

# ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.20535/kpissn.2022.1-2.270364

УДК 629.031

В.А. Кондратюк

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

\*corresponding author: prorector-agr@kpi.ua

## АДАПТАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ КВАЛІФІКАЦІЇ ПАСИВНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК

**Проблематика.** Актуальним питанням забезпечення безпеки ядерних енергоустановок (ЯЕУ) є адаптація результатів експериментальної кваліфікації арматури пасивних систем безпеки на однофазному середовищі до аварійних умов двофазних потоків. Для більшості обладнання систем, важливих для безпеки атомних електростанцій, не існує принципової можливості кваліфікації за допомогою прямих випробувань в аварійних умовах. Досвід експлуатації атомних електростанцій, а також результати моделювання після проектних аварій визначили можливу невідповідність умов роботи арматури в аварійних ситуаціях і в режимах експлуатаційних випробувань з однофазним парогазовим середовищем. Таким чином, треба адаптувати результати експериментальної кваліфікації арматури систем аварійного видалення пари і газу в однофазному середовищі до аварійних умов двофазних потоків.

**Мета дослідження.** Метою цієї статті є достатнє обґрунтування адаптації результатів випробувань на однофазному середовищі до умов аварійних процесів із двофазним середовищем.

**Методика реалізації.** Для досягнення цілей дослідження було використано детерміністичне моделювання умов і критеріїв функціонування/випробувань клапанів систем аварійного видалення пари і газу.

**Результати дослідження.** Виконано аналіз обґрунтованості результатів експериментальної кваліфікації для динамічного напору тиску на замикаючий пристрій у режимі випробувань (однофазний режим течії) і динамічного напору тиску на замикаючий пристрій в аварійному режимі (двофазний режим течії). Виконання адаптації результатів експериментальної кваліфікації на закриття на однофазному середовищі клапанів систем аварійного видалення пари й газу до аварійних умов двофазних потоків проводилось за умов дозвукових та надзвукових режимів течії.

**Висновки.** Обґрунтовано адаптацію результатів експериментальної кваліфікації на закриття клапанів систем аварійного видалення пари і газу до аварійних умов дозвукових і трансзвукових течій двофазного потоку в проточній частині клапанів. Критеріями кваліфікації вважаються динамічний напір на замикаючий пристрій клапана в однофазних потоках експлуатаційних випробувань та динамічний напір у двофазних потоках аварійних режимів.

**Ключові слова:** кваліфікація, система безпеки, арматура, ядерна енергоустановка.

### Вступ

Зважаючи на аналіз причин аварії на атомній електростанції Фукусіми, встановлено, що значну увагу треба приділяти обґрунтуванню надійності пасивних систем безпеки реакторних установок, зокрема їх елементів. Це має здійснюватися за допомогою їх кваліфікації.

Згідно з рекомендаціями МАГАТЕ під кваліфікацією систем/обладнання ЯЕУ маємо

на увазі розрахункове, експериментальне або розрахунково-експериментальне обґрунтування (підтвердження) працездатності й надійності у проектних та аварійних режимах [1].

До однієї з таких пасивних систем належить система аварійного видалення пари і газу (САП) ЯЕУ з водо-водяним енергетичним реактором (ВВЕР). Ця систем призначена для роботи з однофазними потоками, але в аварійних ситуаціях можливий перехід на роботу із двофазними потоками

**Пропозиція для цитування цієї статті:** В.А. Кондратюк, «Адаптація результатів експериментальної кваліфікації пасивних систем безпеки ядерних енергостановок», Наукові вісті КПП, № 1–2, с. 7–10, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.270364

**Offer a citation for this article:** Vadim A. Kondratyuk, “Adaptations of results of experimental qualification of passive safety systems of nuclear power plants”, *KPI Science News*, no. 1–2, pp. 7–10, 2022. doi: 10.20535/kpissn.2022.1-2.270364

Під час проведення кваліфікації елементів цієї системи слід враховувати саме такий аварійний перехід, зважаючи на особливості роботи елементів системи в умовах двофазних потоків [2].

