

В.Ю. Гриб¹
В.І. Скалзубов¹
В.М. Ващенко²
І. Б. Кордуба³

СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНИМИ АВАРІЯМИ ПІД ЧАС ВТРАТИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВКАХ З ВВЕР

¹ Державний університет «Одеська політехніка»;

² Національний авіаційний університет

³ Київський національний університет будівництва і архітектури

Анотація

Одна із задач стратегії управління аварії є упередити або мінімізувати небезпечні екологічні наслідки аварії. Тому, у роботі пропонується комплексна стратегія управління аваріями з повною тривалою втратою електропостачання.

Ключові слова: екологічна безпека, управління аваріями, повна втрата тривалого електропостачання, ядерні енергоустановки.

Abstract

One of the tasks of an accident management strategy is to prevent or minimize the dangerous environmental consequences of an accident. Therefore, the paper proposes a comprehensive accident management strategy with complete long-term loss of electricity supply

Keywords: environmental safety, accident management, complete loss of long-term power supply, nuclear power plants.

Вступ

Однією з основних причин важких аварій з пошкодженням ядерного палива та руйнівних парогазових вибухів на АЕС Фукусіма-Даїчі в 2011 р стала повна тривала втрата електропостачання (ПДПЕ) внаслідок спільного впливу запроектованих землетрусу і цунамі ([1-3] та ін.). ПДПЕ привела до відмови активних систем безпеки з електронасосами і невиконання функції безпеки щодо відведення залишкових тепловиділень ядерного палива (ФБ ОТ). Пасивні системи безпеки і додаткові дії персоналу в процесі аварії також не змогли забезпечити виконання ФБ ВІД і запобігти важкі аварії та вибухи. Тому після 2011р. актуальним питанням екологічної та ядерної безпеки є розробка ефективних стратегій управління аваріями з ПДПЕ на ядерних енергоустановках (ЯЕУ).

Метою роботи є обґрунтувати необхідність альтернативних пасивних систем безпеки, що забезпечують компенсацію відмов аварійних поживних електронасосів протягом не менше 72 год.

Результати дослідження

Аналіз стратегії управління аваріями з ПДПЕ на основі СПОТ ПГ (СУ1). Для реакторів типу ВВЕР однією з перспективних СПОТ є система відведення тепла через 2-й контур парогенератора (СПОТ ПГ). Основне призначення СПОТ ПГ - обидві-спеченого ФБ ПГ в процесі аварій з ПДПЕ і відведення тепла від реактора (ФБ ОТ).

Аналіз встановлених (наприклад, в Китаї) і проєктованих СПОТ ПГ дозволяє зробити попередні висновки:

1. СПОТ ПГ фактично є допоміжним для активних систем безпеки забезпечення виконання ФБ ВІД, для аварій з частковою або короткочасною втратою електропостачання.

Забезпечення виконання ФБ ПГ також недостатньо обґрунтовано. Зниження рівня води в ПГ може привести до пошкодження теплообмінних труб ПГ і до запроектних аварій з міжконтурними течами.

2. Для забезпечення необхідної природної циркуляції теплообмінна поверхню СПОТ ПГ з повітряним або водяним охолодженням повинні встановлюватися за межами захисної оболонки на великій висоті. Такий підхід визначає значне зниження надійності СПОТ ПГ і захисної оболонки до зовнішніх екстремальних впливів щодо основного обладнання ЯЕУ.

Таким чином, недостатньо забезпечений принцип відповідності пасивних і активних систем без небезпеки при аваріях з ПДПЕ та множинними відмовами як одного з основних уроків Фукусімської аварії.

У квазістаціонарному наближенні рівняння теплогідравліки СПОТ ПГ можна представити в наступному вигляді:

$$G(i'' - i') + C_p \cdot G \cdot \Delta T_1 = \alpha F \Delta T_2, G \cdot (i'' - i') = N(t), \quad (1)$$

$$(\rho_l - \rho_v) \cdot gH = \left(\frac{\xi_v}{\rho_v A_v^2} + \frac{\xi_l}{\rho_l A_l^2} \right) \cdot G^2, \quad (2)$$

