

УДК 621.039

КРИТЕРІЇ ТА УМОВИ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ В АКТИВНІЙ ЗОНІ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

Скалозубов В.І.¹, докт. техн. наук, Дорож О. А.², к.т.н., Кондратюк В.А.³, к.т.н.,
Косенко С.І.⁴, к.т.н., Коньшин В.І.⁵, к.т.н.

¹Навчально-науковий інститут енергетики, Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України, Проспект Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2361-223X>, E-mail: skalozubov@op.edu.ua

²Навчально-науковий інститут енергетики «Одеської політехніки» та Мінекології України, просп. Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8495-2911>, E-mail: odorog13@gmail.com

³Національний технічний університет України (КПІ ім. Ігоря Сікорського), просп. Перемоги 37, Київ, Україна, 0305637, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5035-311X>, E-mail: prorector-agr@kpi.ua

⁴Навчально-науковий інститут енергетики, науковий співробітник Центру «Одеської політехніки» та Мінекології України, просп. Шевченко 1, Одеса, Україна, 65044, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-5644>, E-mail: skosenko@op.edu.ua

⁵Національний технічний університет України (КПІ імені Ігоря Сікорського), просп. Перемоги 37, Київ, Україна, 0305637, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2591-3589>, E-mail: vikonshin@meta.ua

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.11>

Розроблено оригінальний метод визначення критеріїв та умов термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні залежно від визначальних параметрів термодинамічного стану реакторної установки. На основі термодинамічного підходу, що враховує рівень завершеності міжфазних тепломасообмінних процесів в акустичних хвилях тиску, визначено критерії та область термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактору. На основі розробленого критеріального методу визначено основні положення та вимоги до відповідних систем реакторного контролю/діагностики та симптомно-орієнтованих інструкцій з управління аваріями в умовах термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реакторів.

An original method of determining the criteria and conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone depending on the determining parameters of the thermodynamic state of the reactor plant has been developed. Based on the thermodynamic approach, which takes into account the level of completion of interphase heat and mass transfer processes in acoustic pressure waves, the criteria and area of thermoacoustic instability of the coolant in the reactor core are determined. Based on the developed criterion method, the main provisions and requirements for the relevant reactor control/diagnostic systems and symptom-oriented instructions for managing accidents in conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone of the reactors are defined.

Бібл. 6.

Ключові слова: активна зона, ядерний реактор, термоакустична нестійкість.

Вступ. Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Традиційний аналіз безпеки ядерних енергоустановок (ЯЕУ) полягає здебільшого в моделюванні імовірнісними й детерміністськими методами наслідків внутрішніх і зовнішніх вихідних аварійних подій - течії/розриви трубопроводів реакторного контуру й паропроводів; відмови систем, важливих для безпеки (СВБ); повне знеструмлення енергоблоків; землетруси; падіння великих об'єктів та ін. Водночас питання, пов'язані з причинами та наслідками виникнення різних видів термодинамічної нестійкості в СВБ, вивчені недостатньо.

Основними видами термодинамічної нестійкості є:

- імпульсна (аперіодична) нестійкість;
- низькочастотна коливальна нестійкість;
- високочастотна коливальна нестійкість.

Імпульсна(аперіодична)термодинамічна нестійкість характеризується високою амплітудною імпульсною ("стрибоподібною") зміною термодинамічних параметрів і може виникати в запобіжних клапанах СВБ унаслідок гідро- і термоударів у СВБ, контурах природної циркуляції СВБ тощо.

Низькочастотна термодинамічна нестійкість може виникати в СВБ із насосним обладнанням, парогенераторних установках та інших СВБ. Низькочастот-

на термодинамічна нестійкість характеризується високо амплітудними коливаннями термодинамічних параметрів із частотою, яка визначається швидкістю руху робочого середовища і розмірами системи.

За певних умов низькочастотна нестійкість може бути наслідком імпульсної нестійкості і навпаки.

