

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 629.031

DOI 10.20535/1813-5420.2.2023.279688

В.І.Скалозубов¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-2361-223X
В. А. Кондратюк², канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-5035-311X
Є.М.Письменний², д-р техн. наук, профе., ORCID 0000-0001-6403-6596
О.А. Дорож¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-8495-2911
А. І. Остапенко², інженер, ORCID 0000-0003-3980-1609

¹Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології
НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України
²Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД КВАЛІФІКАЦІЇ МОДЕРНІЗАЦІЙ АКТИВНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНІЙ НЕСТІЙКОСТІ

Основні причини виникнення гідродинамічної нестійкості в системах безпеки – інерційне запізнення реакції регулюючої арматури і напірно-витратної характеристики насосів на «швидкі» зміни гідродинамічних параметрів у системах ядерних енергоустановок. Одна з причин виникнення гідродинамічної нестійкості у режимі пуску насосів системи підживлення реакторного контуру високого тиску пов'язана з інерційним запізненням реакції напірно-витратної характеристики насосів на швидкі зміни режимних параметрів (витрати, тиску та ін.). Наслідками гідродинамічної нестійкості в системі підживлення реакторного контуру високого тиску можуть бути: порушення умов компенсації витрати можливих теч; гідро- і термічні «удари» та інші негативні ефекти в робочих і аварійних режимах реактора. не запобігає умовам виникнення гідродинамічної нестійкості у перехідному режимі пуску насосів. Запропоновано альтернативний підхід модернізації системи підживлення реакторного контуру високого тиску демпфуючими пристроями. На основі проведеного моделювання модернізованої системи визначено умови та конструкційно-технічні вимоги до запобігання гідродинамічної нестійкості у перехідних режимах пуску насосів.

Ключові слова: гідродинамічна нестійкість, модернізація, система, ядерна енергоустановка.

Вступ. Традиційні підходи аналізу безпеки ядерних енергоустановок ґрунтуються на моделюванні вихідних аварійних подій (протікання/розриви трубопроводів, відмови систем важливих для безпеки, припинення електропостачання енергоблоків та інші) імовірнісними та детерміністськими методами. Аналіз відомих результатів моделювання цих вихідних аварійних подій, що наведений в галузевих звітах з аналізу безпеки українських АЕС, встановив необхідність того, що при аналізі при аналізі безпеки необхідно враховувати вихідні події пов'язані з виникненням різних видів термодинамічної і гідродинамічної нестійкості (ГДН) в системах ядерних енергоустановок, що є важливими для безпеки. Наслідки ГДН – підвищена інтенсивність гідродинамічних і термічних ударів, які можуть істотно вплинути на надійність та цілісність обладнання і трубопроводів, наприклад, [1, 2]

Результати цих досліджень визначили необхідність модернізації активних систем безпеки для запобігання умовам гідродинамічної нестійкості. Проте, відповідно до українських нормативних вимог, що регулюють ядерну та радіаційну безпеку, будь-яка модернізація систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок, має бути кваліфікована розрахунковими чи експериментальними методами на забезпечення умов безпеки.

У роботі запропоновано розрахунковий метод кваліфікації модернізацій активних систем безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР. В результаті проведеної кваліфікації розробленим методом встановлено, що модернізація активних систем безпеки регулюючої арматурою. Актуальність модернізацій активних систем безпеки (СБ) (з електронасосами) визначається необхідністю запобігання гідродинамічній нестійкості (ГДН) у перехідних режимах пуску насосів. У представленій роботі розглянуте питання модернізацій активних СБ для запобігання умовам ГДН у перехідних режимах аналізуються на прикладі

системи підживлення теплоносієм реакторного контуру високого тиску.

Аналіз літературних джерел. Основна причина виникнення ГДН у робочих режимах СБ – інерційність параметрів настройки регулюючої арматури до відносно «швидких» змін гідродинамічних параметрів при аваріях ЯЕУ [1], а у перехідних режимах пуску СБ – інерційність запізнення реакції напірно-витратної характеристики (НВХ) на «швидку» зміну гідродинамічних параметрів у каналах СБ та обладнанні ЯЕУ [3].

Системою безпеки реакторної установки з ВВЕР для якої необхідно проведення розрахункової кваліфікації можливої модернізації спрямованої на визначення і зменшення умов виникнення ГДН є Система підживлення реакторного контуру високого тиску (ТК). Ця система призначена для компенсації відносно малих теч теплоносія (так звані «компенсуємі течі») у робочих і аварійних режимах [1 – 6 та ін.]. Система ТК ВВЕР є трьох каналною. Кожний канал складається з: баку запасу теплоносія; електронасосу високого протитиску та відносно малої витрати; регулюючої і запірної арматури.

Спрацьовування ТК відбувається в автоматичному режимі за сигналом «Зниження тиску в 1-му контурі».

Основною особливістю системи ТК відносно інших активних СБ ЯЕУ з ВВЕР є спрацьовування в разі необхідності в робочих режимах без аварійної зупинки реактора.

У роботах автора [3, 6] встановлено, що в перехідних режимах пуску насосів подібних ТК систем можуть виникнути умови ГДН внаслідок інерційного запізнення реакції НВХ насосів. В роботі [7] представлено методи обґрунтування ефективних конструкційно-технічних параметрів демпфуючих пристроїв для запобігання ГДН у робочих і перехідних режимах СБ з насосами.

Наслідки ГДН – високо амплітудні коливання гідродинамічних параметрів (швидкості, тиску) та формування умов гідро термодинамічних ударів. Тому, враховуючи особливості експлуатації системи ТК, питання запобігання умовам ГДН у цій системі має підвищену актуальність.

Регулююча арматура в системі ТК не забезпечує запобігання умовам ГДН у перехідному режимі пуску насосів зі швидким збільшенням витрати і може бути ефективною для наступних етапів сталих робочих режимів (наприклад, [2, 6]). Однак саме пуск насосів є визначальним режимом умов ГДН у системі ТК. Граничним щодо швидкості зміни гідродинамічних параметрів у каналах СБ є перехідний режим пуску насосів. Внаслідок інерційного запізнення реакції НВХ насосів СБ швидке збільшення витрати (швидкості потоку) відбувається при максимальному збільшенні тиску.

Таким чином, необхідною є кваліфікація альтернативних підходів модернізації системи ТК для запобігання умовам ГДН у перехідних режимах пуску насосів, що визначає актуальність представленої роботи.

Мета роботи. Метою роботи є розробка розрахункового методу кваліфікації модернізації активних систем безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР на прикладі системи, важливої для безпеки, ТК для запобігання умовам гідродинамічної нестійкості

Метод кваліфікації модернізації системи ТК. Основні положення і допущення.

1 Необхідна умова виникнення ГДН [8] – перехідний режим пуску насосів СБ, коли внаслідок інерційного запізнення реакції напірно-витратної характеристики (НВХ) насосів на швидке збільшення витрати відбувається відхилення гідродинамічних параметрів від рівноважного стану номінального робочого режиму.

2. Достатня умова виникнення ГДН базується на термодинамічних закономірностях нестійкості систем (наприклад, [9,10]). Наслідком ГДН одночасне збільшення тиску та маси теплоносія.

3. Теплоносій в ТК і в поєднаних системах РК моделюється як система з осередненими за об'ємами гідродинамічними параметрами.

Підхід модернізації системи ТК для запобігання умов гідро-динамічної нестійкості заснований на широко використовуваних в різних областях енергетики демпфуючі пристрої (ДП). ДП є герметичною судиною, що з'єднана з трубопроводом системи і частково заповнена рідкою фазою. Регулювання витрати здійснюється стисненням/розширенням газового об'єму ДП.

Аналогом ДП у ЯЕУ з ВВЕР є компенсатор тиску в реакторному контурі.

Загальні критерії та умови ГДН систем [10]:

$$K_{ns} = \frac{\Delta P}{\Delta M} > 0, \quad (1)$$

де ΔP , ΔM – одночасні зміни тиску і маси в системі.

У системі «реакторний контур – ТК» умова ГДН (1) визначається співвідношенням масової витрати в течу G_1 та витратою в каналі ТК G .

Якщо $G_1 > G$, то $\Delta M > 0$, $\Delta P > 0$ і $K_{ns} > 0$ – система нестійка (1). Якщо $G_1 < G$, то $\Delta M < 0$, $\Delta P < 0$ і $K_{ns} > 0$ – система також нестійка (1).

Таким чином, для запобігання ГДН необхідно превентивно усувати невідповідність витрат у течу та в каналі ТК із застосуванням ДП.

Умова балансу витрат у системі «реакторний контур – ТК – ДП»:

$$G_1 = G - G_D, \quad (2)$$

де G_D – масова витрата рідкої фази в ДП.

Витрата в течу реакторного контуру:

$$G_1 = \mu F_1 \sqrt{\rho(P_R - P_{out})}. \quad (3)$$

Рівняння балансу мас і стану газової фази в ДП для ізотермічних процесів:

$$\frac{d(\rho_g V_g)}{dt} = 0, \quad P_g V_g = P_0 V_{g0}, \quad \frac{dV_g}{dt} = -G_D; \quad (4)$$

$$V_g(t=0) = V_{g0}, \quad P_g(t=0) = P_0. \quad (5)$$

Рівняння руху в каналі ТК при пуску насоса [6, 7]:

$$L \frac{dG}{dt} = F \left[\Delta P_m - P_R + P_g - \xi \frac{G^2}{\rho F^2} \right], \quad (6)$$

де L, F – довжина та площа прохідного перетину трубопроводу ТК; μ – гідравлічний коефіцієнт витрати в течу; F_1 – еквівалентна площа прохідного перетину течі; ρ – щільність теплоносія; P_R, P_{out} – середній тиск у/поза реакторним контуром; V_g – об'єм газової фази в ДП; P_g – тиск у газовій фазі ДП; ΔP_m – максимальний напір тиску насоса; ξ – сумарний гідравлічний коефіцієнт опору каналу ТК.

Після перетворення рівнянь (2) – (6) отримаємо систему нелінійних диференційних рівнянь у безрозмірному критеріальному форматі:

$$\frac{dP_g}{dt} = K_1 P_g (G - G_1), \quad (7)$$

$$\frac{dG}{dt} = K_2 G^2 + K_3 P_g + K_4, \quad (8)$$

де $P_g = P_g / P_0$; $G = G / G_m$; $t = t / t_m$; $G_1 = G_1 / G_m$;

$$K_1 = \frac{\rho_{g0} a_{g0}^2 t_m G_m}{P_0 V_{g0}}; \quad K_2 = -\frac{\xi t_m G_m}{\rho L F}; \quad K_3 = \frac{P_0 F t_m}{L G_m}; \quad K_4 = \frac{F t_m (\Delta P_m - P_R)}{L G_m}; \quad t_m = \frac{\rho L F}{G_m};$$

$$G_m = F \sqrt{\rho(\Delta P_m - P_R)}$$

при початкових умовах

$$P_g(t=0) = 1; \quad G(t=0) = 0. \quad (9)$$

У загальному випадку рішення системи нелінійних рівнянь (7) – (9) може бути отримано чисельними методами.

Консервативне рішення за умови $G = 1$ для тиску в газовому об'ємі ДП:

$$P_g = \exp[K_1(1 - G_1)t]. \quad (10)$$

За умови $G_1 < 1$ об'єм рідкої фази в ДП збільшується ($G_D > 0$), а газовий об'єм стискується і збільшується тиск у ДП до настання умов $G_D = 0$.

За умови $G_1 > 1$ об'єм рідкої фази в ДП зменшується ($G_D < 0$), а газовий об'єм розширюється і зменшується тиск у ДП до настання умов $G_D = 0$.

Таким чином, ДП ТК компенсує розходження витрат G і G_1 , а також забезпечує гідродинамічну стійкість теплоносія в реакторному контурі в робочих та аварійних режимах.

Мінімально необхідний початковий газовий об'єм ДП $\min V_{g0}$ визначається з умови:

$$\max P_g(\min V_{g0}) < P_{max}, \quad (11)$$

де P_{max} – гранично допустимий тиск на корпус ДП (початок руйнування ДП).

Максимальний розмір течі $\max F_1$, що компенсує ТК, визначається з формул (3) і (6) для умов номінального режиму ТК:

$$\max F_1 = \frac{F \sqrt{\rho(\Delta P_0 - P_R + P_g)} / \xi}{\mu \sqrt{\rho(P_R - P_{out})}}, \quad (12)$$

де ΔP_0 – напір тиску насоса ТК у номінальному сталому режимі.

Обговорення результатів. Отримані результати та розроблений метод кваліфікації можуть бути використані при обґрунтуванні модернізації систем для безпеки ВВЕР. Це може бути здійснене при модернізації система підживлення реакторного контуру високого тиск шляхом використання демпфуючих пристроїв. Така модернізація дозволить компенсувати розходження масову витрату в течу та витрату в каналі ТК, а також забезпечить гідродинамічну стійкість теплоносія в реакторному контурі в робочих та аварійних режимах .

В разі, коли демпфуючий пристрій буде герметичною судиною, що з'єднана з трубопроводом системи і частково заповнена рідкою фазою, то регулювання витрати буде здійснюється стисненням/розширенням його газового об'єму.

Для обґрунтування ефективних конструкційно-технічних параметрів демпфуючих пристроїв для запобігання умовам гідродинамічної нестійкості в системах безпеки в стаціонарних робочих режимах і в перехідних робочих режимах може бути використаний відповідний метод наведений в [8].

Висновки

1. Основна причина виникнення ГДН у режимі пуску насосів системи підживлення реакторного контуру високого тиску пов'язана з інерційним запізненням реакції НВХ насосів на швидкі зміни режимних параметрів (витрати, тиску та ін.).

2. Наслідками ГДН в системі підживлення реакторного контуру високого тиску можуть бути: порушення умов компенсації витрати можливих теч; гідро- і термічні «удари» та інші негативні ефекти в робочих і аварійних режимах реактора.

3. Регулююча арматура не запобігає умовам виникнення ГДН у перехідному режимі пуску насосів.

4. Запропоновано альтернативний підхід модернізації системи підживлення реакторного контуру високого тиску демпфуючими пристроями. На основі проведеного моделювання модернізованої системи визначено умови та конструкційно-технічні вимоги до запобігання ГДН у перехідних режимах пуску насосів.

Список використаної літератури

1. Васильченко В. Н., Емельяненко Е. З., Скалозубов В. И., Смышляев А. Е., Ким В. В. Моделирование аварий на ядерных энергетических установках атомных электростанций. Одесса: Резон 2000, 2002. 466 с.

2. Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики Украины с учетом уроков экологических катастроф в Чернобыле и Фукусиме / Под ред. В. И. Скалозубова. Одесса: Астропринт, 2013. 242 с.

3. Skalozubov V., Kozlov I., Chulkin O., Komarov Yu., Piontkovskiy O. Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems. *Nuclear & Radiation Safety*. 2019. No. 1(81). P. 42 – 45.

4. IAEA-EBP-WWER-08. Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants. Vienna: IAEA, 2006. 66 p.

5. Sauvage E., Musoyan G. Nuclear Reactor Severe Accident Analysis: Applications and Management Guidelines. *SARnet 17* (Budapest, Hungary, April 1 – 11, 2008).

6. OECD Workshop on the Implementation of Severe Accident Management Measures (Villigen-PSI, Switzerland, September 10 – 13, 2001). (Pre-Print of the Proceedings).

7. V. Kondratyuk, V. Skalozubov, Ju. Komarov, S. Kosenko, D. Fedorov. Prevention of hydrodynamic instability conditions in safety systems with pumps of nuclear power plants. *Proceeding of Odessa Polytechnic University*. №1(65), 2020

8. Skalozubov V. I., Huiyu Zhou, Chulkin O. A., Pirkovskiy D. S. Modelling method of conditions for reliability-critical hydraulic impacts on pumps of thermal and nuclear power plants. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2017. No. 4(110). P. 74 – 78.

