 300 МВт в умовах часткового навантаження
- В'язун Ю.І., гр. ЗТП181 Реконструкція котельні промислового підприємства.

Завідувач кафедри ТЕСЕТ

д.т.н., проф.

Геннадій БАЛАСАНЯН