де G – витрата в СПОТ ПГ; i'' , i' – відповідно ентальпія пара і конденсату в насиченому стані; C_p – питома теплоємність конденсату; ΔT_1 – різниця температур насиченого (T_s) і охолодженого (T_k) конденсату; ΔT_2 – середня різниця температур між циркулюючим потоком і зовнішнім середовищем (T_0); α – коефіцієнт теплопередачі між циркулюючим потоком і зовнішнім середовищем; F – площа теплообмінної поверхні СПОТ ПГ; ρ_l , ρ_v – густина рідини і пара відповідно; g – прискорення сили тяжіння; H – висота СПОТ ПГ; ξ_v , ξ_l – відповідно сумарний коефіцієнт гідравлічного опору на паровому і рідинному ділянках; A_v , A_l – середня площа прохідного перетину

СПОТ ПГ на паровому і рідинному ділянках; $N(t)$ – потужність залишкових тепловиділень активної зони реактора; t – час аварійного процесу.

Тоді умови забезпечення принципу відповідності СПОТ ПГ і АПЕН впливають з формул (1), (2):

$$F \geq F_{\min} = \frac{i'' - i' + C_p \cdot \Delta T_1}{\alpha \cdot \Delta T_2} \cdot \frac{N(t)}{i'' - i'}, \quad (3)$$

$$H \geq H_{\min} = \frac{\frac{\xi_v}{\rho_v A_v^2} + \frac{\xi_l}{\rho_l A_l^2}}{(\rho_l - \rho_v)g} \cdot \frac{N^2(t)}{(i'' - i')^2}. \quad (4)$$

Мінімально допустимі значення площі прохідного перетину потоку що конденсується в контурах природної циркуляції можуть бути оцінені з умов відсутності конденсаційних гідроударів [12]:

$$F_r = \frac{G}{\rho \cdot A \sqrt{g}} \cdot \left(\frac{4A}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} < 1. \quad (5)$$

Виникнення конденсаційних гідроударів порушують умови стійкої циркуляції в контурі СПОТ ПГ.

Тоді з умови (5) нижня межа площі прохідного перетину СПОТ ПГ:

$$A_H = 3 \sqrt{\frac{4 \cdot G^4}{\pi \rho_l^4 g^2}}. \quad (6)$$

Верхня межа площі прохідного перетину (A_B) може бути визначена за умови неперевикнення при сейсмічних впливах напруг (s) в металі конструкції СПОТ ПГ масою $M(A)$ гранично допустимою напругою s_{\max} [5, 6]:

$$\sigma[M(A_B), H_0, a_c] \leq \sigma_{\max}, \quad (7)$$

де H_0 - максимальна висота конструкції СПОТ ПГ над поверхнею ґрунту; a_c - відгук прискорення землетрусу на поверхні ґрунту проммайданчика.

З рівняння (3) випливає, що при повітряному теплозніманні для прямої гладкої труби теплообмінної поверхні СПОТ ПГ, температури конденсату не більше 320 К при $N(t)$ більше 50% від номінальної потужності реактора мінімальна площа теплообмінної поверхні СПОТ ПГ.

$$F_{\min} \geq 3,5 \cdot 10^5 \text{ м}^2.$$

Проблема необхідності реалізації великої площі теплообміну СПОТ ПГ може бути вирішена за рахунок заходів по підвищенню інтенсивності зовнішнього теплообміну (наприклад, зовнішні ребра теплообмінної поверхні) і установки компактних модульних теплообмінників (див. рис. 1). Однак при установці системи модульних теплообмінників суттєво зростає гідравлічний опір контуру циркуляції СПОТ ПГ. Відповідно до умови (4) це призводить до необхідності збільшення загальної висоти СПОТ ПГ на кілька сотень метрів над поверхнею захисної оболонки ЯЕУ. Така висота СПОТ ПГ технологічно складна і визначає значне зниження умов сейсмостійкості і загального рівня безпеки до зовнішніх екстремальних впливів.

Аналіз стратегії управління аваріями з ПДПЕ на основі АПНПП (СУ2). Багаторічний досвід експлуатації теплотехнічного обладнання теплових і ядерних енергоустановок показав, що найменш надійними елементами є насосне обладнання [14]. Аналогом АПНПП може бути основний ТПН, працездатність якого забезпечується безпосередньо відборами пара від турбоустановки. Аналіз технічних характеристик і досвіду експлуатації ТПН дозволяє припустити лінійну апроксимацію залежності об'ємної витрати Q від тиску пара P_u в паровідборі [15]:

$$Q = K_u \cdot P_u, \quad (8)$$

де $K_u = 585,9 \text{ м}^3/(\text{ч} \times \text{МПа})$ — коефіцієнт лінійної апроксимації.

