

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 621.039.58

DOI 10.20535/1813-5420.3.2023.289659

В.І.Скалозубов¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-2361-223X

В. А. Кондратюк², канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-5035-311X

В.І.Філатов², канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-3046-3546

¹Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України

²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КРИТЕРІЇ ТА УМОВИ МІЖКОНТУРНОЇ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ МОДЕРНІЗОВАНОЇ ТУРБІННОЇ СИСТЕМИ АЕС

Представлений оригінальний метод визначення критеріїв та умов міжконтурної термодинамічної нестабільності в модернізованій системі «паротурбінна установка — система регенерації з абсорбційними тепловими насосами». Розробка виконувалась шляхом проведення термодинамічного аналізу впливу незалежних флуктуаційних відхилень від стану рівноваги як потоку вологої пари на вході в абсорбційні теплові насоси, так і вимірюючого тиску в абсорбційних теплових насосах/змішувальних нагрівачах низького тиску. На основі аналізу отриманих критеріїв та умов встановлено, що основною причиною міжконтурної термодинамічної нестабільності в модернізованій системі «паротурбінна установка — система регенерації з абсорбційними тепловими насосами» є неповнота (інерційність) тепломасообмінні та гідродинамічні процеси при флуктуаційних відхиленнях від рівноважного стану термодинамічних параметрів. Запобігання умов міжконтурної термодинамічної нестабільності в модернізованій системі «паротурбінна установка — система регенерації з абсорбційними тепловими насосами» можна забезпечити шляхом встановлення регуляторів витрати в контурах подачі мокрої пари від циліндра високого тиску турбіни до абсорбційні теплові насоси та абсорбційні теплові насоси в змішувальних нагрівачах низького тиску для підтримки постійного тиску в абсорбційних теплових насосах і змішувальних нагрівачах низького тиску. Також необхідно враховувати, що модернізація системи «паротурбінна установка — система регенерації з абсорбційними тепловими насосами» може вплинути на роботу та умови міжконтурної термодинамічної нестабільності «сусідніх» систем. Визначені засоби запобігання виникнення умов міжконтурної термодинамічної нестабільності в модернізованій системі «паротурбінна установка — система регенерації з абсорбційними тепловими насосами».

Ключові слова: модернізація турбоустановок, термодинамічна нестабільність.

Вступ

Перспективним напрямком підвищення ефективності експлуатації АЕС з ВВЕР є модернізація паротурбінних систем (ПТУ). Встановлено, що модернізація ПТУ із системою регенерації (РС) абсорбційними тепловими насосами (АТН) (система «ПТУ-РС з АТН») дозволяє істотно підвищити ККД ПТУ.

Проте система регенерації з АТН є багатоконтурною системою з різними термодинамічними станами окремих контурів, що за певних умов може призводити до міжконтурної термодинамічної нестабільності (МТН). В умовах нестабільності можуть виникати високо амплітудні коливання термодинамічних параметрів. Це може призвести до порушення нормальних умов роботи ПТУ та призвести до парогенераторних (ПГ), гідро- та теплових «ударів» (ГТУ) в трубопровідному обладнанні та призвести до інших негативних ефектів.

Перспективним напрямком підвищення ефективності експлуатації АЕС з ВВЕР є модернізація паротурбінних систем (ПТУ). Встановлено, що модернізація ПТУ із системою регенерації (РС) абсорбційними тепловими насосами (АТН) дозволяє істотно підвищити ККД ПТУ. Проте система регенерації з АТН є багатоконтурною системою з різними термодинамічними станами окремих контурів,

що за певних умов може призводити до міжконтурної термодинамічної нестабільності (МТН). В умовах нестабільності можуть виникати високо амплітудні коливання термодинамічних параметрів. Це може призвести до порушення нормальних умов роботи ПТУ та призвести до гідро- та теплових «ударів» (ГТУ) в трубопровідному обладнанні та до інших негативних ефектів.

Аналіз літератури. Актуальність роботи.

Причини виникнення різних видів термодинамічної нестабільності (ТН) в теплоенергетичному обладнанні вивчені недостатньо [1]. Наприклад, у роботі [2] проведено аналіз відомих досліджень з моделювання наслідків ТН через гідродинамічну нестійкість. Умови виникнення гідроудару та вібрації в цьому дослідженні не аналізувалися.