Високочастотна термодинамічна нестійкість характеризується високо амплітудними коливаннями тиску з частотою, що залежить від швидкості та часу поширення акустичних хвиль збурення (швидкості звуку). Експериментально встановлено, що за певних умов такий вид термодинамічної нестійкості з амплітудою коливань тиску до 50 % від середнього значення може виникнути в системах із термічно нерівноважним двофазним потоком. Тому такий вид термодинамічної нестійкості позначають терміном "термоакустична нестійкість (ТАН)". Наслідками виникнення ТАН теплоносія в активній зоні ядерного реактору можуть бути високо амплітудні високочастотні динамічні навантаження на внутрішньо корпусні пристрої та порушення герметичності оболонок ТВЕЛів (один із захисних бар'єрів безпеки). Необхідно також зазначити, що компенсатори тиску реакторних установок усувають низькочастотні коливання параметрів і є не "чутливими" до термоакустичних коливань.

Разом з тим, до теперішнього часу відсутні відповідні системи реакторного контролю (СРК) умов ТАН в активній зоні реактору та аварійні інструкції з управління аваріями в умовах ТАН теплоносія в активній зоні реактору. Основна причина такої ситуації полягає у відсутності обґрунтованих методів моделювання критеріїв та умов виникнення ТАН в активній зоні реактору.

Таким чином, актуальним питанням для забезпечення безпеки ЯЕУ є розроблення критеріїв, умов і меж області ТАН в активній зоні реактору.

У роботі [1] проведено оглядовий аналіз сучасних напрямів забезпечення та підвищення безпеки ядерної енергетики та встановлено недостатню обґрунтованість результатів аналізу безпеки ЯЕУ з ВВЕР імовірнісними та детерміністськими методами. Зокрема, недостатньо вивчено питання впливу різних видів термодинамічної нестійкості в СВБ на умови безпеки. У роботі [2] проведено аналіз умов виникнення низькочастотної термодинамічної нестійкості в режимах пуску насосів активних систем безпеки. Однак розглянуті в цій роботі моделі не відповідають умовам і причинам ТАН. У роботі [3] проведено аналіз умов виникнення імпульсної термодинамічної нестійкості в запобіжних клапанах реакторної установки. Однак

розглянуті в цій роботі моделі також не відповідають умовам ТАН. У роботі [4] проведено аналіз умов виникнення термогідродинамічних ударів (імпульсна термодинамічна нестійкість) внаслідок низькочастотної нестійкості в перехідних режимах насосів систем безпеки. Однак розглянуті в цій роботі моделі також не відповідають умовам ТАН теплоносія в активній зоні реактору. У роботі [5] подано експериментальні дані щодо умов виникнення ТАН у парогенеруючих каналах у досить широкому діапазоні визначальних термодинамічних параметрів. Однак ці експериментальні результати не визначили методи моделювання критеріїв і умов виникнення ТАН теплоносія в активній зоні реактору в робочих, перехідних і аварійних режимах. У роботі [6] отримав подальший розвиток термодинамічний принцип моделювання умов ТАН у термічно нерівноважних двофазних потоках бульбашкової структури. Однак розроблені детерміністські моделі також не визначили критерії та умови виникнення ТАН теплоносія для обґрунтування відповідних СРК і симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій.

Таким чином, актуальним питанням є розробка критеріальних методів моделювання умов ТАН в активній зоні реактору для обґрунтування відповідних СРК і симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи - розробити критеріальний метод моделювання умов термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактору для обґрунтування відповідних систем реакторного контролю та симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

1. Розробити метод моделювання умов ТАН в активній зоні реактору в робочих, перехідних і аварійних режимах.

2. На основі розробленого методу визначити і провести верифікацію області термодинамічних параметрів умов ТАН теплоносія в активній зоні реактору.

3. Розробити методичне забезпечення відповідних систем діагностики та симптомно-орієнтовані інструкції з управління аваріями в умовах ТАН теплоносія в активній зоні реактору.

4. Аналіз критеріїв та умов термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактору.

Основні положення і припущення.

1. Активна зона реактору моделюється прямоточним каналом з еквівалентними конструкційно-технічними параметрами:

- висота активної зони;
- площа поверхні нагріву;

- площа прохідного перерізу теплоносія;
- масова витрата теплоносія;
- потужність тепловиділень;
- температура теплоносія на вході та виході з активної зони;

- тиск теплоносія активної зони.

2. Критерії та умови ТАН засновані на:

- фундаментальному термодинамічному принципі нестійкості систем [6] - система перебуває в нестійкому рівноважному термодинамічному стані в разі одночасної однакової зміни (збільшення або зменшення) тиску і маси;

- резонансних ефектах у разі збігу частот конденсації парової фази та акустичних коливань тиску.

