

УДК 621.039

ПІДХОДИ МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ ТЕРМОАКУСТИЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ В НЕРІВНОВАЖНОМУ ДВОФАЗНОМУ ТЕПЛОНОСІЇ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

Кондратюк В.А.¹, кандидат технічних наук, **Скалозубов В.І.²**, доктор технічних наук,
Комаров Ю. О.³, доктор технічних наук, **Косенко С.І.⁴**, кандидат технічних наук,
Коньшин В.І.⁵, кандидат технічних наук

¹ Національний технічний університет України (КПІ імені Ігоря Сікорського), проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 0305637, E-mail: prorektor-agr@kpi.ua

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5035-311X>

² Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України, Проспект Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, E-mail: skalozubov@op.edu.ua

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2361-223X>

³ Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України, Проспект Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, E-mail: odessakomarov@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4696-6551>

⁴ Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України, Проспект Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, E-mail: skosenko@op.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-5644>

⁵ Національний технічний університет України (КПІ імені Ігоря Сікорського), проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 0305637, E-mail: vikonshin@meta.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2591-3589>

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.11>

Виникнення термоакустичної нестійкості в нерівноважному двофазному потоці теплоносія може істотно впливати на надійність і цілісність внутрішньокорпусних пристроїв ядерного реактора. На даний час актуальним питанням є розробка адекватних та обґрунтованих методів моделювання термоакустичної нестійкості в активній зоні ядерного реактора. Для умов перехідних і аварійних режимів ядерних енергоустановок із ВВЕР більш обґрунтованим є термодинамічний підхід визначення умов виникнення термоакустичної нестійкості нерівноважного двофазного теплоносія. Він заснований на закономірностях умов виникнення коливальних процесів при акустичних обуреннях термодинамічних параметрів потоку теплоносія в активній зоні ядерного реактора.

The occurrence of thermoacoustic instability in the non-equilibrium two-phase flow of the coolant can significantly affect the reliability and integrity of the nuclear reactor's internal devices. At present, the development of adequate and justified methods for modeling thermoacoustic instability in the active zone of a nuclear reactor is an urgent issue. For the conditions of transient and emergency modes of nuclear power plants with VVER, the thermodynamic approach of determining the conditions for the occurrence of thermoacoustic instability of a non-equilibrium two-phase coolant is more justified. It is based on the regularities of the conditions for the occurrence of oscillatory processes during acoustic disturbances of the thermodynamic parameters of the coolant flow in the active zone of a nuclear reactor.

Бібл. 12.

Ключові слова: термоакустична нестійкість, акустичні обурення, ядерний реактор.

Вступ. Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

В перехідних і аварійних режимах ядерних енергоустановок (ЯЕУ) можуть виникати нерівноважні

двофазні потоки теплоносія в активній зоні реакторів, які є необхідною умовою виникнення високочастотної коливальної теплогідродинамічної нестійкості (ТАН — термоакустична нестійкість) Під нерівноважним дво-

фазним потоком мається на увазі режим поверхневого кипіння з конденсацією парової фази в центральній «холодній» зоні прохідного перетину теплоносія. Виникнення термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні (АЗ) реактора супроводжується високоамплітудними високочастотними навантаженнями на тепловиділяючі елементи (твели) та внутрішньо корпусні пристрої реактора. [1,2]. Це може істотно вплинути на надійність і цілісність внутрішньокорпусних конструкцій реактора (в тому числі і на твели).

Умови виникнення термоакустичної нестійкості визначаються високочастотною коливальною нестійкістю двофазних нерівноважних потоках і умовами міжфазної взаємодії в акустичних хвилях. Основна частота термоакустичних коливань тепло гідродинамічних параметрів обернено пропорційна часу проходження звукової хвилі в системі.

Експериментально встановлено, що при ТАН амплітуди коливань тиску можуть досягати 50 % від середнього значення тиску; а основна частота коливань визначається часом розповсюдження акустичних хвиль у парогенеруючому каналі.

Сучасні детерміністські коди (RELAP, СОКРАТ, CATHARE та ін.) не моделюють умови виникнення ТАН в активній зоні ядерних реакторів [3, 4, 5, 6]. Тому актуальним питанням є розробка обґрунтованих методів моделювання умов виникнення ТАН в активній зоні реактора в перехідних і аварійних режимах.