У роботі [3] проведено аналіз відомих досліджень з моделювання впливу теплових ударів на корпус ядерного реактора як наслідок імпульсної теплової нестабільності. Умови та наслідки МТН також не аналізувалися в цій роботі.

У роботі [4] наведено експериментальні результати впливу гідроудару на модель корпусу компенсатора тиску реакторних установок. Умови та наслідки МТН не аналізувалися в цій статті.

У роботі [5] змодельовані умови та наслідки гідроудару як наслідок термодинамічної нестабільності в герметичній установці реакторної установки з ВВЕР-1000. Питання моделювання МТН також не аналізувалися в цій роботі.

У роботі [6] змодельовані умови та наслідки ТН у запобіжних клапанах у транс звукових режимах двофазних потоків. Питання умов і наслідків МТН в цій роботі також не аналізувалося.

У роботі [7] розроблено метод моделювання умов і наслідків гідроудару через гідродинамічну нестійкість перехідних режимів насосного обладнання, а в роботі [8] цей метод реалізовано для систем активної безпеки АЕС з ВВЕР-1000. Питання моделювання умов і наслідків МТН в системах безпеки також не аналізувалися в цих роботах.

У роботі [9] проведено аналіз актуальних проблем моделювання, проектування та важких аварій на атомних електростанціях (АЕС). При цьому питання моделювання умов і наслідків ТН типів вібрації (в тому числі МТН) в аварійних умовах також не аналізувалися.

Таким чином, в сучасних умовах відсутні достатньо обґрунтовані методи моделювання умов і наслідків МТН в ПТУ АЕС з ВВЕР. Це зумовлює актуальність представленої роботи.

Мета і завдання роботи.

Основною метою роботи є проведення аналізу умов виникнення МТН в системі «ПТУ-РС з АТН». Це дасть підстави для обґрунтування практичних рекомендацій щодо профілактики умов для виникнення МТН.

Для досягнення мети даного дослідження необхідно вирішити наступні завдання.

1. Розробити методику визначення критеріїв та умов МТН в системі «ПТУ-РС з АТН»
2. Проаналізувати отримані результати та обґрунтувати практичні рекомендації.

Спосіб визначення критеріїв та умов виникнення МТН в системі «ПТУ-РС з АТН»

Система «ПТУ-РС з АТН» складається з таких схем:

- перший контур для вологої пари "циліндр турбіни високого тиску - АТН";
- другий замкнутий контур перегрітої пари і конденсату «АТН — циліндри низького тиску турбіни — АТН»;
- третій замкнутий випарно-конденсатний контур «АТН — конденсаторна система — АТН»;
- четвертий контур вологої пари «АТН — змішувальні підігрівачі низького тиску (ЗПНТ) першого ступеня»;
- п'ятий контур вологої пари «циліндри низького тиску — ЗПНТ»;
- шостий конденсатний контур «Конденсатор ПТУ — ЗПНТ»
- сьомий конденсатний контур «ЗПНТ — поверхневі теплообмінники другого ступеня».

Усі вказані схеми містять системи АТН та/або ЗПНТ.

Рівняння тепломасового балансу для АТН та/або ЗПНТ у встановленому (рівноважному) стані системи «ПТУ-РС з АТН»:

$$G_o = G_A G_o = G_A, \quad (1)$$

$$G_o \cdot i_o + M_A \cdot (P_A \cdot G_o) = Q_{LD}(P_A \cdot G_o) + Q_{CK}(P_A \cdot G_o) + G_A \cdot i_A, \quad (2)$$

$$G_A + G_K + G_{LD} = G_P G_A + G_K + G_{LD} = G_P, \quad (3)$$

$$G_A \cdot i_A + G_K \cdot i_K + G_{LD} \cdot i_{LD} = G_P \cdot i_P G_A \cdot i_A + G_K \cdot i_K + G_{LD} \cdot i_{LD} = G_P \cdot i_P \quad (4)$$

Рівняння руху в четвертому, п'ятому, шостому і сьомому контурах:

$$G_A = F_4 \cdot \sqrt{\xi_4^{-1} \cdot \rho \cdot (P_A - P_P)} G_A = F_4 \cdot \sqrt{\xi_4^{-1} \cdot \rho \cdot (P_A - P_P)}, \quad (5)$$

$$G_{LD} = F_5 \cdot \sqrt{\xi_5^{-1} \cdot \rho \cdot (P_{LD} - P_P)} G_{LD} = F_5 \cdot \sqrt{\xi_5^{-1} \cdot \rho \cdot (P_{LD} - P_P)}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{P1}(G_K) &= P_P - P_K + \xi_6 \cdot G_K^2 / (\rho_l \cdot F_6^2) \\ \Delta P_{P1}(G_K) &= P_P - P_K + \xi_6 \cdot G_K^2 / (\rho_l \cdot F_6^2), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{P2}(G_P) &= P_0 - P_P + \xi_7 \cdot G_P^2 / (\rho_l \cdot F_7^2) \\ \Delta P_{P2}(G_P) &= P_0 - P_P + \xi_7 \cdot G_P^2 / (\rho_l \cdot F_7^2), \end{aligned} \quad (8)$$

де $G_0, G_A, G_K, G_{LD}, G_P, G_0, G_A, G_K, G_{LD}, G_P$ - відповідно масові витрати на першому, четвертому, шостому, п'ятому та сьомому рівнях; $i_0, i_A, i_K, i_{LD}, i_P$ - відповідно питомі ентальпії в першому контурі, АТН, конденсаторі, циліндрах низького тиску, ЗПНТ, сьомому контурі; $P_A, P_P, P_{LD}, P_0, P_A, P_P, P_{LD}, P_0$ - тиск в АТН, ЗПНТ, циліндрах низького тиску, сьомому контурі; $M_A(P_A \cdot G_0), M_A(P_A \cdot G_0)$ - потужність тепловиділень АТН; $Q_{LD}(P_A \cdot G_0), Q_{CK}(P_A \cdot G_0), Q_{LD}(P_A \cdot G_0), Q_{CK}(P_A \cdot G_0)$ - сумарні теплові втрати в циліндрах низького тиску і системі конденсатора; $\xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_7, \xi_4, \xi_5, \xi_6, \xi_7$ - сумарні коефіцієнти безповоротних втрат у четвертому, п'ятому, шостому та сьомому контурах; $F_4, F_5, F_6, F_7, F_4, F_5, F_6, F_7$ - загальна площа потоку в четвертому, п'ятому, шостому і сьомому контурах; $\rho, \rho_l, \rho, \rho_l$ - щільність потоку пари і конденсату; $\Delta P_{P1}, \Delta P_{P2}, \Delta P_{P1}, \Delta P_{P2}$ - напірні (гідрравлічні) характеристики конденсатних насосів.

Умови МТН в системі «ПТУ-РС з АТН» визначаються виникненням незалежних флуктуаційних відхилень від рівноважного стану. $\delta G_0 \ll G_0, \delta P_A \ll P_A, \delta P_P \ll P_P$, і критерії для МТН в

$$\text{АТН і ЗПНТ такі: } K_A = \frac{\delta P_A}{\delta G_0}; K_C = \frac{\delta P_P}{\delta G_0} K_A = \frac{\delta P_A}{\delta G_0}; K_C = \frac{\delta P_P}{\delta G_0}. \quad (9)$$

За умов [1] система «ПТУ-РС з АТН» є термодинамічно стабільною

$$K_A < 0; K_C < 0, K_A < 0; K_C < 0. \quad (10)$$

Система є термодинамічно нестійкою, якщо одна або обидві умови стабільності (10) не виконуються.