3. Потік теплоносія моделюється двома взаємодіючими зонами:

- двофазна зона на поверхні нагрівання (поверхнева зона);
- однофазна центральна зона потоку теплоносія.

Теплоносій у поверхневій і центральній зонах моделюється консервативною спрощеною теплогідродинамічною моделлю з усередненими параметрами за об'ємом активної зони.

4. Початковий стан теплоносія - стаціонарний теплогідродинамічно рівноважний в активній зоні під час роботи реактору на потужності.

На рівноважний стан теплоносія моделюються два типи незалежних збурень (відхилень) теплогідродинамічних параметрів від рівноважного стану:

- височастотні акустичні коливання тиску в потоці теплоносія;
- низькочастотні флуктуаційні коливання витрати теплоносія внаслідок нестійкої роботи насосів.

5. Основна (енергетична) частота акустичних коливань тиску в теплоносії ω_a визначається висотою (довжиною) активної зони H і швидкістю звуку в двофазному теплоносії v_a :

$$\omega_a = 1/t_a = v_a / H. \quad (1)$$

Максимальна амплітуда акустичних збурень визначається співвідношенням часових періодів акустичних коливань t_a та тривалості "життя" на поверхні нагріву парової фази що періодично конденсується, t_c .

Якщо $t_a \neq t_c$, то за повний період акустичного коливання тиску відбувається неодноразова термодинамічна взаємодія акустичних коливань тиску в потоці теплоносія з паровою фазою, що періодично конденсується, на поверхні нагрівання. За певних умов цієї взаємодії амплітуда коливань тиску може збільшуватися (умови ТАН).

Якщо $t_a = t_c$, то акустичні імпульси тиску збігаються за часом з імпульсами тиску внаслідок конденсації парової фази та можуть виникнути резонансні ефекти.

6. Основна частота флуктуаційних коливань витрати теплоносія ω_g визначається швидкістю руху теплоносія v_g і довжиною реакторного контуру L :

$$\omega_g = v_g / L, \quad (2)$$

Таким чином, у загальному випадку необхідно аналізувати два різних режими умов виникнення ТАН:

- умови збігу основної частоти акустичних коливань ω_a і частоти конденсації парової фази ω_c (резонансний режим)

$$\omega_a = \omega_c \quad (3)$$

- умови виникнення термоакустичних коливань внаслідок незавершеності тепло масо обмінних процесів парової фази, що конденсується, в акустичних хвилях теплоносія (термодинамічний режим).

Критерії та умови ТАН у резонансному режимі.

З урахуванням прийнятих припущень рівняння масового і теплового балансу парової фази:

$$\frac{d\rho_v V_v}{dt} = \frac{-\alpha_c F_c (T_v - T_l)}{i_v - i_l}, \quad (4)$$

$$\frac{d\rho_v V_v i_v}{dt} = -\alpha_c F_c (T_v - T_l), \quad (5)$$

де ρ_v - густина пари;

V_v - об'єм парової фази;

t - час;

α_c - коефіцієнт тепловіддачі конденсації;

F_c - площа поверхні конденсації;

T_v, T_l - температура парової та рідинної фази теплоносія;

i_v, i_l - питома ентальпія парової та рідинної фази теплоносія;

P - тиск.

Після перетворення рівнянь (3) і (4) отримаємо нелінійне диференціальне рівняння 1-го порядку:

$$a_1 \frac{dV_v}{dt} + a_2 V_v + a_3 = 0, \quad (6)$$

$$V_v(t=0) = V_{v0}, V_v(t=t_c) = 0, \quad (7)$$

де $a_1 = \rho_v$;

$$a_2 = -a_v^2 \frac{\alpha_2 - i_v \alpha_1}{\rho_v V_v \frac{di_v}{dP}};$$

$$a_3 = \alpha_1;$$

$$\alpha_1 = \frac{-\alpha_c F_c (T_v - T_l)}{i_v - i_l};$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 (i_v - i_l);$$

$$a_v = \sqrt{\frac{d\rho_v}{dP}} \text{ - швидкість звуку в паровій фазі.}$$

За допущення сталості теплофізичних властивостей пари в процесі імпульсу конденсації розв'язок рівнянь (6) і (7) щодо частоти конденсації парової фази:

$$\omega_c = \frac{1}{t_c} = f_c(V_{v0}, a_1, a_2, a_3). \quad (8)$$

Тоді з урахуванням (1), (3) і (8) критерій і умови резонансного режиму ТАН:

$$K_R = \frac{f_c H}{v_a} = 1. \quad (9)$$

Критерії та умови ТАН у термодинамічному режимі.