Таким чином, із залежності (8) випливає мінімальний граничний тиск, що забезпечує працездатність АПНПП (P_{\min}):

$$\frac{Q(\text{АПНПП})}{Q(\text{ТПН})} = \frac{K_u(\text{АПНПП}) \cdot P_{\min}}{K_u(\text{ТПН}) \cdot P_{\max}}, \quad (9)$$

де P_{\max} — максимальний тиск пара в трубопроводі ТПН (6,4 МПа), що забезпечує проектний витрата $3750 \text{ м}^3 / \text{год}$. Вважаючи ідентичними коефіцієнти лінійної апроксимації для ТПН і АПНПП, отримуємо значення $P_{\min} = 0,3 \text{ МПа}$.

Таким чином, можна сформулювати основні положення загальної стратегії управління аваріями з ПДПЕ:

1. У початковий момент аварії необхідно застосування змін АПНПП до зниження тиску в ПГ менше 0,3 МПа (СУ1). Працездатність АПНПП повинна бути забезпечена для аварій з ПДПЕ і відмовою аварійного захисту реактора при тисках в ПГ більше 0,3 МПа.

2. При зниженні тиску в ПГ менше 0,3 МПа необхідно відключення АПНПП і перехід на СПОТ ПГ (СУ2). Розміри СПОТ ПГ повинні відповідати вимогам по сейсмостійкості [5, 6] і забезпечувати ФБ ОТ від реактора і підтримки необхідного рівня води в ПГ при тисках пара 0,3 МПа.

Висновки

Запропоновано загальну стратегію управління аваріями з ПДПЕ на ЯЕУ. У початковий момент управління аварією здійснюється АПНПП при тиску пара в ПГ більше 0,3 МПа.

При менших тисках пара в ПГ і зниженні потужності залишкових тепловиділень менше 2% від номінальної потужності обґрунтовано застосування стратегії з СПОТ ПГ, заснованими на природній циркуляції. При цьому розміри СПОТ повинні відповідати нормативним вимогам по сейсмостійкості і забезпечувати ФБ ОТ від реактора і підтримання необхідного рівня живильної води в ПГ при тисках пара менше 0,3 МПа.

Необхідна експериментальна кваліфікація систем безпеки, що забезпечують управління аваріями з ПДПЕ.

Необхідна додаткова кваліфікація запропонованої стратегії управління аваріями з ПДПЕ з урахуванням міжконтурної течії і динаміки процесів в реакторі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стратегії управління аваріями під час повної тривалої втрати електропостачання на ядерних енергоустановках: Стаття / В. І. Скалозубов, В. Ю. Гриб, О. В. Королев, Т. В. Габля, В. Ю. Кочнева, 2011. – 20 с.

Гриб Віталій Юрійович — аспірант кафедри атомних електростанцій, Державний університет «Одеська політехніка», Одеса, e-mail: vitaliigryb@ukr.net

Скалозубов Володимир Іванович — доктор наук, професор кафедри атомних електростанцій, Державний університет «Одеська політехніка», Одеса, e-mail: vi.skalozubov@gmail.com.

Ващенко Володимир Миколайович — Д-р фіз.-мат. н., професор, факультет екологічної безпеки, інженерії та технологій, Національний авіаційний університет, Київ, e-mail: nucleoroid@gmail.com.

Кордуба Ірина Богданівна – доцент, факультет інженерних систем та екології, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.

Hryb Vitalii Y. — Department of Nuclear Power Plants, Odessa Polytechnic State University, Odessa, email : vitaliigryb@ukr.net

Skalozubov Volodymyr I. — Doctor of Sciences, Professor of the Department of Nuclear Power Plants, Odessa Polytechnic State University, Odessa, e-mail: vi.skalozubov@gmail.com.

Vashchenko Volodymyr M. — Doctor of Sciences, Professor, Faculty of Environmental Safety, Engineering and Technology, National Aviation University, Kyiv, e-mail: nucleoroid@gmail.com.

Korduba Iryna B. - Associate Professor, Faculty of Engineering Systems and Ecology, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv