

УДК 621.039.58

М.Є. Пахалович, С.О. Кучер, Ю.П. Левуцький, С.П. Малишко

ТОВ «Експертно-технічний центр «ЕНЕРГОРЕСУРС», Київ

РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕПЛОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПІВДЕННОУКРАЇНСЬКОЇ АЕС НА ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЩОДО ПРОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ

У статті розглянуто розрахункові методи оцінки технічного стану тепломеханічного обладнання та трубопроводів реакторного відділення Південноукраїнської АЕС, що забезпечують продовження терміну безпечної експлуатації. Розроблено рекомендації, щодо продовження ресурсу обладнання відповідно вимог їх нормативного забезпечення.

Ключові слова: тепломеханічне обладнання, нормативне забезпечення, міцність, сейсмічність, ресурс, безпека експлуатації.

Вступ

Для підтримки необхідного рівня технічної та ядерної безпеки необхідно провести оцінку технічного стану та обґрунтувати можливість продовження терміну експлуатації 1-го та 2-го блоку Південноукраїнської (ПУ) АЕС.

Також необхідно розробити заходи, що забезпечують продовження терміну безпечної експлуатації та недопущення аварій устаткування I контуру енергоблоків ПУ АЕС відповідно до вимог нормативних документів (НД) [1,2].

Завданням роботи є розробка методів оцінки технічного стану і обґрунтування можливості продовження терміну експлуатації тепломеханічного обладнання (ТМО) реакторного відділення, а саме головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ), головної запірної засувки (ГЗЗ) і трубопроводу зв'язку компенсатору об'єму (КО) з «гарячою» ниткою петлі головного циркуляційного контуру (ГЦК) [3, 4], головних циркуляційних насосів ГЦН [5], компенсатора тиску [6], парогенераторів (ПГ) [7].

Актуальність даної роботи полягає в тому, що при оцінці сучасного технічного стану обладнання АЕС необхідно враховувати рекомендації МАГАТЕ, а також рекомендації міжнародного проекту TACIS [8]. Нормативно-правове регулювання, що існувало до теперішнього часу, щодо ядерної та радіаційної безпеки, передбачало тільки розробку нормативно-правових актів, що містять детальні технічні вимоги та критерії, що не завжди враховувало зарубіжні рекомендації.

Зараз при проведенні робіт, які пов'язані з обстеженням устаткування, враховані рекомендації зарубіжних організацій, а також рекомендації при використанні нормативно-правових документів, розроблених безпосередньо для енергоблоків АЕС при продовженні терміну служби енергоблоку.

Мета роботи полягає в розробці науково-обґрунтованих рекомендації оцінки залишкового ресурсу обладнання з урахуванням сучасних вимог нормативно-технічного та нормативно-правового забезпечення та дати рекомендації про можливість безпечної експлуатації понад проектного терміну.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати перевірочні розрахунки ГЦН, ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячою» ниткою петлі №4 ГЦК, компенсатора тиску, парогенераторів ПГ на міцність;

- розробити рекомендації щодо управління старінням обладнання, які включають заходи, що забезпечують підтримку необхідного рівня технічної та ядерної безпеки;

- розробити обґрунтоване рішення про можливість і строки подальшої безпечної експлуатації на підставі даних про технічний стан обладнання.

В подальшому у статті використані терміни, визначення та умовні скорочення, рекомендовані НД України та міжнародних організацій, що наведено у відповідній літературі [9].

Основний зміст

Оцінка технічного стану ТМО виконана на підставі аналізу технічної документації, аналізу відмов і пошкоджень, аналізу результатів проведеного контролю стану металу, а також вибірки зон контролю при виконанні обстеження обладнання. Технічний стан елементів залежно від здатності їх виконувати протягом прогнозованого терміну всі функції, передбачені проектною документацією та НД[1,9], класифікується як:

- справне (нормальне) - при виконанні всіх вимог проекту і діючих на момент обстеження нормативних документів;

- працездатне (задовільний) - при частковому відступі від вимог проекту і діючих норм, але без порушення вимог за граничними станами першої групи і при таких порушеннях вимог за граничним станом другої групи, які в конкретних умовах не обмежують нормальне функціонування об'єкта;

- обмежено працездатний (незадовільний) - у випадках, коли для забезпечення функціонування виробництва необхідний контроль за станом елементів і конструкцій, за тривалістю їх експлуатації або за параметрами технологічних процесів;

- аварійне - при наявних порушеннях (або неможливості протягом прогнозованого терміну запобігти порушенню) вимог за граничним станом першої групи.

