

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 62.621

В.І. Коньшин, канд. техн. наук, доц.,
Т.Г. Іваненко, магістрант

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЕПЛОБМІННИКА СИСТЕМИ РОЗХОЛОДЖУВАННЯ БАСЕЙНУ ВИТРИМКИ ДЛЯ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000 З МЕТОЮ ПРОДОВЖЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Проведено оцінку технічного стану теплообмінника системи розхолодження басейну витримки енергоблоку №3 ВП ЮУАЕС. Виконано аналіз проектної, технічної та експлуатаційної документації в об'ємі попередньої оцінки технічного стану. Визначені потенційні механізми старіння елементів теплообмінників. Описано методику проведення повірочних розрахунків на статичну, циклічну та сейсмічну стійкість. Наведені результати повірочного розрахунку теплообмінника системи розхолодження басейну витримки в розрахункових станах, які відповідають нормальним умовам експлуатації (НУЕ), гідровипробуванням (ГВ) та при сейсмічних впливах в умовах максимального розрахункового землетрусу (МРЗ). Встановлена відповідність фактичних напружень в розрахункових зонах теплообмінника допустимим, зазначеним в діючій нормативній документації. Визначена величина пошкодженості елементів теплообмінника для допустимої кількості циклів навантаження.

Ключові слова: теплообмінник системи розхолодження басейну витримки (ТОР БВ), механізми старіння, зварне з'єднання, твердість, пошкоджуваність, сейсмічна стійкість.

Вступ На даний момент проектні 30-річні терміни експлуатації переважної більшості енергоблоків діючих в Україні АЕС закінчилися, або близькі до закінчення. Водночас досвід експлуатації АЕС, зокрема і в Україні, показав, що фактичний термін служби основних елементів конструкцій і обладнання суттєво вищий, ніж це припускалось раніше, а заміна елементів, які цього потребують, може бути здійснена з прийнятними витратами. Тому в більшості країн, які експлуатують атомні електростанції, продовження терміну експлуатації енергоблоків є прийнятною стратегією і здійснюється практично. Особливий інтерес зараз представляє науково-технічне обґрунтування можливості продовження термінів служби корпусу АЕС і інших систем обладнання, та обґрунтування безпечної експлуатації енергоблоків у понадпроектний період на основі оцінки технічного стану обладнання. У вирішенні цієї проблеми беруть участь багато інститутів НАН України спільно з НАЕК «Енергоатом» і безпосередньо з АЕС.

Елементи ТОР БВ піддаються поступовому дестабілізаційному впливу зовнішніх і внутрішніх факторів. Це призводить до погіршення початкових параметрів об'єктів, і в кінцевому підсумку - до відмови. Великим числом досліджень встановлено, що подовження термінів служби об'єктів при частковій заміні і ремонті обладнання стає економічно і технічно доцільним способом підвищення промислового потенціалу. Однак для обґрунтування можливості продовження терміну служби кожного конкретного об'єкта необхідно виконати ретельний аналіз факторів, що впливають на їх безпеку, працездатність і довговічність.

З огляду на мінімальні резерви потужностей в нашій країні і значні щорічні напрацювання обладнання, слід підкреслити важливість робіт по оцінці поточного технічного стану та прогнозуванню ресурсу обладнання з метою забезпечення достатньої надійності. Наближення великої кількості промислового устаткування до граничних термінів служби, неприпустимість зниження рівня безпеки екологічно небезпечних об'єктів при значному вичерпанні ресурсу обладнання - це основні причини появи і загострення проблеми оцінки технічного стану і прогнозування ресурсу обладнання промислових об'єктів.

Мета та завдання Зробити оцінку технічного стану (ОТС) теплообмінників системи розхолодження басейну витримки енергоблоку №3 ВП ЮУАЕС для обґрунтування можливості продовження терміну експлуатації даного обладнання.

Можливість перепризначення терміну служби ТОР БВ оцінюється на підставі результатів ОТС

теплообмінників, для яких виконано обстеження, а саме:

- 1) аналізу всієї накопиченої і додатково отриманої інформації про технічний стан елементів ТОР БВ протягом їх експлуатації;
- 2) результатів прогнозування технічного стану елементів ТОР БВ на період перепризначеного терміну служби [1].

ТОР БВ є складним тепломеханічним обладнанням, тому оцінка його технічного стану виконується шляхом оцінки окремих конструктивних елементів:

1. Корпусних елементів;
2. Теплопередаючої поверхні;
3. Внутрішньокорпусних пристроїв (камера розподільна, трубні дошки, дистанційуючі решітки);
4. Опорних конструкцій [2].

Матеріал і результати дослідження Теплообмінник являє собою горизонтальний, жорсткотрубний, кожухотрубчастий, протиточний двоходовий апарат по стороні трубного простору з багатократним поперечним обтіканням трубного пучка по стороні міжтрубного простору. ТОР БВ призначений для охолодження води контуру розхолодження басейну витримки.

Теплообмінник відносяться до систем важливих для безпеки і належить до 2, 3 класу безпеки згідно [3].