У цій роботі представлено аналіз відомих підходів моделювання ТАН для обґрунтування адекватних методів визначення умов виникнення та способів усунення ТАН в активній зоні реакторів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [1] на основі теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що виникнення ТАН в активній зоні ядерних реакторів супроводжується високочастотними (сотні Герц). Також вони супроводжуються високоамплітудними коливаннями тиску (до 50 % від середнього тиску), які можуть суттєво вплинути на цілісність внутрішньо корпусних пристроїв реактора. Однак запропоновані методи моделювання умов виникнення ТАН мали загальний теоретичний характер та складні для практичного застосування. У роботі [1] також проведений аналіз відомого метода визначення умов ТАН на основі нерівноважної полідисперсної моделі двофазного потоку теплоносія запропоновано

метод визначення умов виникнення ТАН в активній зоні реактора в робочих, перехідних та аварійних режимах [2]. В результаті встановлено, що цей метод украй складний для практичного застосування під час аналізу безпеки ядерних енергоустановок. У роботі [2] також представлені численні експериментальні дані за межами області ТАН у парогенеруючих каналах у широкому діапазоні режимних параметрів (в т. ч. умови ядерних енергоустановок з ВВЕР). В результаті експериментальних досліджень встановлено: необхідною умовою ТАН в парогенеруючих каналах теплоенергетичного обладнання є режим нерівноважного («не догрітого») кипіння. При цьому пароутворення відбувається на поверхні нагрівання з конденсацією парової фази в холодному потоці теплоносія. Основна частота термоакустичних коливань визначається часом проходження акустичної хвилі в каналі. Амплітуда термоакустичних коливань досягає 50 % від середнього тиску в каналі, розвиток термоакустичних коливань походить від більш високочастотних гармонік до основної (енергетичної) гармоніки коливань. На умови виникнення термоакустичних коливань істотно впливають – розподіл тепловиділень по довжині каналу, що обігрівається, газонасиченість теплоносія та інші фактори. У роботі [7] розглянуто питання щодо умов виникнення тепло гідродинамічної нестійкості в запобіжних клапанах реакторної установки. В результаті встановлено умови виникнення аперіодичної нестійкості внаслідок трансзвукових режимів двофазних потоків теплоносія; а умови виникнення ТАН відсутні. У роботі [8] розглянуто питання умов виникнення гідродинамічної нестійкості в каналах активних систем безпеки, що забезпечують підживлення реакторної установки в аварійних режимах. Проте вплив систем безпеки на умови виникнення ТАН у роботі [8,9] не розглянуто.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – розробити критеріальний метод визначення умов виникнення ТАН в активній зоні ядерних реакторів, який дозволить підвищити експлуатаційну безпеку і надасть змогу розробити оперативну систему діагностики умов ТАН в активній зоні реакторних установок великої потужності.

Для досягнення поставленої мети встановлено завдання розробки математичної моделі оперативного способу визначення умов виникнення ТАН.

4 Аналіз підходів моделювання умов ТАН

На даний час сформовано два основних теоретичних підходи обґрунтування умов виникнення ТАН у парогенеруючих каналах [7,10]:

резонансний підхід, заснований на резонансному ефекті співпадіння частоти акустичних обурень ω_a і частоти імпульсів тиску при конденсації парових пазирів ω_R :

$$\omega_a = \omega_R; \quad (1)$$

термоакустичний підхід, заснований на термодинамічних закономірностях умов виникнення коливальних процесів при змінах тиску і маси в системі.

Умови обґрунтованості вказаних підходів розглянемо на прикладі системи з одиночного парового пазиря, що конденсується в об'ємі відносно «холодної» рідини.

Рівняння тепломасообміну в розгляданій системі:

$$\frac{d(\rho_v V_b)}{dt} = -G_c; \frac{dM_l}{dt} = G_c; \quad (2)$$

$$\frac{d(\rho_v V_b i_v)}{dt} = -G_c i_{vl}; G_c = \frac{\alpha F_b (T_v - T_l)}{i_{vl}}, \quad (3)$$

де t — час; ρ_v — щільність пари; V_b, F_b — об'єм і площа поверхні пазиря; M_l — маса «холодної» рідини; i_v, i_{vl} — питома ентальпія пари і фазового переходу конденсації; α — коефіцієнт тепловіддачі на поверхні пазиря; T_v, T_l — температура пари і «холодної» рідини.

Після перетворення рівнянь (2) та (3) отримаємо систему рівнянь:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{G_c i_l}{(i_v a_v^{-2} - \frac{d\rho_v i_v}{dP}) V_b} = f_p, \quad (4)$$

$$\frac{dV_b}{dt} = -\frac{G_c i_l + i_v a_v^{-2} f_p V_b}{\rho_v} = -f_b, \quad (5)$$

$$\frac{dM_l}{dt} = G_c, \quad (6)$$

$$P(t=0) = P_{l0}; V_b(t=0) = V_{b0}; M_l(t=0) = M_{l0}; V_b(t=\omega_R^{-1}) = 0. \quad (7)$$

Наближене консервативне рішення системи рівнянь (4), (5) та (7):

$$\omega_R \approx f_{b0}/V_{b0}, \quad (8)$$

$$P_l(t=\omega_R^{-1}) \approx P_{l0} + f_{p0} V_{b0}/f_{b0}. \quad (9)$$

Тоді умова (1) резонансного ефекту ТАН:

$$a_{vl}/L \approx f_{b0}/V_{b0}. \quad (10)$$

де a_{vl} — швидкість звуку в системі і в парі; L — приведений розмір системи.

З урахуванням $P_{l0} V_{b0} \approx P_a V_{ba}$ ($P_a = 0,1$ МПа) умови резонансного ефекту виникнення ТАН (10):

$$L \approx \frac{a_{vl} V_{ba} P_a}{P_{l0} f_{b0}}. \quad (11)$$

Аналіз отриманої залежності (11) визначив, що при $P_{l0} \gg P_a$ та $T_v - T_l \ll 50^\circ\text{K}$ умова резонансного ефекту ТАН виконується для системи з $L \ll 1,0$ м.

У форматі акустичних обурень тиску $\delta P \ll P_{l0}$ рівняння (4) та (6):

$$\frac{d\delta P}{dt} = \frac{\partial f_p}{\partial P} \delta P, \quad (12)$$

$$\frac{d\delta P}{dt} = \frac{\partial G_c}{\partial P} \delta P. \quad (13)$$

У рамках термодинамічного підходу умови виникнення ТАН, у системі що розглядається, «паровий пазир — рідка фаза» [10]:

$$\frac{\frac{d\delta P}{dt}}{\frac{d\delta M_l}{dt}} = \frac{\frac{\partial f_p}{\partial P}}{\frac{\partial G_c}{\partial P}} > 0. \quad (14)$$

Таким чином, перспективні методи визначення умов виникнення ТАН у перехідних і аварійних режимах ЯЕУ з ВВЕР повинні ґрунтуватися на термодинамічному підході.

5. Обговорення результатів розрахункового моделювання

Розроблено математичну модель оперативного способу визначення умов ТАН у двофазному нерівноважному потоці теплоносія, яка на відміну від відомих підходів [9,11,12] враховує вплив акустичних коливань тиску та низькочастотних флуктуаційних коливань витрати на умови виникнення ТАН.

На основі розробленої математичної моделі представлено критеріальний метод визначення умов ТАН в активній зоні ВВЕР.

На основі термодинамічного підходу отримано умови термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактора. Вони залежать від визначальних термодинамічних параметрів — потужність реактора, витрати теплоносія, тиску та температури теплоносія на вході та виході з активної зони. Всі зазначені параметри

контролюються штатною системою реакторного контролю ВВЕР. Встановлено, що в номінальному режимі роботи реактора теплоносії є стійким щодо термоакустичних коливань. Умови термоакустичної нестійкості можуть виникнути, наприклад, при заклинюванні декількох головних циркуляційних насосів.

Оперативні системи діагностики ЯЕУ не призначені для визначення та усунення умов ТАН в активній зоні ядерних реакторів. Основна причина такої ситуації полягає у відсутності достатньо обґрунтованих методів моделювання умов виникнення ТАН у активній зоні реакторних установок.

Представлений термодинамічний метод моделювання умов виникнення ТАН може бути основою для розробки відповідної оперативної системи діагностики реакторної установки типу ВВЕР, а також адаптований до реакторних установок

Висновки

1. Виникнення термоакустичної нестійкості в нерівноважному двофазному потоці теплоносія може істотно впливати на надійність і цілісність внутрішньокорпусних пристроїв ядерного реактора (в тому числі і твелів).

Сучасні детерміністські коди не моделюють умови виникнення термоакустичної нестійкості. Тому актуальним питанням є розробка адекватних та обґрунтованих методів моделювання термоакустичної нестійкості в активній зоні ядерного реактора.

2. На основі проведеного аналізу відомого резонансного підходу моделювання умов виникнення термоакустичної нестійкості (на прикладі одиночного пузиря, що конденсується) встановлено, що резонансні ефекти співпадіння частоти розповсюдження акустичних хвиль і частоти конденсації парових пузирів можуть бути значущими для відносно коротких каналів (менших за 1 м) при відносно низьких тисках.

3. Для умов перехідних і аварійних режимів ядерних енергоустановок із ВВЕР більш обґрунтованим є термодинамічний підхід визначення умов виникнення термоакустичної нестійкості нерівноважного двофазного теплоносія, заснований на закономірностях умов виникнення коливальних процесів при акустичних обуреннях термодинамічних параметрів потоку теплоносія в активній зоні ядерного реактора.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Герлига В.А., Скалозубов В.И. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС (Москва: Энергоатомиздат, 1992), 432 с.

2. Коврижский Ю.Л., Емельяненко Е.З., Скалозубов В.И. Пределы безопасной эксплуатации установок в отношении термоакустической неустойчивости теплоносителя в активной зоне. Ядерная та радиационная безопасность 1 (1998), 123-129.

3. Демьков В.М., Шугайло О.П., Мустафин М.А., Макаренко М.В. Оцінка цілісності обладнання та трубопроводів АС на основі пов'язаних розрахунків в ANSYS і RELAP CODE. Ядерная та радиационная безопасность №3(87) (2020). С. 46-54.

4. Шараевский Г.И. Проблемы підвищення показників надійності розрахункового визначення кризи тепловіддачі у водоохолоджуваних реакторах на базі комп'ютерних теплогідрравлічних кодів. Ядерная та радиационная безопасность №3(79) (2018). С. 46-54.

5. Мазурок А.С., Алексеев Ю.П., Крушинский А.Г., Корницкий А.В. Валидация теплогидравлической модели реакторной установки с детальной разбивкой опускаемого участка для анализа термических нагрузок на корпус реактора Nuclear & Radiation Safety. 2019. No.1(81). P.42—45. Ядерная та радиационная безопасность. 2012. № 1(53). С.16—21.

6. Грищенко Б. Ю., Полянский М. А., Севбо А. Е., Семенюк И. А. Применение вероятностных методов анализа безопасности АЭС при исследовании нарушения хрупкой прочности корпуса реактора. Ядерная та радиационная безопасность. 2013. № 1(57). С. 22—25.

7. Скалозубов В.И. та інш. Гідродинамічні удари в обладнанні ядерних енергоустановок при трансзвукових режимах течії парорідинних потоків. Ядерная та радиационная безопасность. № 2(82) (2019). С. 46-49.

8. Скалозубов В.И. та інш. Аналіз критичних умов надійності при гідроударах в активних системах безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР-1000. Ядерная та радиационная безопасность. № 1(81) (2019). С. 42-45.

9. Вышемирский М. П., Мазурок А. С., Носовский А. В. Анализ влияния начальных и граничных условий на формирование теплоудара корпуса реактора. Ядерная та радиационная безопасность. 2013. № 1(57). С. 26—30.

10. Научно-технические основы заходів підвищення безпеки АЕС з ВВЕР. Інститут проблем безпеки АЕС Національної академії наук України. Під редакцією академіка О.О. Ключникова. Чорнобиль, 2012, 296с.

11. I. Sharaievskii, N. Fialko, A. Nosovsky, L. Zimin, G. Sharaievskii. Actual problems of thermal physics of design and severe accidents of nuclear power units. Nuclear & Radiation Safety №2(70) (2016) P. 32-36.

12. Sauvage E., Musoyan G. Nuclear Reactor Severe Accident Analysis: Applications and Management Guidelines. SARnet 17, Budapest, Hungary, April 1-11, 2008.

