

УДК 621.039.586:614.876

Volodymyr M. Vashchenko¹, Dr. of Sci., Professor of the Department of Ecology
e-mail: nucleoroid@gmail.com

Volodymyr I. Skalozubov², Dr. of Sci., Professor of the Department of Nuclear Power Plants, Scientific Director of the Interdepartmental Center for Fundamental Scientific Research in the Field of Energy and Ecology of the NASU, "Odesa Polytechnic" and Ministry of Ecology of Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2361-223X> *e-mail*: skalozubov@op.edu.ua

Iryna B. Korduba³, Cand. of Tech. Sci., associate professor of the Department of Ecology
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465> *e-mail*: kordubairuna@gmail.com

Serhiy I. Kosenko², Cand. of Tech. Sci., associate professor of the Department of Theoretical and Experimental Nuclear Physics, researcher of the Center
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-5644> *e-mail*: skosenko@op.edu.ua

Olena H. Zhukova³, Cand. of Tech. Sci., associate professor of the Department of Ecology
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0662-9996> *e-mail*: zhukova.og@knuba.edu.ua

¹ National Aviation University, Kyiv, Ukraine

² Odesa Polytechnic State University, Odesa, Ukraine

³ Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

CRITERIA OF THERMOCHEMICAL CONDITIONS OF STEAM GAS EXPLOSIONS IN DYNAMIC ACCIDENT MODES AT NUCLEAR POWER UNITS WITH WWER REACTORS

Abstract. *The main lessons of the major accident at the Fukushima-Daiichi NPP in 2011 for the nuclear power industry identify the need to model, analyze and develop emergency measures for relatively unlikely events with catastrophic environmental consequences, taking into account multiple failures of safety systems. Steam-gas explosions became one of the main causes of the catastrophic environmental consequences of the Chernobyl and Fukushima accidents. Criteria and conditions for the occurrence of steam-gas explosions in dynamic emergency modes in the "tight" reactor circuit of nuclear power reactor units (NPP) with water-water reactors (WWER) with failures of safety systems valves and emergency steam gas removal are determined by the rate of change of thermodynamic and physico-chemical parameters. A method for determining the criteria and conditions for the occurrence of steam-gas explosions in dynamic accident modes with a "tight" reactor circuit and failure of safety valves for modeling the initial emergency events – seismic effects, falling of massive objects, etc. is presented. The conditions for the occurrence of hydrogen explosions are determined by the maximum rate of increase in the temperature of fuel oil shells, and the conditions for steam explosions are determined by the maximum rate of pressure increase as a result of the intensification of vaporization processes. The criteria for the occurrence of steam explosions in dynamic emergency modes are determined by the maximum pressure amplitude and the propagation speed of acoustic disturbances in the steam volume. And the criteria for hydrogen detonation in dynamic emergency modes are determined by the maximum amplitude of the increase in the temperature of the fuel shells and the average flow rate of the coolant in the active zone of the reactor.*

Key words: *steam-gas explosion; nuclear power unit*

В.М. Ващенко¹, В.І. Скалозубов², І.Б. Кордуба³, С.І. Косенко², О.Г. Жукова³

¹ Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

² Державний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна

³ Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

КРИТЕРІЇ ТЕРМОХІМІЧНИХ УМОВ ПАРОГАЗОВИХ ВИБУХІВ У ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ АВАРІЙ НА ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОБЛОКАХ ІЗ РЕАКТОРАМИ ВВЕР

Анотація. Основні уроки великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi у 2011 р. для ядерної енергетики визначають необхідність моделювання, аналізу та розробки протиаварійних заходів для відносно малоймовірних подій з катастрофічними екологічними наслідками, з урахуванням численних відмов систем безпеки. Парогазові вибухи стали одною з основних причин катастрофічних екологічних наслідків Чорнобильської і Фукусімської аварій. Критерії і умови виникнення парогазових вибухів у динамічних аварійних режимах у «щільному» реакторному контурі ядерних енергетичних реакторних блоків (ЯЕРБ) із водо-водяними реакторами (ВВЕР) з відмовами систем запобіжних клапанів і аварійного парогазовидалення визначаються швидкістю зміни термодинамічних і фізико-хімічних параметрів. Представлено метод визначення критеріїв і умов виникнення парогазових вибухів при динамічних режимах аварій зі «щільним» реакторним контуром та відмовами запобіжних клапанів моделювання вихідних аварійних подій – сейсмічні впливи, падіння масивних об'єктів тощо. Умови виникнення водневих вибухів визначаються максимальною швидкістю збільшення температури оболонки твєлів, а умови парових вибухів – максимальною швидкістю збільшення тиску в результаті інтенсифікації процесів пароутворення. Критерії виникнення парових вибухів у динамічних аварійних режимах визначаються граничною амплітудою тиску та швидкістю розповсюдження акустичних обурень у паровому об'ємі. А критерії водневої детонації у динамічних аварійних режимах визначаються граничною амплітудою збільшення температури оболонки твєлів та середньою швидкістю течії теплоносія в активній зоні реактора.