### Аналіз літературних джерел

До САП ЯЕУ з ВВЕР належать запобіжні клапани компенсатора тиску реактора та парогенератора (ЗК КТ/ПГ), швидкодіючі редуційні установки скидання парогазового середовища до конденсатора або атмосфери (ШРУ-К/ШРУ-А) та інші. Основне призначення САП – короткочасне відкриття з наступним закриттям клапанів для зниження тиску в системах, важливих для безпеки ЯЕУ, та управління (у разі необхідності) аварійними процесами.

Для підтвердження надійності і працездатності клапанів САП фахівці періодично проводять експлуатаційні випробування на однофазному парогазовому середовищі. Однак багаторічний досвід експлуатації ЯЕУ, а також результати моделювання запроєктних аварій визначили можливу невідповідність умов спрацьовування клапанів в аварійних ситуаціях та в режимах експлуатаційних випробувань. Так, наприклад, аварійне закриття ЗК-реактора у процесі ядерної (важкої) аварії на АЕС ТМІ-2 (США) у 1979 р. відбувалося в режимі двофазної течії теплоносія [3]. В аварійному інциденті на Рівненській АЕС у 2009 р. після відмови на закриття ЗК КТ у процесі випробувань у режимі «гарячої» зупинки реактора також виник режим двофазної течії в незакритому клапані [3]. Результати розрахункового моделювання запроєктних аварій з відносно великими міжконтурними течами на ЯЕУ з ВВЕР також визначив можливість потрапляння двофазного середовища до ЗК ПГ, ШРУ-А та ШРУ-К [4].

Тому для кваліфікації клапанів САП необхідним є достатнє обґрунтування адаптації результатів випробувань на однофазному середовищі для умов аварійних процесів із двофазним середовищем. Вирішення цього питання визначає актуальність, цілі та задачі цієї роботи.

### Постановка задачі

Метою цієї статті є достатнє обґрунтування адаптації результатів випробувань арматури пасивних систем безпеки на однофазному середовищі до умов аварійних процесів із двофазним середовищем.

### Адаптація результатів випробувань і аварійних умов

Для досягнення цілей дослідження було використано детерміністичне моделювання умов і критеріїв функціонування/випробувань клапанів САП.

Аналіз обґрунтованості результатів експериментальної кваліфікації розглядається для двох параметрів: динамічного напору тиску на замикаючий пристрій (ЗП) в режимі випробувань (однофазний режим течії) і динамічного напору тиску на ЗП в аварійному режимі (двофазний режим течії).

Динамічний напір тиску на ЗП клапана в умовах однофазного потоку [3]:

$$\Delta P_{te} = \Delta P_{te0} + \frac{G_{te}^2}{\rho_{te} F_m^2}, \quad (1)$$

де  $F_m$  – площа прохідного перерізу клапана в зоні ЗП;

$G_{te}$  – масова витрата в режимі випробувань;

$\rho_{te}$  – щільність однофазного парогазового середовища в режимі випробувань;

$\Delta P_{te}$  – перепад статичного тиску на клапані в режимі випробувань.

Динамічний напір тиску на ЗП в аварійному режимі, за умови наявності в зоні ЗП двофазного потоку [3]:

$$\Delta P_{as} = \Delta P_{as0} + \frac{G_{as}^2}{\rho_{as} F_m^2}, \quad (2)$$

де  $G_{as}$  – масова витрата в аварійному режимі;

$\rho_{as}$  – щільність двофазного потоку в зоні ЗП;

$\Delta P_{as}$  – перепад статичного тиску на клапані в аварійному режимі.

Обґрунтованість адаптації результатів експлуатаційних випробувань і аварійних умов можна визначити рівнянням

$$\Delta P_{as} \leq \Delta P_{te}. \quad (3)$$

Невідомі параметри  $\rho_{as}$  і  $G_{as}$  можна оцінити на основі моделювання теплогідродинамічних процесів у проточній частині клапана САП.

