

О. С. Балашевський

ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України»,
просп. Академіка Палладіна, 34а, Київ, 03142
канд. техн. наук, ORCID: 0000-0003-3742-6112

Ю. С. Кацарський

Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України,
«Одеської політехніки» та Мінекології України, просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044
ORCID: 0009-0001-9932-2880

Є. М. Мазур

Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України,
«Одеської політехніки» та Мінекології України, просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044
ORCID: 0009-0005-0936-4411

В. В. Грибанов

Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України,
«Одеської політехніки» та Мінекології України, просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044
ORCID: 0009-0005-7315-2667

Г. С. Дербеньов

Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України,
«Одеської політехніки» та Мінекології України, просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044
ORCID: 0009-0005-1881-2853

Кваліфікація пропускної спроможності запобіжних клапанів та пароскидних пристроїв ядерних енергоустановок

Ключові слова:

кваліфікація,
запобіжний клапан,
пароскидальний пристрій,
ядерна енергоустановка,
ВВЕР-1000

Один з актуальних уроків аварії на АЕС «Фукусіма» полягає в тому, що під час аналізу безпеки та розробки відповідних протиаварійних заходів необхідно враховувати навіть малоімовірні аварійні події, які можуть призвести до негативних наслідків, а також імовірність виникнення багатьох відмов систем управління аварійними процесами. Запобіжні клапани реактора та парогенераторів ядерних енергоустановок із ВВЕР-1000 призначені для захисту корпусів реактора та парогенераторів, що проходять щорічну експериментальну кваліфікацію надійності під час експлуатаційних випробувань. Однак такі випробування можуть не охоплювати всі можливі аварійні режими. Тому, з урахуванням уроків аварії на АЕС «Фукусіма», актуальною є також розробка методів кваліфікації надійності запобіжних клапанів реактора та парогенераторів. Було розроблено метод кваліфікації пропускної спроможності запобіжних клапанів реактора і парогенераторів, а також пароскидальних пристроїв систем безпеки в умовах імпульсної термодинамічної нестійкості. Застосування цього підходу дало змогу встановити граничні умови імпульсної термодинамічної нестійкості щодо площі прохідного перерізу парового/пароводяного потоку на конфузорній ділянці запобіжного клапана/пароскидального пристрою. Розбіжність значень граничних умов ім-

пульсної термодинамічної нестійкості для окремих систем зумовлена різницею їхніх конструктивно-технічних параметрів та умов проведення експлуатаційних випробувань. На основі отриманих результатів доведено, що запобігання виникненню імпульсної термодинамічної нестійкості забезпечено для зазначених запобіжних клапанів та пароскидальних пристроїв за умови повністю «відкритих» прохідних перерізів конфузornoї ділянки проточної зони. Встановлено обґрунтованість екстраполяції результатів експлуатаційних випробувань на паровому середовищі згаданих запобіжних клапанів/пароскидальних пристроїв для умов аварійних ситуацій на ядерних енергоустановках з ВВЕР-1000.

© О. С. Балашевський, Ю. С. Кацарський, Є. М. Мазур, В. В. Грибанов, Г. С. Дербеньов, 2026. Ліцензія CC BY 4.0

Актуальність проблеми

Актуальність розрахункової (аналітичної) кваліфікації пропускної спроможності запобіжних клапанів (ЗК) імпульсно-запобіжного пристрою компенсатора тиску, парогенераторів та пароскидальних пристроїв (ПСП) систем безпеки визначається тим, що експлуатаційні випробування їх пропускної спроможності проводяться на паровому середовищі й можуть істотно відрізнятись від умов аварійних режимів.

Зокрема, аварії з надходженням до ЗК/ПСП водяного або пароводяного середовища можуть призвести до підвищення динамічних навантажень на робочі органи, а за певних умов — до їх «заклинювання» та зменшення площі прохідного перерізу потоку. Унаслідок зменшення площі прохідного перерізу швидкість потоку (за інших рівних умов) збільшується і в перерізі з мінімальною площею за певних умов може досягти швидкості звуку (трансзвукові режими потоку в проточних зонах ЗК/ПСП). Наслідками трансзвукових режимів можуть бути умови імпульсної термодинамічної нестійкості (ІТН), які визначають умови гідродинамічних ударів з гальмуванням потоку та порушеннями пропускної спроможності [1].