APPROACHES TO MODELING CONDITIONS OF THERMOACOUSTIC INSTABILITY IN NON-EQUILIBRIUM TWO-PHASE COOLANT OF NUCLEAR REACTORS

Kondratyuk V.A.¹, Skalozubov V.I.², Komarov U.O.², Kosenko S.I.², Konshin V.I.¹

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Peremoga ave., 37, Kyiv, Ukraine, 0305637

² 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
Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, 65044

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.11>

The occurrence of thermoacoustic instability in the non-equilibrium two-phase flow of the coolant can significantly affect the reliability and integrity of the nuclear reactor's internal devices. At present, the development of adequate and justified methods for modeling thermoacoustic instability in the active zone of a nuclear reactor is an urgent issue. The purpose of the study is to develop a criterion method for determining the conditions for the occurrence of TAN in the active zone of nuclear reactors, which will increase operational safety and provide an opportunity to develop an operational system for diagnosing the conditions of TAN in the active zone of high-power reactor installations. For the conditions of transient and emergency modes of nuclear power plants with VVER, the thermodynamic approach of determining the conditions for the occurrence of thermoacoustic instability of a non-equilibrium two-phase coolant is more justified. Based on the thermodynamic approach, the conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone of the reactor were obtained. They depend on the defining thermodynamic parameters— reactor power, coolant consumption, pressure and temperature of the coolant at the entrance and exit of the active zone. It was established that in the nominal operating mode of the reactor, the coolant is stable with respect to thermoacoustic fluctuations. Based on the analysis of the well-known resonance approach to modeling the conditions for the occurrence of thermoacoustic instability (on the example of a single condensing bubble), it was established that the resonance effects of the coincidence of the frequency of propagation of acoustic waves and the frequency of

condensation of steam bubbles can be significant for relatively short channels (less than 1 m) at relatively low pressures. For the conditions of transient and emergency modes of nuclear power plants with VVER, the thermodynamic approach of determining the conditions for the occurrence of thermoacoustic instability of a non-equilibrium two-phase coolant, based on the regularities of the conditions for the occurrence of oscillatory processes during acoustic perturbations of the thermodynamic parameters of the coolant flow in the active zone of a nuclear reactor, is more justified.

References 12.

Key words: thermoacoustic instability, acoustic disturbance, nuclear reactor.

1. Gerliga V., Skalozubov V. Bubble boiling flows in the power equipment of nuclear power plants (Moscow: Energoatomizdat, 1992) 432 p.

2. Kovrizhkin Yu., Emelianenko E., Skalozubov V. The limits of safe operation of facilities in relation to thermoacoustic instability of the coolant in the core. Nuclear & Radiation Safety 1 (1998) 123-129. (Rus).

3. V. Diemienkov, O. Shugailo, M. Mustafin, M. Makarenko. Assessment of the integrity of the equipment and pipelines of the AS based on related calculations in ANSYS and RELAP CODE. Nuclear & Radiation Safety 3(87) (2020) 46-54.

4. G. Sharaevsky. Problems of increasing the reliability of the calculated determination of the heat transfer crisis in water-cooled reactors based on computer thermohydraulic codes. Nuclear & Radiation Safety 3(79) (2018) 46-54

5. A. Mazurok, J. Alekseev, A. Krushynskyy, A. Kornyskyi. Validation of the thermal-hydraulic model of the reactor plant with a detailed breakdown of the downcomer section for the analysis of thermal loads on the reactor pressure vessel Nuclear & Radiation Safety. 2012. No. 1(53). P. 16-21 .

6. B. Gryschenko, M. Polyanskyi, O. Sevbo, I. Semenyuk. Application of probabilistic methods for NPP safety analysis in the study of violations of the brittle strength of the reactor pressure vessel. Nuclear & Radiation Safety. 2013. № 1(57). P. 22—25.

7. Skalozubov V. et al. Water hammers in transonic modes of steam-liquid flows in NPP equipment. Nuclear & Radiation Safety 2(82) (2019) 46-49.

8. Skalozubov V. et al. Analysis of Reliability-Critical Hydraulic Impact Conditions at WWER-1000 NPP Active Safety Systems. Nuclear & Radiation Safety 1(81) (2019) 42-45.

9. Vyshemirskiy M., Mazurok A., Nosovsky A. Influence of initial and boundary conditions on the formation of reactor pressure vessel thermal shock. Nuclear & Radiation Safety 1(57) (2013) 26-30. (Rus).

10. *Scientific and technical* basis of measures to improve the safety of NPPs with VVER. Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine. Under the editorship of Academician O. Klyuchnikova, Chernobyl. 2012, 296 c.

11. *I. Sharaievskii, N. Fialko, A. Nosovsky, L. Zimin, G. Sharaievskii.* Actual problems of thermal physics of design and severe accidents of nuclear power units. Nuclear & Radiation Safety №2(70) (2016) P. 32-36.

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

Отримано 03.01.2023

Received 03.01.2023