Після спрощення та лінеаризації рівнянь (1) — (8) у форматі флуктуаційних відхилень $\delta G_0, \delta P_A, \delta P_P$, ми отримаємо:

$$\delta G_0 \cdot f_{G1} = \delta P_A \cdot f_A \delta G_0 \cdot f_{G1} = \delta P_A \cdot f_A, \quad (11)$$

$$\delta G_0 \cdot f_{G2} = \delta P_P \cdot f_P \delta G_0 \cdot f_{G2} = \delta P_P \cdot f_P, \quad (12)$$

де

$$f_{G1} = i_0 + \frac{\delta M_A}{\delta G_0} - \frac{\delta Q_{LD}}{\delta G_0} - \frac{\delta Q_{CK}}{\delta G_0} - i_A f_{G1} = i_0 + \frac{\delta M_A}{\delta G_0} - \frac{\delta Q_{LD}}{\delta G_0} - \frac{\delta Q_{CK}}{\delta G_0} - i_A,$$

$$f_A = -G_0 \cdot \left(\frac{di_0}{dP_A} - \frac{di_A}{dP_A} \right) - \frac{\partial M_A}{\partial P_A} + \frac{\partial Q_{LD}}{\partial P_A} + \frac{\partial Q_{CK}}{\partial P_A}$$

$$f_A = -G_0 \cdot \left(\frac{di_0}{dP_A} - \frac{di_A}{dP_A} \right) - \frac{\partial M_A}{\partial P_A} + \frac{\partial Q_{LD}}{\partial P_A} + \frac{\partial Q_{CK}}{\partial P_A},$$

$$f_{G2} = i_A + G_0 \cdot \frac{di_A}{dP_A} \cdot K_A f_{G2} = i_A + G_0 \cdot \frac{di_A}{dP_A} \cdot K_A,$$

$$f_P = -i_K \cdot R_6 - i_{LD} \frac{\partial G_{LD}}{\partial P_P} + i_P \frac{\partial G_{LD}}{\partial P_P} + i_P \cdot R_7 + G_P \cdot \frac{di_P}{dP_P}$$

$$f_P = -i_K \cdot R_6 - i_{LD} \frac{\partial G_{LD}}{\partial P_P} + i_P \frac{\partial G_{LD}}{\partial P_P} + i_P \cdot R_7 + G_P \cdot \frac{di_P}{dP_P}$$

$$R_6 = \left(\frac{d\Delta P_{P1}}{dG_k} - \xi_6 \cdot \frac{2 \cdot G_K}{\rho_l \cdot F_6^2} \right)^{-1} R_6 = \left(\frac{d\Delta P_{P1}}{dG_k} - \xi_6 \cdot \frac{2 \cdot G_K}{\rho_l \cdot F_6^2} \right)^{-1}$$

$$R_7 = - \left(\frac{d\Delta P_{P2}}{dG_P} - \xi_7 \cdot \frac{2 \cdot G_P}{\rho_l \cdot F_7^2} \right)^{-1}$$

З урахуванням (10) умови термодинамічної нестійкості системи «ПТУ-РС з АТН»:

$$K_A = \frac{f_{G1}}{f_A} < 0; K_C = \frac{f_{G2}}{f_P} < 0; K_A = \frac{f_{G1}}{f_A} < 0; K_C = \frac{f_{G2}}{f_P} < 0 \quad (13)$$

Система «ПТУ-РС з АТН» є термодинамічно нестійкою, якщо не виконується одна або дві умови (13).

Аналіз отриманих критеріїв та умов МТН системи «ПТУ-РС з АТН».

Умови МТН модернізованої системи «ПТУ-РС з АТН» залежать від:

- термодинамічного стану і системи конструктивно-технічних параметрів контурів;
- напірних (гідравлічних) характеристик насосів подачі конденсату;
- повноти (інерційності) процесів міжконтурного тепломасообміну з незалежними флуктуаційними відхиленнями від рівноважного стану потоку вологої пари в АТН і тиску в АТН/ЗПНТ.

В умовах МТН в модельованій системі «ПТУ-РС з АТН» можливі високоамплітудні коливання термодинамічних параметрів, наслідками яких можуть бути — гідроудари в контурах, підвищена вібрація, порушення нормальних умов експлуатації та ін. негативні наслідки.

Основною причиною виникнення МТН в модернізованій системі «ПТУ-РС з АТН» є незавершеність (інерційність) тепломасообмінних і гідродинамічних процесів при флуктуаційних відхиленнях від рівноважного стану термодинамічних параметрів.

Запобігання виникненню умов МТН в модернізованій системі «ПТУ-РС з АТН» можна забезпечити шляхом встановлення регуляторів витрати в контурах подачі мокрої пари від циліндра високого тиску турбіни до АТН та від АТН до ЗПНТ для підтримки постійний тиск в АТН і ЗПНТ.