Представлену роботу присвячено розробці методу кваліфікації пропускної спроможності ЗК/ПСП в умовах ІТН.

Метод кваліфікації пропускної спроможності ЗК/ПСП

Основні положення і допущення

1. Критерій кваліфікації пропускної спроможності ЗК/ПСП — забезпечення регулювання тиску в реакторі та об'ємі парогенератора.

2. Умова кваліфікації пропускної спроможності ЗК/ПСП — запобігання умовам ІТН у проточних зонах унаслідок трансзвукових режимів, які порушують умови забезпечення регулювання тиску в реакторі та в об'ємі парогенератора:

$$M(F_c) = \frac{v_c}{v_a(F_c)} < 1, \quad (1)$$

де M — критерій Маха; F_c — мінімальна площа прохідного перерізу в проточній зоні ЗК/ПСП; v_c — середня швидкість потоку в перерізі F_c ; $v_a(F_c)$ — швидкість звуку в перерізі F_c .

3. Критерій кваліфікації пропускної спроможності ЗК/ПСП визначається необхідною масовою витратою для стійкого регулювання тиску в реакторі та об'ємі парогенератора [1]:

$$G = \mu F_0 \sqrt{\rho_0 \Delta P}, \quad (2)$$

де μ — емпіричний параметр (коефіцієнт) витрати; F_0 — площа прохідного перерізу на вході до ЗК/ПСП; ρ_0 — густина потоку на вході до ЗК/ПСП; ΔP — перепад тиску на ЗК/ПСП.

Враховуючи прийняті положення і допущення, наводимо рівняння збереження маси, імпульсу та енергії рівноважного гомогенного потоку в конфузornoї частині проточної зони ЗК/ПСП [1]:

$$G = \rho_0 v_0 F_0 = F_c v_c \rho_c, \quad (3)$$

$$P_0 + \rho_0 v_0^2 = P_c + \rho_c v_c^2, \quad (4)$$

$$i_0 = i_v(P_v) \varphi_c + i_1(P_c)(1 - \varphi_c), \quad (5)$$

де v_0 — середня швидкість потоку на вході до конфузornoї зони; ρ_c — густина потоку в перерізі F_c ; P_0, P_c — тиск на вході до конфузornoї зони та в мінімальному

перерізі F_c ; i_0, i_v, i_1 — питома ентальпія потоку на вході, парової та рідкої фази відповідно; P_v — тиск парової фази; φ_c — паровміст потоку в перерізі F_c .

Після перетворення рівнянь (3)–(5) з урахуванням рівнянь (1) і (2) маємо:

$$M = \frac{\mu \sqrt{\rho_0 \Delta P}}{\rho_c(P_c, \varphi_c) v_a(P_c, \varphi_c)} \frac{F_0}{F_c}, \quad (6)$$

$$P_c = P_0 - \mu^2 \Delta P \left(\frac{\rho_0 F_0^2}{\rho_c F_c^2} - 1 \right), \quad (7)$$

$$\varphi_c = \frac{i_0(P_0, T_0, \varphi_0) - i_1(P_c)}{i_v(P_c) - i_1(P_c)}, \quad (8)$$

де швидкість звуку в перерізі F_c у загальному випадку [1]

$$v_a(P_c, \varphi_c) = \sqrt{v_{av}^2 \varphi_c + v_{al}^2 (1 - \varphi_c)}, \quad (9)$$

v_{av}, v_{al} — швидкість звуку в паровій та рідкій фазі відповідно; $\rho_0 = \rho_v(P_0) \varphi_0 + \rho_l(P_0)(1 - \varphi_0)$; $\rho_c = \rho_v(P_0) \varphi_0 + \rho_l(P_c)(1 - \varphi_0)$; ρ_v, ρ_l — густина парової та рідкої фази відповідно. Рівняння (6)–(9) є системою трансцендентних рівнянь, рішення яких може бути отримане ітераційними методами відносно параметра P_c [1].