При обстеженні обладнання визначено механічні характеристики основного металу, зварних з'єднань і біля шовних зон. За отриманою величиною твердості металу в кожній зоні контролю відповідно до вимог [11 – 13] визначені фактичні механічні характеристики основного металу, зварних з'єднань і біля шовних зон:

- межа міцності R_m^T ;
- межа текучості $R_{p0,2}^T$;
- відносне подовження

$$A^T = [3k / (2R_m^T + R_{p0,2}^T)] \times 100\%, \text{ где } k=14.$$

Для оцінки технічного стану ТМО реакторного відділення енергоблоків Південноукраїнської АЕС були запропоновані наведені нижче розрахункові методи.

Перший метод

Розрахунок напружено-деформованого стану обладнання і трубопроводів, який виконано з використанням комп'ютерної програми Circle-3D, розробленої авторами.

Комп'ютерна програма присутня в переліку дозволених до використання в ДП НАЕК «Енергоатом» розрахункових кодів на підставі листа Держатомрегулювання України № 15-13 / 4980 від 25.08.11 г. "Про розрахункові коди".

Відповідно до вимог Норм міцності [14] (пункт 3.4. і 5.4.2) напруги, визначені при розрахунку на статичну міцність, не повинні перевищувати відповідних допустимих напружень, наведених нижче.

Номінальне допустиме напруження для елементів обладнання і трубопроводів, навантажених тиском, приймають мінімальним з таких значень:

$$[\sigma] = \min \left\{ R_m^T / n_m ; R_{p0,2}^T / n_{0,2} ; R_{mt}^T / n_{mt} \right\}.$$

Для елементів обладнання і трубопроводів, навантажених внутрішнім тиском,

$$n_m = 2,6; n_{0,2} = 1,5; n_{mt} = 1,5.$$

Для елементів обладнання і трубопроводів, навантажених зовнішнім тиском, що перевищує внутрішнє,

$$n_m = 2,6; n_{0,2} = 2; n_{mt} = 2.$$

Визначення допустимих напружень для різних розрахункових груп категорій напруги, використовуваних для оцінки статичної міцності проводиться з урахуванням вимог Таблиці 5.6 Норм міцності [14].

Для НЕ (нормальна експлуатація):

$$(\sigma)_1 = [\sigma];$$

$$(\sigma)_2 = 1,3 \times [\sigma];$$

$$(\sigma)_{RV} \leq \left(2,5 - \frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T} \right) R_{p0,2}^T,$$

але менш $2 \times R_{p0,2}^T$.

Для ГВ (гідравлічні випробування):

$$(\sigma)_1 = 1,35 \times [\sigma];$$

$$(\sigma)_2 = 1,7 \times [\sigma],$$

де $R_{p0,2}^T$ - мінімальне значення межі текучості при розрахунковій температурі, МПа,

R_m^T - мінімальне значення тимчасового опору при розрахунковій температурі, МПа,

$(\sigma)_{RV}$ - розмах наведених напруг, (МПа), який визначається відповідно до табл. 5.1 Норм міцності [14].

Умова циклічної міцності вважається забезпеченим, якщо при наявності різних циклічних навантажень виконується умова:

$$\sum_{i=1}^k \frac{N_i}{[N_0]} = a \leq [a_N]$$

де, відповідно [14], граничне значення накопиченого втомного пошкодження прийнято рівним одиниці.

Також для ТМО виконані розрахунки на статичну міцність, циклічну міцність, розрахунок на опір сейсмічних впливів і розрахунок на опір крихкому руйнуванню [14].

Другий метод

Для обліку зміни властивостей матеріалу в процесі експлуатації визначення допустимого коефіцієнта інтенсивності напружень проводиться з урахуванням критичної температури крихкості. Для сталей перлітного класу і сталей великим вмістом хрому і їх зварних з'єднань з межею плинності при температурі 20 °С не перевищує 600 МПа (60 кгс / мм²), використовується узагальнена залежність коефіцієнта інтенсивності напружень [14, п. 5.8.3.4].

Критичну температуру крихкості матеріалу визначали за формулою:

$$T_k = T_{k0} + \Delta T_T + \Delta T_N + \Delta T_F,$$

де T_{k0} - критична температура крихкості матеріалу в початковому стані;

ΔT_T - зсув критичної температури крихкості внаслідок температурного старіння;

ΔT_N - зсув критичної температури крихкості внаслідок циклічної пошкоджуваності;

ΔT_F - зсув критичної температури крихкості внаслідок впливу нейтронного опромінення.

Третій метод

Розрахунковий аналіз конструкції обладнання при сейсмічних впливах проводився з використанням лінійно-спектрального методу відповідно до методики, викладеної в Додатку 9 Норм міцності [14].

Необхідно було привести розрахункове обґрунтування узагальнених спектрів відповіді від сейсмічних впливів для відміток установки обладнання, що було виконано для експлуатованого обладнання.

Четвертий метод

Оцінка міцності при сейсмічних впливах виконана за умовами статичної від спільної дії експлуатаційних і сейсмічних навантажень.

Міцність вважається забезпеченою, якщо для наступного сполучення навантажень виконується умова [13]:

НЕ+МРЗ(максимальний розрахунковий землетрус):

$$(\sigma_s)_1 \leq 1.4[\sigma];$$

$$(\sigma_s)_2 \leq 1.8[\sigma].$$

НЕ+ПЗ(проектний землетрус):

$$(\sigma_s)_1 \leq 1.2[\sigma]$$

$$(\sigma_s)_2 \leq 1.6[\sigma].$$

Для розрахунку складена розрахункова модель конструкції обладнання.

Проведена дискретизація розрахункової моделі на необхідну кількість кінцевих елементів заданого розміру і з необхідним згущенням у вибраних місцях конструкції.

Обчислені матриці жорсткості і маси конструкції.

Враховані кінематичні граничні умови для тих вузлових компонент, яким відповідають обмеження опор.

Визначені n власні частоти системи:

$$([K] - \lambda \cdot [M])\{X\} = 0,$$

де $[K]$ - матриця жорсткості системи,

$[M]$ - матриця мас,

λ - власне число,

$\{X\}$ - відповідний їй власний вектор.

Визначена кругова власна частота.

$$\omega_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\lambda_i}.$$

Кількість обчислюваних власних частот n повинно бути таким, щоб ω_n не перевищувало найбільшої частоти, для якої задані спектри відповіді.

Визначено сейсмічне навантаження, що діє в напрямку i -ої узагальненої координати і відповідної j -ої формі власних коливань системи:

$$P_{ij} = m_{ii} \ddot{X}_j \phi_j x_{ij},$$

де m_{ii} - маса опори, відповідна i -ої узагальненої координаті;

X_j - прискорення, яке визначається по спектру для частоти ω_j у вузлу з i -ої узагальненої координатою;

x_{ij} - компонента j -го власного вектора, що відповідає узагальненій координаті ϕ_i - постійна j -ої форми коливань (нормувальний множник):

$$\phi_j = \frac{\sum_{i=1}^k m_{ii} x_{ij} \cos \alpha_i}{\sum m_{ii} x_{ij}^2},$$

тут α_i - кут між напрямком сейсмічного впливу (чинного в позитивному напрямку осей x , y , z глобальної системи координат) і напрямом i -ої узагальненої координати.

Виконано статичний розрахунок обладнання з урахуванням прикладених сейсмічних навантажень, визначені відповідні вузлові переміщення і внутрішні зусилля.

Вузлові переміщення визначені з рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь виду:

$$[K] \cdot \{X\} = \{P\}$$

де $\{P\}$ - вектор прикладених зовнішніх вузлових навантажень;

$\{X\}$ - вектор вузлових переміщень.

Всього виконано $3n$ рішень системи.

Внутрішні зусилля в рамної конструкції обчислені окремо для кожного з напрямків x , y , z дії сейсмічного навантаження для кожного власного числа i , $1 \leq i \leq n$.

Сумарний вплив визначено як найгірший варіант дії різних компонент навантаження, тобто напруги дорівнюють сумі абсолютних значень компонент відповідних напружень.

