

УДК 624.046.5

ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВЕР-1000 ПРИ ЗАПРОЄКТНИХ АВАРІЯХ

Переяславець Сергій, с. н. с.; Бауск Євгеній, зав. лаб.;

Бобко Олексій, с. н. с.; Трубілов Олексій, с. н. с.

Державний вищий навчальний заклад

«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Постановка проблеми. Аналіз міцності конструкцій та елементів герметичного об'єму захисної оболонки (ЗО) ядерного реактора ВВЕР-1000 і видів відмов при виникненні важких (запроєктних) аварій виконувався у рамках Комплексної (зведеної) програми підвищення безпеки енергоблоків АЕС України.

Комплексна (зведена) програма підвищення безпеки енергоблоків АЕС України (КзПБ) розроблена ДП «НАЕК «Енергоатом» із врахуванням рекомендацій спільного проекту Єврокомісії, МАГАТЕ та України.

Метою КзПБ є:

- підвищення рівня безпеки експлуатації енергоблоків атомних електростанцій та надійності їх роботи;
- зменшення ризиків виникнення аварій на атомних електростанціях під час стихійного лиха або інших екстремальних ситуацій;
- підвищення ефективності управління проєктними і позапроєктними аваріями на атомних електростанціях, мінімізація їх наслідків.

Мета. Метою роботи є аналіз міцності конструкцій та елементів герметичного об'єму захисної оболонки (ЗО) ядерного реактора ВВЕР-1000 і видів відмов при виникненні важких (запроєктних) аварій з урахуванням поточного технічного стану арматурних канатів системи попереднього напруження і залізобетонних огорожувальних конструкцій системи герметичного огороження локалізуючої системи безпеки (СГО ЛСБ) з використанням верифікованих розрахункових кодів.

Методика. Завдання визначення граничної несучої здатності захисної оболонки є завданням визначення параметрів системи, при яких виконуються критерії працездатності СГО ЛСБ [1; 2]. Вона вирішується шляхом побудови чисельної нелінійної скінченно-елементної моделі СГО ЛСБ в складі моделі реакторного відділення і подальшого її аналізу методом скінченних елементів.

Результати. Визначені граничні значення несучої здатності захисних оболонок енергоблоків № 1÷6 Запорізької АЕС при комбінованій дії надлишкового внутрішнього тиску і високої температури які притаманні найбільш небезпечним сценаріям важких аварій. В рамках дослідження були розроблені скінченно-елементні розрахункові моделі і виконана серія нелінійних розрахунків.

У складі робіт по розробці скінченно-елементних моделей реакторних відділень енергоблоків № 1÷6 Запорізької АЕС було виконано наступне:

- проведено аналіз і систематизація вимог міжнародних норм, а також норм України, які регламентують безпечну експлуатацію і працездатність СГО ЛСБ;
- проведено аналіз документації СГО ЛСБ енергоблоків № 1÷6 Запорізької АЕС, проаналізовано фактичний стан ЗО, в т.ч. фактична відсутність арматурних канатів;
- розроблені детальні скінченно-елементні моделі СГО ЛСБ в складі реакторних відділень.

Розробка скінченно-елементних моделей для енергоблоків № 1÷6 ВП ЗАЕС проводилася з урахуванням:

- фактичної наявності АК в ЗО (натяг у відсутніх канатах не враховувався);
- наявності залізобетонних привантажень на покрівлях оббудов реакторних відділень № 1 та № 3;
- неоднорідності структури СГО ЛСБ по товщині, а саме:
 - потовщень в зонах люків, проходок і реальної жорсткості самих люків, проходок;
 - геометрії анкерного карниза, підкранової балки, приопорного потовщення;
 - реальної траєкторії арматурних канатів СПЗО;
 - зниження зусиль в армоканатах СПЗО по довжині внаслідок тертя між арматурним канатом та каналоутворювачем;
 - можливості «виключення» будь-яких армоканатів СПЗО («нульових» зусиль в АК);
 - можливості задання будь-якої конфігурації зусиль в АК СПЗО.

Розроблені розрахункові скінченно-елементні моделі відображають дійсні умови роботи конструкцій. У розрахунках враховувалися фактори, що визначають деформований стан, особливості взаємодії елементів конструкцій між собою, просторових робота конструкцій.

В ході робіт по розрахунковому обґрунтуванню граничної несучої здатності ЗО було вирішено ряд пов'язаних завдань:

- виконано ряд нелінійних статичних розрахунків;
- визначені критичні зони в конструкціях ЗО;
- визначені критерії руйнування;
- визначені основні механізми руйнування конструкцій ЗО;
- визначені види відмов герметичного огороження;
- проведена систематизація та аналіз результатів розрахунку;
- визначена гранична несуча здатність захисної оболонки як функція внутрішнього тиску і температурного градієнта.

Результати дослідження були представлені у вигляді графіків індексів пошкоджень в залежності від інтенсивності аварійних впливів, а також результуючих таблиць, що характеризують напружено-деформований стан конструкцій ЗО як функцію надлишкового тиску та температурного градієнта.

Процес розвитку пошкоджень в конструкції ЗО при збільшенні навантажень був представлений графічно за допомогою створення графіка розвитку індексу пошкоджень як функції діючого навантаження.

Також були розроблені огинаючі графіки функцій залежності граничної несучої здатності від тиску і від температури для кожного з енергоблоків Запорізької АЕС.

Наукова новизна. Розроблено аналітичні нелінійні розрахункові моделі циліндричних захисних оболонок ядерних реакторів енергоблоків атомних електростанцій, що дозволяють досліджувати закономірності впливу різних сполучень навантажень на їх напружено-деформований стан, несучу здатність та виконання локалізуючих функцій, аналізувати тріщиноутворення, пошкодження та руйнування елементів захисних елементів. Визначені граничні значення несучої здатності захисної оболонки як функції внутрішнього тиску і температурного градієнта. Визначені критичні зони в конструкції захисної оболонки. Визначені критерії руйнування захисної оболонки. Визначені основні механізми руйнування конструкції захисної оболонки. Визначені види відмов герметичного огороження.

Висновки. За результатами проведених розрахунків і досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Розроблені скінченно-елементні моделі захисних оболонок дозволили вирішити задачі з імовірнісного аналізу безпеки другого рівня та продовженню терміну експлуатації енергоблоків Запорізької АЕС.

2. Виконані розрахунки дозволили визначити граничні значення несучої здатності захисних оболонок енергоблоків № 1÷6 Запорізької АЕС при комбінованій дії надлишкового внутрішнього тиску і високої температури які притаманні найбільш небезпечним сценаріям важких аварій.

Перелік використаних джерел

1. Design of the Reactor Containment and Associated Systems for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide. № SSG-53. IAEA, Vienna, 2019.
2. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. 2002.