З отриманих рішень (6)–(9) випливає, що визначальний вплив на забезпечення умов запобігання ІТН та необхідної пропускної спроможності ЗК/ПСП (1) при заданих вихідних параметрах (P_0, φ_0, i_0) у загальному випадку надають такі конструкційні параметри:

$$K_{oc} = \frac{F_0}{F_{co}}; \quad K_{co} = \frac{F_{co}}{F_c}, \quad (10)$$

де F_{co} — площа прохідного перерізу на вході до конфузornoї частини прохідної зони ЗК/ПСП.

Залежно від конструкції ЗК/ПСП в окремих випадках $K_{oc} = 1$ та $K_{co} = F_0/F_c$.

У випадку вимушеного зменшення F_{co} під час «відкриття» прохідної зони ЗК/ПСП (наприклад, унаслідок «заклинювання» робочого органу) швидкість потоку на вході до конфузornoї частини та в перерізі F_c збільшується. За певних умов це може призвести до виникнення трансзвукових режимів течії та ІТН і, відповідно, до порушення пропускної спроможності ЗК/ПСП.

Аналіз результатів кваліфікації

Розрахункову кваліфікацію рішень (6)–(9) для визначення умов пропускної спроможності (1) про-

ведено для наступних ЗК/ПСП ядерних енергоустановок з ВВЕР-1000:

ЗК Sempell імпульсно-запобіжного пристрою компенсатора тиску;

ЗК парогенератора;

ПСП парогенератора — швидкодіючі редуційні пристрої скидання пари до атмосфери/конденсатора турбіни (ШРП-А/ШРП-К).

Конструкційно-технічні параметри та умови проведення експлуатаційних випробувань зазначених систем представлено у [2, 3].

У результаті проведеної розрахункової кваліфікації встановлено:

1) умова кваліфікації (1) ЗК Sempell імпульсно-запобіжного пристрою компенсатора тиску ($P_0 = 15,7$ МПа) виконується в таких граничних випадках:

$$\frac{F_{co}}{F_{co0}} > 0,8 \text{ при } \varphi_0 = 1, \quad (11)$$

$$\frac{F_{co}}{F_{co0}} > 0,7 \text{ при } \varphi_0 = 0, \quad (12)$$

де F_{co0} — повністю «відкрита» площа прохідного перерізу на вході до конфузornoї зони; F_{co} — частково «відкрита» площа прохідного перерізу на вході до конфузornoї зони;

2) умова кваліфікації (1) ЗК парогенератора ($P_0 = 6,8$ МПа) виконується в таких граничних випадках:

$$\frac{F_{co}}{F_{co0}} > 0,7 \text{ при } \varphi_0 = 1, \quad (13)$$

$$\frac{F_{co}}{F_{co0}} > 0,6 \text{ при } \varphi_0 = 0; \quad (14)$$

3) умова кваліфікації (1) ШРП-А/ШРП-К ($P_0 = 6,0$ МПа) виконується в таких граничних випадках:

$$\frac{F_{co}}{F_{co0}} > 0,6 \text{ при } \varphi_0 = 1, \quad (15)$$

$$\frac{F_{co}}{F_{co0}} > 0,5 \text{ при } \varphi_0 = 0. \quad (16)$$

Базуючись на отриманих результатах розрахункової кваліфікації пропускної спроможності ЗК/ПСП ядерних енергоустановок з ВВЕР-1000 (11)–(16), встановлено:

1) умова кваліфікації пропускної спроможності (1) виконується для всіх наведених систем

при повністю «відкритому» прохідному перерізі конфузornoї ділянки;

2) граничні умови частково «відкритих» прохідних перерізів конфузornoї ділянки визначають умови виникнення ІТН та порушення пропускної спроможності ЗК/ПСП; розбіжність значень граничних умов визначаються різницею конструктивно-технічних параметрів та умовами проведення експлуатаційних випробувань ЗК імпульсно-запобіжного пристрою компенсатора тиску, ЗК парогенератора, ШРП-А/ШРП-К;

3) граничні умови (11), (13), (15), що відповідають умовам експлуатаційних випробувань на паровій фазі, є більш «жорсткими», ніж відповідні граничні умови (12), (14), (16) для випробувань на водяному/пароводяному середовищі. Це визначає обґрунтованість екстраполяції результатів експлуатаційних випробувань на умови аварійних ситуацій.

Висновки

1. Розроблено метод кваліфікації пропускної спроможності запобіжних клапанів реактора і парогенераторів, а також пароскидальних пристроїв систем безпеки в умовах ІТН.

2. На базі розробленого методу встановлено граничні умови ІТН щодо площі прохідного перерізу парового/пароводяного потоку на конфузornoї ділянці запобіжного клапана/пароскидального пристрою. Розбіжність значень граничних умов ІТН для окремих систем визначаються різницею конструктивно-технічних параметрів та умовами проведення експлуатаційних випробувань.

3. На базі розробленого методу встановлено, що запобігання умовам ІТН забезпечено для зазначених запобіжних клапанів/пароскидальних пристроїв за умов повністю «відкритих» прохідних перерізів конфузornoї ділянки проточної зони.

4. Встановлено обґрунтованість екстраполяції результатів експлуатаційних випробувань на паровому середовищі згаданих запобіжних клапанів/пароскидальних пристроїв в умовах аварійних ситуацій на ядерних енергоустановках з ВВЕР-1000.

Список використаної літератури

1. Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР / под ред. А. А. Ключникова. – Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. – 200 с.

2. Кацарський Ю. Кваліфікація випробувань запобіжних клапанів реактора / Ю. Кацарський. – Lambert Academic Publishing, 2024. – 145 с.

3. Mazur Y. Passive safety systems at nuclear power plants / Y. Mazur. – Lambert Academic Publishing, 2024. – 230 p.

**O. S. Balashevskyi¹, Yu. S. Katsarskyi²,
Ye. M. Mazur², V. V. Hrybanov², H. S. Derbenov²**

¹ State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine", 34a, Academician Palladin Ave, Kyiv, 03142

² Interagency Center for Fundamental Scientific Research in Energy and Ecology Sector of the National Academy of Sciences of Ukraine, Odesa Polytechnic and Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, 1, Shevchenko Ave, Odesa, 65044

Qualification of the Discharge Capacity of Safety Valves and Steam Dump Devices of Nuclear Power Plants

One of the relevant lessons of the Fukushima accident is that when analyzing safety and developing appropriate emergency measures, it is necessary to take into account even unlikely emergency events that can lead to negative consequences, as well as the possibility of multiple failures of emergency control systems. Safety valves of the reactor and steam generators of nuclear power plants with VVER-1000 are designed to protect against destruction of the reactor vessels and steam generators, which undergo annual experimental reliability qualification during operational tests. However, these tests may not cover all possible emergency modes. Therefore, considering the lessons of the Fukushima accident, the development of reliability qualification methods for reactor and steam generator relief valves is of high relevance.

Thus, a method for qualifying the discharge capacity of reactor and steam generator safety valves, as well as steam dump devices of safety systems under conditions of pulse thermodynamic instability has been developed.

The use of this approach allowed us to establish the boundary conditions of pulse thermodynamic instability have been found with respect to the steam/steam-water flow area in the confusing section of the safety valve/steam dump device. The discrepancy in the values of the boundary conditions of pulse thermodynamic instability for individual systems is determined by the difference in design and technical parameters and the operational test conditions.

Based on the results obtained, it has been established that the prevention of pulse thermodynamic instability conditions is ensured for the considered safety valves/steam dump devices for conditions of completely “open” flow area of the confusing section of the flow zone.

The validity of extrapolation of the results of operational tests on the steam environment of the considered safety valves/steam dump devices for emergency conditions at nuclear power plants with VVER-1000 has been found.

Keywords: qualification, safety valve, steam dump device, nuclear power facility, VVER-1000.

References

1. Klyuchnikov A. A. (ed.) (2010). *Nauchno-tehnicheskie osnovy meropriyatiy povysheniya bezopasnosti AES s VVER* [Scientific and technical basics of measures to improve the safety of NPPs with WWER]. Chornobyl: Institute for Safety Problems of NPP of the National Academy of Sciences of Ukraine, 200 p. (in Rus.)
2. Katsarskyi I. (2024). *Kvalifikatsiia vyprobuvan zapobizhnykh klapaniv reaktora* [Reactor safety valve test qualification]. Lambert Academic Publishing, 145 p. (in Ukr.)
3. Mazur Y. (2024). *Passive safety systems at nuclear power plants*. Lambert Academic Publishing, 230 p.

Надійшла / Received 08.01.2026

Рекомендована до друку / Accepted 13.04.2026