З урахуванням прийнятих положень і припущень рівняння теплового і масового балансу в поверхневій і центральній зонах теплоносія:

$$G_v(i_v - i_l) = N - \alpha_c F_c (T_v - T_l), \quad (10)$$

$$G_l(i_{lc} - i_{l0}) = \alpha_c F_c (T_v - T_l), \quad (11)$$

$$G = G_l + G_v, \quad (12)$$

де N - теплова потужність тепловиділень;

i_{lc}, i_{l0} - питома ентальпія рідинної фази теплоносія на виході та вході в активну зону відповідно;

G_p, G_v - масова витрата теплоносія в центральній і паронасиченій поверхневій зоні відповідно.

Визначальні параметри міжфазного тепломасо-обміну α_c і F_c визначалися за відомими консервативними напівемпіричними залежностями [6].

Після перетворень рівнянь (10) - (12) рівняння рівноважного термодинамічного стану теплоносія в безрозмірному критеріальному форматі:

$$K_1(G, P) = K_2(P, G), \quad (13)$$

де визначальний критерій термодинамічного стану теплоносія в активній зоні

$$K_1 = \frac{G(i_{lc} - i_{l0})}{N}. \quad (14)$$

Критерій K_2 відображає завершеність тепломасо-обмінних процесів між поверхневою та центральною зонами теплоносія:

$$K_2 = \frac{[N - \alpha_c F_c (T_v - T_l)](i_{lc} - i_{l0})}{N(i_v - i_l)} + \frac{\alpha_c F_c (T_v - T_l)}{N}. \quad (15)$$

Рівняння (13) у форматі високочастотних акустичних збурень (відхилень) тиску $\delta P \ll P$ і низькочастотних збурень витрати $\delta G \ll G$:

$$\omega_g \frac{\partial K_1}{\partial G} \delta G + \omega_a \frac{\partial K_1}{\partial P} \delta P = \omega_a \frac{\partial K_2}{\partial P} \delta P + \omega_g \frac{\partial K_2}{\partial G} \delta G \quad (16)$$

Після перетворення рівняння (16) термодинамічний критерій ТАН теплоносія в активній зоні:

$$K_{TA} = \frac{\delta P}{\delta G} = \frac{\omega_g \left(\frac{\partial K_2}{\partial G} - \frac{\partial K_1}{\partial G} \right)}{\omega_a \left(\frac{\partial K_1}{\partial P} - \frac{\partial K_2}{\partial P} \right)}. \quad (17)$$

Відповідно до прийнятого термодинамічного принципу нестійкості систем теплоносій в активній зоні стійкий до термоакустичних коливань за умови

$$K_{TA} < 0. \quad (18)$$

Умови ТАН теплоносія в активній зоні:

$$K_{TA} > 0. \quad (19)$$

Умови (19) означають, що за спільних акустичних збурень тиску і флуктуаційних низькочастотних збурень, значення амплітуди термоакустичних коливань параметрів теплоносія збільшуються. Негативними наслідками цих ефектів є: високо амплітудні високочастотні динамічні навантаження на внутрішню корпусні конструкції реактору; деформація ТВЕЛів; підвищена вібрація; порушення герметичності оболонок ТВЕЛів тощо.

Відповідно до отриманого критерію ТАН (17) амплітуда термоакустичних коливань тиску істотно залежить від частоти коливань ω_a (1).

Для відносно "коротких" каналів ($H \ll 1$ м) відповідно до формули (1) ω_a має підвищене значення та згідно з (17) визначає знижені амплітуди термоакустичних коливань тиску, які за певних умов можуть бути співставними з турбулентними або акустичними коливаннями. У цьому разі визначальним може бути резонансний режим умов ТАН.

Для каналів з $H > 1$ м основна (енергетична) частота зменшується, а амплітуди термоакустичних коливань тиску відповідно збільшуються.

Аналіз отриманих критеріїв та умов ТАН.