В результаті розрахунку визначені нормальні напруги від дії розтягуючих (стискаючих) осьових навантажень та згинальних моментів, а також дотичні напруження від дії крутного моменту і перерізають сил.

Висновки

Таким чином, запропоновані розрахункові методи оцінки технічного стану ТМО реакторного відділення енергоблоків ПУ АЕС відповідно до нормативного забезпечення з продовження ресурсу дозволяють:

- провести перевірочні розрахунки ГЦН, ГЦТ, ГЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячою» ниткою петлі №4 ГЦК, компенсатора тиску, парогенераторів ПГ на статичну міцність;
- провести перевірочні розрахунки ТМО на опір сейсмічних впливів і розрахунок на опір крихкому руйнуванню;
- зробити висновок про відповідність поточних параметрів обладнання нормативним вимогам;
- отримати оцінку технічного стану обладнання для подальшого обґрунтування можливості продовження терміну експлуатації.

Список літератури

1. НП 306.2.099-2004. Общие требования к продолжению эксплуатации энергоблоков АЭС в сверхпроектный срок по результатам осуществления периодической переоценки безопасности.
2. Kiporenko A.S. The improvement of the normative providing of nuclear power plants pipelines systems safety / A.S. Kiporenko, R.M. Trich // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. - № 2 (84). – С. 26 -31.
3. «Типовая программа оценки технического состояния и переназначения ресурса/срока службы трубопроводов с опорами и подвесками», ПМ-Т.0.08.165-05.
4. «Типовая программа по управлению старением элементов энергоблока АЭС», ПМ-Д.0.08.222-06.
5. «Типовая программа обследования насосного оборудования с целью продления срока эксплуатации» ПМ-Т.0.03.113-02.
6. «Типовая программа оценки технического состояния и переназначения ресурса/срока службы сосудов» ПМ-Т.0.08.163-05.

7. «Типовая программа оценки технического состояния и переназначения ресурса парогенераторов» ПМ-Т.0.08.164-06

8. Рекомендации по совершенствованию национальной нормативной базы в части продления срока эксплуатации и управления старением энергоблоков АЭС Украины / А-й П. Шугайло, А-р П. Шугайло, Д.И. Рыжов, В.Б. Крицкий // Ядерна та радіаційна безпека. –2013. – 3(59). – С. 3-9.

9. Основы продления эксплуатации АЭС с ВВЭР : монография / В.И. Скалозубов, А.А. Ключников, Е.С. Лещетная; под ред В. И. Скалозубова; НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. – Чернобыль (Киев, обл.) : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2011. – 384 с.

10. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення

11. РД ЭО.0027-94. Определение характеристик механических свойств оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости.

12. ПНАЭ Г-7-015-89. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Магнитопорошковый контроль

13. Методика М-02-91. Определение допускаемых дефектов в металле оборудования и трубопроводов во время эксплуатации АЭС.

14. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

Надійшла до редколегії 16.03.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Чухрай, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків.

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЮЖНОУКРАИНСКОЙ АЭС НА СООТВЕТСТВИЕ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПО ПРОДЛЕНИЮ РЕСУРСА

Н.Е. Пахалович, С.А. Кучер, Ю.П. Левуцкий, С.П. Малышко

В статье рассмотрены расчетные методы оценки технического состояния тепломеханического оборудования и трубопроводов реакторного отделения Южно-Украинской АЭС, обеспечивающие продление срока безопасной эксплуатации. Разработаны рекомендации по продлению ресурса оборудования в соответствии требований их нормативного обеспечения.

Ключевые слова: теплотехническое оборудование, нормативное обеспечение, прочность, сейсмичность, ресурс, безопасность эксплуатации.

CALCULATED METHODS FOR TECHNICAL STATE ASSESSMENT OF SOUTH UKRAINIAN NPP HEAT EQUIPMENT ACCORDING TO NORMATIVE SUPPORT FOR LIFE EXTENSION

N.E. Pahalovich, S.A. Kucher, Yu.P. Levutsky, S.P. Malysenko

The design methods for estimation technical condition of mechanical equipment and pipelines of the south Ukrainian nuclear power plants reactor's compartment that provide extension of safe operation are described. recommendations to extend equipment life according to requirements normative support are designed.

Keywords: thermo-technical equipment, normative support, strength, seismic activity, life extension, operational safety.