Обговорення.

На основі термодинамічного аналізу впливу незалежних флуктуаційних відхилень від рівноважного стану витрати вологої пари розроблено оригінальну методику визначення критеріїв та умов виникнення МТН на вході АТН і тиску АТН/ЗПНТ в модернізованій системі «ПТУ-РС з АТН». На відміну від відомих підходів до моделювання термодинамічних процесів (наприклад, [9 – 13] та ін.), термодинамічна модель розробленого методу враховує вплив флуктуаційних відхилень від рівноважного стану термодинамічних параметрів, визначаючи критерії та умови виникнення МТН.

На підставі аналізу отриманих критеріїв та умов встановлено, що основною причиною виникнення МТН в модернізованій системі «ПТУ-РС з АТН» є неповнота (інерційність) тепломасообміну та гідродинаміки, процеси при флуктуаційних відхиленнях від рівноважного стану термодинамічних параметрів.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та впровадженні модернізованої системи «ПТУ-РС з АТН».

Також необхідно враховувати, що модернізація системи «ПТУ-РС з АТН» може вплинути на продуктивність та умови виникнення МТН в «сусідніх» системах, зокрема, в парогенераторній установці. Таким чином, відбір мокрої пари після циліндра високого тиску турбіни в АТН здійснюється паралельно з паропроводом турбонасосу (ТПН), який живить парогенератори (ПГ). ПГ – це елемент (обладнання) нормальної експлуатації важливе для безпеки атомної електростанції. Отже, надійність роботи ПГ може забезпечити безпеку АЕС.

З'єднання РС з АТН зменшує витрату пари та динамічний тиск у паровому приводі ТПН, а відповідно зменшує (за певних рівних умов) витрату живильної води в об'ємі парогенератора. Крім того, флуктуаційні відхилення термодинамічних параметрів в змодельованій системі «ПТУ-РС з АТН» можуть вплинути на умови виникнення МТН в парогенераторній установці.

Ці питання зумовлюють необхідність подальшого аналізу доцільності модернізації системи «ПТУ-РС з АТН».

Висновки

1. Розроблено оригінальну методику визначення критеріїв та умов міжконтурної термодинамічної нестабільності в модернізованій системі «паротурбінна установка — система регенерації з абсорбційними

тепловими насосами». Метод заснований на термодинамічному аналізі впливу незалежних флуктуаційних відхилень від рівноважного стану потоку вологої пари на вході в абсорбційні теплові насоси та тиску в абсорбційних теплових насосах/змішувальних нагрівачах низького тиску. На відміну від відомих підходів до моделювання термодинамічних процесів, термодинамічна модель розробленого методу враховує вплив флуктуаційних відхилень від рівноважного стану термодинамічних параметрів, що визначають критерії та умови міжконтурної термодинамічної нестабільності.

2. На підставі аналізу отриманих критеріїв та умов виявлено, що основною причиною міжконтурної термодинамічної нестабільності в модернізованій системі «Паротурбінна установка — система регенерації з абсорбційними тепловими насосами» є неповнота (інерційність) тепло масо обмінних і гідродинамічних процесів при флуктуаційних відхиленнях від рівноважного стану термодинамічних параметрів.

3. Запобігання умовам міжконтурної термодинамічної нестабільності в модернізованій системі «Паротурбінна установка — система регенерації з абсорбційними тепловими насосами» можна забезпечити шляхом встановлення регуляторів витрати в контурах подачі вологої пари з циліндра високого тиску. від турбіни до абсорбційних теплових насосів і від абсорбційних теплових насосів до змішувальних нагрівачів низького тиску для підтримки постійного тиску в абсорбційних теплових насосах і змішувальних нагрівачах низького тиску.

4. Також необхідно врахувати, що модернізація «Паротурбінна установка — система регенерації з абсорбційними тепловими насосами» може вплинути на роботу та умови міжконтурної термодинамічної нестабільності «сусідніх» систем, зокрема парогенераторної установки.