Розрахункове моделювання критерію та умов резонансного режиму ТАН теплоносія (9) здійснювали варіюванням основних визначальних параметрів K_R - "недогріву" теплоносія в центральній зоні $T_v - T_l$ і висоти активної зони H . Параметри міжфазного тепломасообміну визначалися за консервативними напівемпіричними залежностями [6]. У результаті проведеного розрахункового аналізу встановлено, що область резонансного режиму ТАН:

$$H < 1,0 \text{ м}; \quad T_v - T_l > 80 \text{ К}. \quad (20)$$

Область резонансного режиму (20) не характерна параметрам активної зони реакторів промислових ЯЕУ.

Область ТАН у термодинамічному режимі здійснювалася розрахунковим варіюванням визначального критерію термодинамічного стану теплоносія в активній зоні реактора K_f . У результаті розрахункового моделювання визначено область ТАН у термодинамічному режимі:

$$K_o \leq K_1 \leq K_e, \quad (21)$$

де K_o , K_e - "нижня" і "верхня" межа області ТАН теплоносія в активній зоні відповідно.

"Нижня" межа області ТАН відповідає умовам початку значної довжини ділянок із "недогрітим" поверхневим кипінням.

"Верхня" межа області ТАН (21) відповідає умовам значної довжини ділянок з однофазним теплоносієм.

Для активної зони реакторів ВВЕР-1000 визначено:

$$K_o = 0,7 K_{10}; \quad K_e = 0,9 K_{10},$$

де K_{10} - визначальний параметр термодинамічного стану реактора в номінальному робочому режимі на потужності.

Режим ТАН теплоносія може виникнути, наприклад, у разі заклинювання одного або двох головних циркуляційних насосів під час роботи реактору на номінальній потужності.

Аналіз отриманого термодинамічного критерію ТАН встановив, що основною причиною виникнення термоакустичних коливань за певних умов є незавершеність міжфазних теплообмінних процесів в акустичних збуреннях тиску та збуреннях витрати теплоносія.

Аналіз консервативності прийнятих припущень під час моделювання термодинаміки теплоносія в активній зоні встановив таке.

1. Допущення про усередненість визначальних параметрів теплоносія за обсягом активної зони консервативно "розширює" розрахункову область ТАН. Крім того, більш "реалістичні" моделі термодинаміки теплоносія в активній зоні (наприклад, у відомих детерміністських кодах, що моделюють аварійні процеси), що враховують просторову нерівномірність розподілу параметрів теплоносія за висотою активної зони, використовують окремі недостатньо фізично обґрунтовані параметри міжфазної взаємодії [6].

2. У реальних умовах нормальної експлуатації реакторних установок теплове навантаження (потужність тепловиділень) нерівномірне за висотою активної зони: мінімальні теплові навантаження на початку та закінченні активної зони, а максимальні теплові навантаження в центральній частині активної зони. Тому початок інтенсивного поверхневого кипіння в реальних умовах починається вище в активній зоні, ніж у прийнятій моделі рівномірного розподілу теплового навантаження за висотою активної зони. Отже, прийнята модель рівномірного розподілу теплового навантаження консервативно "розширює" область ТАН. Цей висновок підтверджується результатами експериментів [5] щодо впливу розподілу теплового навантаження (за інших рівних умов) на область виникнення ТАН.

3. У прийнятих моделях резонансного і термодинамічного режимів умов ТАН не враховується вплив газонасиченості теплоносія. В експериментах [5] встановлено, що збільшення газонасиченості теплоносія зменшує область ТАН. Цей ефект пов'язаний з тим, що присутність газу обмежує інтенсивність тепломасообмінних процесів міжфазної взаємодії. Тому прийняте припущення про відсутність газонасиченості теплоносія також цілком консервативне.

Однак прийняті припущення при моделюванні критеріїв і умов ТАН теплоносія в активній зоні реактору визначають необхідність відповідної експериментальної верифікації встановленої області ТАН (21).

Експериментальна верифікація області ТАН (21) у натурних умовах реакторної установки є неприпустимою, оскільки при цьому виникає "штучне" зниження ядерної безпеки. Крім того, відсутня відповідна система реакторного контролю (СРК) умов виникнення ТАН.

Для верифікації області ТАН (21) можуть бути застосовані відповідні результати експериментів, отримані на експериментальних установках, що відповідають ідентичності критеріїв термодинамічної подібності процесів у натурних та експериментальних установках [6]. У даному випадку критерії термодинамічної подібності - визначальний критерій термодинамічного стану K_1 і тиск P .