Ключові слова: парогазовий вибух; ядерний енергоблок

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.4.128-134>

Вступ

Питанням моделювання аварій і аналізу безпеки ядерних енергоустановок (ЯЕУ) присвячено багато досліджень [1–11 та ін.]. Однак питання визначення критеріїв і умов виникнення парогазових вибухів під час аварій вивчені недостатньо.

Руйнівні парогазові вибухи стали одною з основних причин катастрофічних екологічних наслідків Чорнобильської і Фукусімської аварій [1, 2].

При виконанні аналізу безпеки ЯЕРБ із ВВЕР зазвичай моделюються умови парогазових вибухів для відносно «повільно» протікаючих аварійних процесів, виходячи з наступних причин:

1. Априорі покладається успішне спрацьовування систем безпеки (СБ), які обмежують тиск у реакторній установці – запобіжні клапани, пароскидальні пристрої, СБ подачі охолодження та ін. Однак уроки аварії на АЕС «Фукусіма-1»

визначають необхідність моделювання аварійних процесів з урахуванням численних відмов СБ. До того ж відмови запобіжних клапанів реактора стали однією з головних причин важкої запроектої ядерної аварії на АЕС ТМІ-2 в США, у 1979 р., та аварійного інциденту на Рівненській АЕС в Україні, у 2009 р.

2. Питання визначення критеріїв і умов виникнення парогазових вибухів у динамічних/«швидкоплинних» аварійних режимах зі «щільним» реакторним контуром з відмовами запобіжних клапанів поки що не розглядалися. Термохімічні критерії і умови виникнення парогазових вибухів у динамічних аварійних режимах визначаються швидкістю зміни термодинамічних і фізико-хімічних параметрів.

До аварій зі «щільним» реакторним контуром відносяться: екстремальні вихідні події – землетруси, затоплення, торнадо, урагани, падіння великих об'єктів та ін.; реактивні аварії і відмови аварійного захисту реактора; течі і розриви парових та живильних трубопроводів 2-го контуру ЯЕРБ із ВВЕР; відмови головних циркуляційних насосів тощо.

Традиційно в ядерній енергетиці аналіз безпеки проводиться на основі ймовірного і детерміністичного моделювання вихідних аварійних подій (течі реакторного контуру, повна тривала втрата електрозабезпечення енергоблоків, розриви паропроводів, відмови систем, важливих для безпеки, людський фактор (критичні помилкові неадекватні дії персоналу), сейсмічні впливи, падіння масивних об'єктів – літаків, метеоритів, затоплення промислових майданчиків АЕС, смерчі, урагани, піщані бурі і інше) [3–11].

У даній роботі запропоновано метод визначення критеріїв і умов виникнення парогазових вибухів при динамічних режимах аварій зі «щільним» реакторним контуром та відмовами запобіжних клапанів.

Критерії і умови парогазових вибухів при аваріях із «щільним» реакторним контуром.

Основні положення і допущення.

1. Умови виникнення парогазових вибухів моделюються для динамічних аварійних режимів у «щільному» реакторному контурі з відмовами запобіжних клапанів компенсатора тиску і систем аварійного парогазовидалення.

2. Критерій водневого вибуху визначається максимальною швидкістю зміни температури оболонки твелів і генерації водню внаслідок термохімічної пароцирконієвої реакції, а критерій парового вибуху – максимальною швидкістю збільшення тиску внаслідок інтенсифікації процесів пароутворення.

3. Реакторний контур і парогенератори моделюються як системи з осередненими по об'ємах теплогідродинамічними параметрами.

4. Консервативно покладається достатня для водневої детонації кількість розчищеного повітря.

З урахуванням прийнятих допущень рівняння теплогідродинаміки в реакторному контурі і парогенераторах ЯЕУ із ВВЕР [3–6]:

$$R_{TV} = \frac{\delta_F}{\lambda_F} + \frac{\delta_g}{\lambda_g} + \frac{\delta_{ob}}{\lambda_{ob}}, \quad (1)$$

де δ_F , δ_g , δ_{ob} – товщина паливної матриці, газового зазору і оболонки твела;
 λ_F , λ_g , λ_{ob} – коефіцієнт теплопровідності паливної матриці, газового зазору і оболонки твела.

Умови водневої детонації у відносно «повільних» аварійних процесах:

$$T_{0b} \geq T_{0bm}; \quad C_H \geq C_{Hm}, \quad (2)$$

де C_H , C_{Hm} – поточна і гранично допустима для вибухобезпечності концентрація водню.

C_{Hm} у загальному випадку залежить від концентрації кисню (каталізатор водневої детонації) і паровмісту [1, 2].

Умови парогазових вибухів у динамічних аварійних режимах:

$$\frac{dP_R}{dt} \geq (P_{Rm} - P_{R0})a_v(P_R)/H_{VR}, \quad (3)$$

$$\frac{dP_g}{dt} \geq (P_{gm} - P_{g0})a_v(P_g)/H_{Vg}, \quad (4)$$

$$\frac{dT_{0b}}{dt} \geq (T_{0bm} - T_{0b0})v_T/H_a, \quad (5)$$

де P_{R0} , P_{g0} – початковий тиск у RC і SG; P_{Rm} , P_{gm} – гранично допустимий тиск у RC і SG; a_v – швидкість звуку в паровому об'ємі; – гранично допустима і початкова температура оболонок твелів; H_{VR} , H_{Vg} – еквівалентний розмір парового об'єму в реакторі і парогенераторі; v_T – середня швидкість теплоносія в активній зоні реактора; H_a – висота активної зони.

Враховуючи рівняння (1)–(5), у загальному випадку умови парогазових вибухів у «щільному» RC і SG:

$$f_R(t_1) \geq (P_{Rm} - P_{R0})v_{aR}(t_1), \quad (6)$$

$$f_g(t_2) \geq (P_{gm} - P_{g0})v_{ag}(t_2), \quad (7)$$

$$f_{0b}(t_3) \geq (T_{0bm} - T_{0b0})v_H(T_{0bm}), \quad (8)$$

$$T_{0b}[f_{0b}(t_4)] \geq T_{0bm}; \quad C_H(t_5) \geq C_{Hm}. \quad (9)$$

Момент можливого настання парогазового вибуху в процесі позапроектної аварії зі «щільним» реакторним контуром і парогенератором:

$$t_0 = \min(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5). \quad (10)$$

Висновки

1. Основні уроки великої аварії на АЕС “Fukushima-1” у 2011 р. для ядерної енергетики визначають необхідність моделювання, аналізу та розробки протиаварійних заходів для відносно малоймовірних подій, але які мають катастрофічні екологічні наслідки, з урахуванням численних відмов систем безпеки.

2. Критерії і умови виникнення парогазових вибухів у динамічних аварійних режимах у «щільному» реакторному контурі ядерних енергоустановок із ВВЕР та з відмовами систем запобіжних клапанів і аварійного парогазовидалення визначаються швидкістю зміни термодинамічних і фізико-хімічних параметрів.

3. Представлено детерміністський метод визначення критеріїв і умов парогазових вибухів у динамічних аварійних режимах у «щільному» реакторному контурі з відмовами запобіжних клапанів та систем аварійного парогазовидалення. Умови виникнення водневих вибухів визначаються максимальною швидкістю збільшення температури оболонок твєлів, а умови парових вибухів – максимальною швидкістю збільшення тиску внаслідок інтенсифікації процесів пароутворення.

4. Критерії виникнення парових вибухів у динамічних аварійних режимах визначаються граничною амплітудою тиску та швидкістю розповсюдження акустичних обурень у паровому об'ємі. Критерії водневої детонації у динамічних аварійних режимах визначаються граничною амплітудою збільшення температури оболонок твєлів та середньою швидкістю течії теплоносія в активній зоні реактора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report. IAEA, 2011. 160 p.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Вышемирский М. П., Мазурок А. С., Носовский А. В. Анализ влияния начальных и граничных условий на формирование термоудара корпуса реактора. Ядерна та радіаційна безпека. 2013. № 1(57). С. 26–30.
6. Мазурок А. С., Алексеев Ю. П., Крушинский А. Г., Корницкий А. В. Валидация теплогидравлической модели реакторной установки с детальной разбивкой опускного участка для анализа термических нагрузок на корпус реактора. Ядерна та радіаційна безпека. 2012. № 1(53). С. 16–21.
7. Результаты проведения стресс-тестов: Национальный отчет Украины. ГИЯРУ, 2011. 137 с.
8. Воробьев Ю. Ю., Перепелица М. Л., Свердлов В. В. Анализ тяжелой аварии в бассейне выдержки отработавшего топлива для энергоблока ВВЭР-1000 при помощи MELCOR 1.8.5. Ядерна та радіаційна безпека. 2012. № 3(55). С. 3–9.
9. Accident Management Programs in Nuclear Power Plants: A Guidebook. Technical Report Series No 368. Vienna.
10. Beclman R. J. Soviet-Designed Pressurized Water Reactor Symptomatic Emergency Operating Instruction Analytical Validation Procedure. International Nuclear Safety Program. Idaho.
11. 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.

Стаття надійшла до редакції 25.07.2022 і прийнята до друку після рецензування 12.10.2022

REFERENCES

1. IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report. (2011). IAEA.
2. Skalozubov, V.I., Huiyu, Z., Chulkin, O.A., & Pirkovskiy, D.S. (2017). Modelling method of conditions for reliability-critical hydraulic impacts on pumps of thermal and nuclear power plants. *Problems of Atomic Science and Technology*, 4(110), 74–78.
3. Skalozubov, V., Bilous, N., Pirkovskiy, D., Kozlov, I., Komarov, Yu., & Chulkin, O. (2019). Water hammers in transonic modes of steam-liquid flows in NPP equipment. *Nuclear & Radiation Safety*, 2(82), 46–49.
4. Skalozubov, V., Kozlov, I., Chulkin, O., Komarov, Yu., & Piontkovskiy, O. (2019). Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems. *Nuclear & Radiation Safety*, 1(81), 42–45.
5. Vyshemirskij, M.P., Mazurok, A.S., & Nosovskij, A.V. (2013). Analiz vlijanija nachal'nyh i granichnyh uslovij na formirovanie termoudara korpusa reaktora. *Jaderna ta radiacijna bezpeka*, 1(57), 26–30.
6. Mazurok, A.S., Alekseev, Ju.P., Krushinskij, A.G., & Kornickij, A.V. (2012). Validacija teplogidravlicheskoj modeli reaktornoj ustanovki s detal'noj razbivkoj opusknogo uchastka dlja analiza termicheskikh nagruzok na korpus reaktora. *Jaderna ta radiacijna bezpeka*, 1(53), 16–21.
7. Rezul'taty provedenija stress-testov: Nacional'nyj otchet Ukrainy. (2011). GIJaRU.
8. Vorob'ev, Ju.Ju., Perepelica, M.L., & Sverdlov, V.V. (2012). Analiz tjazhelej avarii v bassejne vyderzhki otrabotavshego topliva dlja jenergobloka VVJeR-1000 pri pomoshhi MELCOR 1.8.5. *Jaderna ta radiacijna bezpeka*, 3(55), 3–9.
9. Accident Management Programs in Nuclear Power Plants: A Guidebook. Technical Report Series No 368. Vienna.
10. Beclman, R.J. Soviet-Designed Pressurized Water Reactor Symptomatic Emergency Operating Instruction Analytical Validation Procedure. International Nuclear Safety Program. Idaho.
11. Antonyuk, N., Gerliga, V., & Skalozubov, V. (1990). Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 59(4), 1323–1328.

The article was received 25.07.2022 and was accepted after revision 12.10.2022

Ващенко Володимир Миколайович

доктор фізико-математичних наук, професор кафедри екології Національного авіаційного університету

Адреса робоча: пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

e-mail: nucleoroid@gmail.com

Скалозубов Володимир Іванович

доктор технічних наук, професор кафедри Атомних електростанцій, науковий керівник Міжвідомчого центру фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України

Адреса робоча: пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2361-223X> **e-mail:** skalozubov@op.edu.ua

Кордуба Ірина Богданівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри екології Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: Повітрофлотський проспект, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465> **e-mail:** kordubairuna@gmail.com

Косенко Сергій Ілліч

кандидат технічних наук, доцент кафедри Теоретичної і експериментальної ядерної фізики, науковий співробітник Центру

Адреса робоча: пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-5644> **e-mail:** skosenko@op.edu.ua

Жукова Олена Григорівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри екології Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: Повітрофлотський проспект, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0662-9996> **e-mail:** zhukova.og@knuba.edu.ua