5. Зазначені питання зумовлюють необхідність подальшого аналізу обґрунтованості модернізації систем «Паротурбінна установка — система регенерації з абсорбційними тепловими насосами».

Список використаної літератури.

1. Науково-технічні основи заходів підвищення безпеки АЕС з ВВЕР. Інститут проблем безпеки АЕС Національної Академії наук України. Під редакцією академіка О.О. Ключникова, Чорнобиль, 2012, 296 с.
2. Hemmat Safwat, Asif Arutig, Syed Husaini Systematic Methodology for Diagnostics of Water Hammer in LPW Power Plants // Nuclear Engineering and Design. - 1990 - № 122 - Р. 365 – 376.
3. Pressurized Thermal Shock in NPP: Good Practices for Assessment Deterministic Evaluation for the Integrity of Reactor Pressure Vessel / IAEA-TECDOC 1627 – 2010.
4. Королев О.В., Іщенко А.П., Іщенко О.П. Исследование гидравлических ударов при заполнении системы компенсации давления в водоводяных энергетических реакторах. Известия Вузов. Энергетика. - № 5 - 2017 - Р.459-469.
5. Skalozubov V., Komarov Yu., Pirkovskiy D., Kozlov I. Water Hammer Conditions and consequences in Pressurizers of Nuclear Reactors // Turkish Journal of Physics. - 2019 - № 3 (43) — P.229-235.
6. Скалозубов В.І., Білоус Н.В., Пірковський Д.С., Козлов І.Л., Комаров Ю.А., Чулкін О.А. Гідродинамічні удари в обладнанні ядерних енергоустановок при трансзвукових режимах течії парорідинних потоків // Ядерна та радіаційна безпека. 2019.- № 2 (82) – 33 Р. 43-46.
7. Скалозубов В.І., Пірковський Д.С., Комаров Ю.А., Козлов І.Л. Сучасний метод умов надійності критичних гідравлічних ударів // Проблеми атомної науки і техніки. 2017 - № 4 (110) — Р.74-79.
8. Скалозубов В.І., Козлов І.Л., Чулкін О.А., Комаров Ю.А., Піонтковський О.І. Аналіз критичних умов надійності при гідродурах в активних системах безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР-1000. Ядерна та радіаційна безпека. № 1(81) (2019). С. 42-45.
9. Шараевский И.Г., Фиалко Н.М., Носовский А.В., Зимин А.Б., Шараевский Г.И. Актуальные проблемы теплофизики проектных та тяжких аварій ядерних енергоблоків. Ядерна та радіаційна безпека №2(70) (2016) С. 32-36.
10. Шараевский И.Г. Проблемы підвищення показників надійності розрахунків критичних теплових потоків у водоохолоджуваних ядерних реакторах на основі комп'ютерних теплогідравлічних кодів. // Ядерна та радіаційна безпека. - № 3 (79) — 2018 — С. 16-22.
11. Accident Management programmers for NPP: Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series № SSG-54. - Vienna: IAEA. - 2019 – 81 p.
12. Демєнков 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 RELAP CODE. Ядерна та радіаційна безпека №3(87) (2020). С. 46-54.
13. Sauvage E., Musoyan G. Nuclear Reactor Severe Accident Analysis: Applications and Management Guidelines // SARnet. - Budapest – Hungary. - 2018 – 38 p.