Таким вимогам відповідають експериментальні результати області ТАН, отримані на експериментальній установці [5]. На основі проведеної експериментальної верифікації області ТАН (21) з урахуванням даних [5] встановлено, що максимальні розбіжності розрахункових і експериментальних результатів $\pm 30\%$ для "нижньої" межі області ТАН (21) і $\pm 15\%$ для "верхньої" межі.

5. Обговорення отриманих результатів

У режимах ТАН теплоносія в активній зоні реактору виникають високоамплітудні високочастотні динамічні навантаження, які можуть призвести до порушення герметичності оболонок ТВЕЛів (один із захисних бар'єрів безпеки). Отже, режими ТАН слід розглядати як вихідну подію аварії (ВПА) "ТАН в активній зоні".

Для забезпечення безпеки під час ВПА "ТАН в активній зоні" необхідно розробити і впровадити:

- системи реакторного контролю умов ТАН в активній зоні (СРК ТАН);
- симптомно-орієнтовані аварійні інструкції з управління аварією з ВПА "ТАН в активній зоні" (СОАІ ТАН).

Основою СРК ТАН може бути отримана в цій роботі область ТАН теплоносія в активній зоні (21) за поточним значенням визначального критерію термодинамічного стану $K_1(t)$, що визначається контрольованими параметрами: теплова потужність реактору; тиск у реакторі; температура теплоносія на вході та виході активної зони; витрата теплоносія.

СРК ТАН може бути застосована під час розроблення та впровадження СОАІ ТАН.

Якщо поточне значення критерію $K_1(t)$ розташоване в області ТАН (21), то оператор реакторної установки може вжити таких заходів:

- збільшити витрату теплоносія за незмінної потужності реактору;
- зменшити потужність реактору за незмінної витрати теплоносія.

Висновки

1. Наслідками термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні ядерних реакторів можуть бути високоамплітудні високочастотні динамічні навантаження на внутрішньокорпусні конструкції та порушення герметичності оболонок ТВЕЛів (один із захисних бар'єрів безпеки). Разом з тим, до теперішнього часу відсутні відповідні системи реакторного контролю/діагностики та експлуатаційні симптомно-орієнтовані інструкції з управління аваріями в умовах термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактору. Основна причина такої ситуації полягає у відсутності обґрунтованих методів моделювання критеріїв та умов виникнення термоакустичної нестійкості в активній зоні.

2. Розроблено оригінальний метод визначення критеріїв і умов термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні залежно від визначальних параметрів термодинамічного стану реакторної установки.

3. Встановлено, що резонансний підхід моделювання умов термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні промислових реакторних установок за умови збігу частот акустичних коливань і конденсації парової фази не обґрунтований.

4. На основі термодинамічного підходу, що враховує рівень завершеності міжфазних тепломасообмінних процесів в акустичних хвилях тиску, визначено критерії та область термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реакторів. Встановлена область термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реактору верифікована на основі відомих експериментальних даних, отриманих на експериментальній установці, яка відповідає за критеріями термодинамічної подібності активній зоні ВВЕР-1000.

5. На основі розробленого критеріального методу визначено основні положення та вимоги до відповідних систем реакторного контролю/діагностики та симптомно-орієнтованих інструкцій з управління аваріями в умовах термоакустичної нестійкості теплоносія в активній зоні реакторів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Кондратюк В.А., Письменний Є.М., Верінов О.М. та ін. Підвищення безпеки ядерної енергетики з урахуванням уроків важких аварій. Ядерна та радіаційна безпека. 2022. № 3(95). С. 76 – 81.
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. et al. Water Hammers in Transonic Modes of Steam-Liquid Flows in NPP Equipment. Nuclear and Radiation Safety. 2019. No. 2(82). С. 46 – 49.
4. Skalozubov V., Chulkin O., Pirkovskiy D. et al. Method for Determination of Water Hammer Conditions and Consequences in Pressurizers of Nuclear Reactors. Turkish Journal of Physics. 2019. V. 43, No. 3. P. 229 – 235.
5. Antonyuk N., Gerliga V., Skalozubov V. Excitation of Thermoacoustic Oscillations in a Heated Channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1990. V. 59, No. 4. P. 1323 – 1328.
6. Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики Украины с учетом уроков экологических катастроф в Чернобыле и Фукусиме / Под ред. В.И. Скалозубова. Одесса: Астропринт, 2013. 244 с.