Рівняння руху і теплового балансу двофазного потоку в гомогенному, квазістаціонарному та ізотермічному наближеннях [5; 6]:

$$P_{as0} + \frac{G_{as}^2}{\rho_{as}(\phi_0)F_0^2} - P_{asm} - \frac{G_{as}^2}{\rho_{as}(\phi_m)F_m^2} = \xi \frac{G_{as}^2}{\rho_{as}(\phi_0)F_0^2}, \quad (4)$$

$$h_{as}(P_0, P_{as0}) = h_{as}(P_m, P_{asm}), \quad (5)$$

де  $P_{as0}$ ,  $P_{asm}$  – статичний тиск на вході та виході клапана відповідно;

$F_0$  – площа прохідного перерізу на вході клапана;

$$\rho_{as}(P_0) = \rho_v P_0 + \rho_l (1 - P_0);$$

$$\rho_{as}(P_m) = \rho_v P_m + \rho_l (1 - P_m);$$

$$h_{as}(P_0, P_{as0}) = h_v(P_{as0})P_0 + h_l(P_{as0})(1 - P_0);$$

$$h_{as}(P_m, P_{asm}) = h_v(P_{asm})(1 - P_m) + h_l(P_{asm})(1 - P_m);$$

$h_v$ ,  $h_l$  – питома ентальпія пари та рідини відповідно;

$\rho_v$ ,  $\rho_l$  – щільність пари та рідини відповідно;

$\varphi_0$ ,  $\varphi_m$  – паровміст на вході та в зоні ЗП відповідно;

$\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору клапана.

За умов дозвукових режимів течії в зоні ЗП клапана критерій Маху визначають, розв'язавши рівняння

$$M = \frac{G_{as}}{\rho_{as}(\varphi_m) F_m a(\varphi_m)} < 1, \quad (6)$$

де швидкість звуку у двофазному потоці [5; 6]

$$a(\varphi_m) = \sqrt{[a_v^{-2} \varphi_m + a_l^{-2} (1 - \varphi_m)]^{-1}}; \quad (7)$$

$a_v$ ,  $a_l$  – швидкість звуку за тиску  $P_{asm}$  в парі та рідині відповідно.

За умов дозвукового режиму параметри  $G_{as}$ ,  $\varphi_m$  і  $\Delta P_{as}$  визначають з розв'язків рівнянь (2), (4) і (5).

За умов звукових режимів течії ( $M = 1$ ):

$$G_{as} = \rho_{as}(\varphi_m) F_m a_{as}(\varphi_m). \quad (8)$$

За умов надзвукових режимів ( $M > 1$ ) виникає конденсаційний імпульс тиску гальмування потоку з максимальною амплітудою [6; 7]:

$$\Delta P_m = \rho_{as}(\varphi_m) a_{as}^2(\varphi_m) a_1^{2i-1}. \quad (9)$$

Умовою адаптації результатів випробувань і аварійних режимів за  $M \geq 1$  буде рівняння, яке показує, що кваліфікація прийнятна, коли динамічний напір в експериментальних умовах не менший, ніж в аварійному режимі:

$$\Delta P_{as0} + \Delta P_m \leq \Delta P_{te}. \quad (10)$$

Використання рівняння (10) дає можливість обґрунтувати надійність і працездатність розглянутих систем у разі виникнення аварійних ситуацій без залучення недопустимих випробувань в аварійних умовах.

## Висновки

1. Адаптація результатів експериментальної кваліфікації клапанів систем аварійного видалення пари і газу на однофазному середовищі до аварійних умов двофазних потоків є необхідним і актуальним заходом, якій потрібно проводити для забезпечення безпеки ЯЕУ.

2. Подано аналіз адаптації результатів експериментальної кваліфікації на закриття на однофазному середовищі клапанів систем аварійного видалення пари і газу до аварійних умов двофазних потоків.

3. Параметрами кваліфікації вважаємо динамічний напір на замикаючий пристрій клапана в однофазних потоках експлуатаційних випробувань та динамічний напір у двофазних потоках аварійних режимів.

4. Визначено умови адаптації результатів експериментальної кваліфікації на закриття клапанів систем аварійного видалення пари та газу до аварійних умов дозвукових і трансзвукових течій двофазного потоку у проточній частині клапанів.

## Список використаної літератури

- [1] IAEA-EBR-WWER-05. Safety Issues and Their Ranking for WWER-1000 Model 320 Nuclear Power Plants. A Publication of the Extrabudgetary Programme on the Safety of WWER and RBMK Nuclear Power Plants. Vienna: IAEA, 1997. 223 p.
- [2] Королев А.В. Анализ и моделирование теплоэнергетического оборудования, работающего с двухфазными течениями. Одесса: «Астропринт», 2010, 456 с.
- [3] Науково-технічні основи заходів підвищення безпеки АЕС з ВВЕР. Інститут проблем безпеки АЕС НАН України. Під редакцією О.О. Ключникова, Чорнобиль: 2012, 296 с.
- [4] Деменков В.М., Шугайло О.П., Мустафін М.А., Макаренко М.В. Оцінка цілісності обладнання та трубопроводів АС на основі пов'язаних розрахунків в ANSYS і RELAPCODE. Ядерна та радіаційна безпека №3(87) (2020). С. 46–54.
- [5] 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.
- [6] 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.

- [7] Skalozubov V., Bilous N., Pirkovskiy D., Kozlov I., Komarov Yu., Chulkin O. Water hammers in transonic modes of steam-liquid flows in NPP equipment. *Nuclear & Radiation Safety*. 2019. No. 2(82). P. 46–49.

V. A. Kondratyk

#### ADAPTATIONS OF RESULTS OF EXPERIMENTAL QUALIFICATION OF PASSIVE SAFETY SYSTEMS OF NUCLEAR POWER PLANTS

**Problems.** An urgent issue of ensuring the safety of nuclear power plants is the adaptation of the results of experimental qualification of the fittings of passive safety systems in a single-phase environment to emergency conditions of two-phase flows. For most of the equipment of systems important for the safety of nuclear power plants, there is no principled possibility of qualification through direct tests in emergency conditions. The experience of operating nuclear power plants, as well as the results of simulations after design accidents, determined the possible inconsistency of the operating conditions of the fittings in emergency situations and in the modes of operational tests with a single-phase steam-gas environment. Thus, it is necessary to adapt the results of the experimental qualification of the fittings of the emergency steam and gas removal systems in a single-phase environment to the emergency conditions of two-phase flows.

**The aim of the study.** The purpose of this article is sufficient justification of the adaptation of test results on a single-phase environment to the conditions of emergency processes with a two-phase environment.

**Methodology of implementation.** To achieve the goals of the study, deterministic modeling of the conditions and criteria of operation/testing of valves of emergency steam and gas removal systems was used.

**Research results.** An analysis of the validity of the results of the experimental qualification was performed for the dynamic pressure pressure on the closing device in the test mode (single-phase flow mode) and the dynamic pressure pressure on the closing device in the emergency mode (two-phase flow mode). The adaptation of the results of the experimental qualification for closing the valves of the emergency steam and gas removal systems in a single-phase environment to the emergency conditions of two-phase flows was carried out under the conditions of subsonic and supersonic flow regimes.

**Conclusions.** The conditions for adapting the results of the experimental qualification for closing the valves of the emergency vapor gas removal systems to the emergency conditions of subsonic and transonic flows of two-phase flow in the flow part of the valves have been determined. The dynamic pressure on the closing device of the valve in single-phase flows of operational tests and the dynamic pressure in two-phase flows of emergency modes are considered qualification criteria.

**Key words:** qualification, safety system, nuclear power plant

Рекомендована Радою  
інституту атомної та теплової енергетики  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
12 січня 2022 року

Прийнята до публікації  
27 червня 2022 року