V. Skalozubov¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-2361-223X

V. Kondratyk², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-5035-311X

V. Filatov², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-3046-3546

¹**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**

²**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

CRITERIA AND CONDITIONS OF THE INTER-CIRCUIT THERMODYNAMIC INSTABILITY OF THE NPP'S MODERNIZED TURBINE SYSTEM

The original method of determining the criteria and conditions of inter-circuit thermodynamic instability in the modernized system "steam turbine - regeneration system with absorption heat pumps" is presented. This was developed through a thermodynamic analysis of the effect of independent fluctuating deviations from equilibrium in both the wet vapor flow at the absorption heat pump inlet and the measured pressure in the absorption heat pump/low pressure mixing heaters. Unlike known approaches to modeling thermodynamic processes, the thermodynamic model of the developed method takes into account the influence of fluctuating deviations from the equilibrium state of thermodynamic parameters, which determine the criteria and conditions of inter-loop thermodynamic instability. Based on the analysis of the received criteria and conditions, it was established that the main cause of inter-circuit thermodynamic instability in the modernized system "steam turbine unit — a regeneration system with absorption heat pumps" is determined by the incompleteness (inertia) of heat-mass exchange and hydrodynamic processes during fluctuating deviations from the equilibrium state of thermodynamic parameters. Prevention of the conditions for inter-loop thermodynamic instability in the modernized system "steam turbine unit — a regeneration system with absorption heat pumps" can be ensured by installing flow controllers in the wet steam supply circuits from the high-pressure cylinder of the turbine to the absorption heat pumps, and absorption heat pumps in mixing heaters low pressure to maintain a constant pressure in absorption heat pumps and low pressure mixing heaters. It is also necessary to consider that the modernization of the "steam turbine unit — a regeneration system with absorption heat pumps" system can affect the performance and conditions of inter-loop thermodynamic instability of "neighboring" systems. These issues determine the need for further analysis of the validity of the modernization of the "steam turbine unit — a regeneration system with absorption heat pumps" systems.

Key words: modernization of turbo installations, thermodynamic instability

References

1. Scientific and technical basis of increasing the safety and efficiency of nuclear power plants with VVER / Under the general editorship of Academician O.O. Klyuchnikova. - Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of National Academy of Sciences. - Chernobyl. - 2012 - 296 p.
2. Hemmat Safwat, Asif Arutig, Syed Husaini Systematic Methodology for Diagnostics of Water Hammer in LPW Power Plants // Nuclear Engineering and Design. - 1990 - № 122 – P. 365 – 376.
3. Pressurized Thermal Shock in NPP: Good Practices for Assessment Deterministic Evaluation for the Integrity of Reactor Pressure Vessel / IAEA-TECDOC 1627 – 2010.
4. Korolev A.V., Ishchenko A.P., Ishchenko O.P. Investigation of hydraulic shocks when filling the pressure compensation system in VVER. *Izvestiya vuzov. Energy*. - No. 5 - 2017 - P.459-469.
5. Skalozubov V., Komarov Yu., Pirkovskiy D., Kozlov I. Water Hammer Conditions and consequences in Pressurizers of Nuclear Reactors // *Turkish Journal of Physics*. - 2019 - № 3 (43) — P.229-235.
6. 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 and Radiation Safety* – 2019.- # 2 (82) – 33 P. 43-46.
7. Skalozubov V., Pirkovskiy D., Komarov Yu., Kozlov I. Modern Method of Conditions for Reliability Critical Hydraulic Impacts // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2017. - # 4 (110) — P.74-79.
8. Skalozubov V., Kozlov I., Chulkin O., Komarov Yu., Piontkovskiy O. Analysis of Reliability Impact Conditions of WWER-1000 NPP Active Systems // *Nuclear and Radiation Safety*. - # 1 (81) — 2019 — P.42-45.
9. Sharaievskii, I., Fialko, N., Nosovsky, A., Zimin, L., Sharaievskii, G. Urgent Problems in Thermal Physics of Design-Basis and Severe Accidents at Nuclear Power Plants // *Nuclear and Radiation Safety*. - # 2 (70) — 2016 — C. 32-36.
10. G. Sharaevsky Problems of Reliability Indicators Increase of Critical Heat Flux Calculations in the Water-Cooled Nuclear Reactors Based on the Computer Thermal-Hydraulic Codes // *Nuclear and Radiation Safety*. - # 3 (79) — 2018 — C. 16-22.
11. Accident Management programmers for NPP: Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series № SSG-54. - Vienna: IAEA. - 2019 – 81 p.
12. V. Diemienkov, O. Shugailo, M. Mustafin, M. Makarenko Assessing Structural Integrity of NPP Equipment and Pipelines by Coupled Calculations in ANSYS and RELAP Codes // *Nuclear and Radiation Safety*. - # 3 (87) — 2020 — C. 46-54.
13. Sauvage E., Musoyan G. Nuclear Reactor Severe Accident Analysis: Applications and Management Guidelines // *SARnet*. - Budapest – Hungary. - 2018 – 38 p.

Надійшла: 11.09.2023

Received: 11.09.2023