9. Науково-технічні основи заходів підвищення безпеки АЕС з ВВЕР. Інститут проблем безпеки АЕС. Національна академія наук України. Під редакцією О.О. Ключнікова, Чорнобиль, 2012, 296 с.

10. Antonyuk N., Gerliga V., Skalozubov V. Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1990. V. 59, Iss. 4. P. 1323 – 1328.

V. Skalozubov¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-2361-223X
V. Kondratyk², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-5035-311X
Y. Pysmennyy², Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-6403-6596
O. Dorozh¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-8495-2911
I. Ostapenko², engineer, ORCID 0000-0003-3980-1609

¹ Interagency Center for Fundamental Scientific Research in Energy and Ecology
Sector of National Academy of Sciences of Ukraine,
Odessa Polytechnic and Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine
²National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

METHOD OF QUALIFICATION OF MODERNIZATION OF ACTIVE SAFETY SYSTEMS TO PREVENT HYDRODYNAMIC INSTABILITY

The main reason for the hydrodynamic instability in the start-up mode of the pumps of the high-pressure reactor makeup system is related to the inertial delay in the reaction of the pump head and rate to rapid changes in operating parameters (flow rates, pressure, etc.). The consequences of the hydrodynamic instability in the high-pressure reactor makeup system can be: violation of the conditions for compensating the flow of possible leaks; hydro- and thermal "shocks" and other negative effects in the operating and emergency modes of the reactor. The control armature does not prevent the conditions for the hydrodynamic instability in the transient mode of pump start-up.

An alternative approach to modernizing the high-pressure reactor makeup system with damping devices is proposed. Based on the performed modelling of the modernized system, the conditions and constructional and technical requirements for the prevention of the hydrodynamic instability in the transient modes of pump start-up were determined.

Key words: hydrodynamic instability, modernization, system, nuclear power plant

References

1. Vasilchenko V. N., Emelyanenko E. Z., Skalozubov V. I., Smyshlyaev A. E., Kim V. V. Modeling of accidents at nuclear power plants of nuclear power plants. Odessa: Reason 2000, 2002. 466 c.
2. A set of methods for reassessing the safety of nuclear energy in Ukraine, taking into account the lessons of environmental disasters in Chernobyl and Fukushima, Ed. V. I. Skalozubov. Odessa: Astroprint, 2013. 242 c.
3. Skalozubov V., Kozlov I., Chulkin O., Komarov Yu., Pionkovskiy O. Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems. *Nuclear & Radiation Safety*. 2019. No. 1(81). P. 42 – 45.
4. IAEA-EBP-WWER-08. Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants. Vienna: IAEA, 2006. 66 c.
5. Sauvage E., Musoyan G. Nuclear Reactor Severe Accident Analysis: Applications and Management Guidelines. *SARnet 17* (Budapest, Hungary, April 1 – 11, 2008).
6. OECD Workshop on the Implementation of Severe Accident Management Measures (Villigen-PSI, Switzerland, September 10 – 13, 2001). (Pre-Print of the Proceedings).
7. V. Kondratyk, V. Skalozubov, Ju. Komarov, S. Kosenko, D. Fedorov. Prevention of hydrodynamic instability conditions in safety systems with pumps of nuclear power plants. *Proceeding of Odessa Polytechnic University*. №1(65), 2020.
8. Skalozubov V. I., Huiyu Zhou, Chulkin O. A., Pirkovskiy D. S. Modelling method of conditions for reliability-critical hydraulic impacts on pumps of thermal and nuclear power plants. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2017. No. 4(110). P. 74 – 78.
9. Scientific and technical foundations for the advancement of AES and VVER security. AES Institute for Safety Problems. National Academy of Sciences of Ukraine. Edited by O.O. Klyuchnikova, Chornobyl, 2012, 296 p.
10. Antonyuk N., Gerliga V., Skalozubov V. Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1990. V. 59, Iss. 4. P. 1323 -1328.

Надійшла: 17.02.2023

Received: 17.02.2023