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

Skalozubov V.I.¹, Dorozh O.A.², Kondratyuk V.A.³, Kosenko S.I.⁴, Konshin V.I.⁵

¹Dr.Sci. (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-2361-223X>, E-mail: skalozubov@op.edu.ua

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.

²PhD (Engin.), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8495-2911>, E-mail: odorog13@gmail.com

Department of Nuclear Power Plants of the Educational and Scientific Institute of Energy of the National University "Odesa Polytechnic", 65044, 1, Shevchenko av. Odessa, Ukraine.

³PhD (Engin.), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5035-311X>, E-mail: prorektor-agr@kpi.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremoga ave., 37, Kyiv, Ukraine, 0305637.

⁴PhD (Engin.), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-5644>, E-mail: skosenko@op.edu.ua

Department of Nuclear Power Plants of the Educational and Scientific Institute of Energy of the National University "Odesa Polytechnic", 65044, 1, Shevchenko av. Odessa, Ukraine.

⁵PhD (Engin.), ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2591-3589>, E-mail: vikonshin@meta.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremoga ave., 37, Kyiv, Ukraine, 0305637.

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.11>

The consequences of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone of nuclear reactors can be high-amplitude, high-frequency dynamic loads on the internal structures and a violation of the tightness of the TVEL shells. However, until now, there are no reactor control/diagnostic systems and operational instructions for managing accidents in conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the reactor core. The main reason for this situation is the lack of substantiated methods for modeling the criteria and conditions for the occurrence of thermoacoustic instability in the active zone. The purpose of the work is the development of a criterion method for modeling the conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone of the reactor to substantiate the appropriate

reactor control systems and symptom-oriented emergency instructions. An original method of determining the criteria and conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone depending on the determining parameters of the thermodynamic state of the reactor plant has been developed.. Based on the thermodynamic approach, which takes into account the level of completion of interphase heat and mass transfer processes in acoustic pressure waves, the criteria and area of thermoacoustic instability of the coolant in the reactor core are determined. The established area of thermoacoustic instability of the coolant in the reactor core was verified on the basis of known experimental data obtained at the experimental installation, which meets the criteria of thermodynamic similarity to the core of the VVER-1000 core. Based on the developed criterion method, the main provisions and requirements for the relevant reactor control/diagnostic systems and symptom-oriented instructions for managing accidents in conditions of thermoacoustic instability of the coolant in the active zone of the reactors are defined.

References 6.

Key words: active zone, nuclear reactor, thermoacoustic instability.

1. Kondratyuk V.A., Pismennyi E.M., Verinov O.M. ets. Pidvishennia bezpeki yadernoi energetiki z urahuvannyam urokiv vagkih avariiv [Improving the safety of nuclear energy, taking into account the lessons of severe accidents]. Yaderna i radiatsionnaia bezopasnost [Nuclear and Radiation Safety]. 2022. № 3(95). P. 76 – 81. (in.Ukr.)

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. et al. Water Hammers in Transonic Modes of Steam-Liquid Flows in NPP Equipment. Nuclear and Radiation Safety. 2019. No. 2(82). P. 46 – 49.

4. Skalozubov V., Chulkin O., Pirkovskiy D. et al. Method for Determination of Water Hammer Conditions and Consequences in Pressurizers of Nuclear Reactors. Turkish Journal of Physics. 2019. V. 43, No. 3. P. 229 – 235.

5. Antonyuk N., Gerliga V., Skalozubov V. Excitation of Thermoacoustic Oscillations in a Heated Channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 1990. V. 59, No. 4. P. 1323 – 1328.

6. *Komplex metodov pereotzenki bezopasnosti atomnoy energetiki Ukraine s uchetom ekologicheskikh katastrof v Chernobyl i Fukushima* [The complex of methods of reassessment of the safety of atomic energy of Ukraine taking into account the lessons of environmental disasters in Chernobyl and Fukushima] / Ed.V. Skalozubova Odessa: Astroprint, 2013. 244 p. (in Rus.)

Отримано 10.03.2023

Received 10.03.2023