Попередня оцінка технічного стану ТОР БВ енергоблоку №3 ВП ЮУАЕС проведена на підставі аналізу технічної документації, встановлення параметрів і критеріїв технічного стану, аналізу відмов і пошкоджень, аналізу результатів контролю стану металу, аналізу умов експлуатації теплообмінників, визначення механізмів старіння елементів ТОР БВ. За результатами даних робіт визначено перелік критичних вузлів, зон і обсяг додаткового контролю технічного стану елементів теплообмінників.

Відповідно до [4] механічні властивості металу відповідно до вимірних значень твердості визначені за співвідношеннями, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Визначення механічних властивостей металу

Марка сталі	Тимчасовий опір R_m^T , кг/мм ²	Межа текучості $R_{p0,2}^T$, кг/мм ²
08X18H10T 12X18H10T	0,38 · HB, при 140 < HB < 340	-4,28 + 0,238 · HB + 0,00022 · HB ²

Потенційні механізми старіння елементів ТОР БВ, ефекти старіння, параметри технічного стану та методи їх контролю визначені згідно [5] та наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Потенційні механізми старіння для елементів ТОР БВ

Механізми старіння	Ефекти старіння	Параметр технічного стану	Метод контролю ефекту старіння
Термічне окрихчення	Зміна механічних властивостей	Межа міцності, межа текучості, відносне подовження, відносне звуження	Руйнівний та / або неруйнівний методи контролю механічних властивостей
Втома	Зміна механічних властивостей	Межа міцності, межа текучості, відносне подовження, відносне звуження	Руйнівний та / або неруйнівний методи контролю механічних властивостей
Втома	Розтріскування	Відсутність / наявність дефектів і їх геометричні розміри	Неруйнівний контроль стану металу
Втома	Руйнування	Значення накопиченого втомного пошкодження. Допустима кількість циклів навантаження	Розрахунки на циклічну міцність. Контроль кількості циклів навантаження
Корозійне розтріскування під напругою	Розтріскування	Відсутність / наявність дефектів і їх геометричні розміри	Неруйнівний контроль стану металу

Допустимі напруження, призначаються різними для окремих категорій і груп категорій напружень. Відповідно до [4] номінальне допустиме напруження:

• для елементів обладнання і трубопроводів, навантажених внутрішнім тиском, приймається мінімальним з наступних значень:

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

де R_m^T – межа міцності матеріалу, МПа;

$R_{p0,2}^T$ – межа текучості матеріалу, МПа.

$n_m = 2,6$, $n_{0,2} = 1,5$; для перетинів поворотної камери $n_{0,2} = 2,0$.

• для болтів та шпильок:

$$[\sigma]_w = \frac{R_{p0,2}^T}{n_{0,2}},$$

де $n_{0,2} = 2,0$.

Величини допустимих напружень для матеріалів теплообмінника при розрахункових параметрах наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 - Допустимі напруження, МПа

Матеріал	Категорії напружень					
	$[\sigma]$	$(\sigma)_1$	$(\sigma)_2$	$(\sigma_s)_1$	$(\sigma_s)_2$	$1,7[\sigma]^{Th}$
Сталь 08X18H10T	НУЕ (T=100°C)					
	126	126	163,8	176,4	226,8	—
	НУЕ (T=70°C)					
	126,8	126,8	164,4	177,5	228,2	—
	ГВ (T=5°C)					
	132,3	—	—	—	—	224,9

В таблицях наведені наступні величини:

$(\sigma)_1$ – група категорій напружень, що визначається за складовими загальних мембранних напружень, МПа;

$(\sigma)_2$ – група категорій напружень, що визначається за сумами складових загальних або місцевих мембранних і загальних згинальних напружень, МПа;

$(\sigma_s)_1$ – група приведених напружень від механічних навантажень і сейсмічних впливів, яка визначається за складовими загальних мембранних напружень, МПа;

$(\sigma_s)_2$ – група приведених напружень від механічних навантажень і сейсмічних впливів, яка визначається за складовими мембранних і загальних згинальних напружень, МПа;

$[\sigma]^{Th}$ – номінальне допустиме напруження при температурі гідравлічних випробувань, МПа.

Основні параметри, які використовуються при проведенні повірного розрахунку міцності теплообмінника, визначені згідно [6] та наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Основні розрахункові параметри

Режими навантаження	Найменування частин посудини	Значення тиску, МПа	Значення температури, °C	Робоче середовище
Робочий стан	Корпус	1	+100	Активний дистилят
	Трубний простір	0,6	+70	Вода технічна
Гідравлічні випробування	Корпус	1,3	+5	Активний дистилят
	Міжтрубний простір	0,9	+5	Вода технічна

Повірочний розрахунок проводиться на номінальні розміри елементів, згідно [4], і для розглянутого теплообмінника включає розрахунок на статичну міцність, розрахунок на циклічну міцність і розрахунок на сейсмічні впливи. При повірочному розрахунку враховувалися всі діючі навантаження і розглядалися всі режими експлуатації.

Розрахункова модель, яка наведена на рисунку 1, включає в себе всі основні елементи теплообмінника. При побудові розрахункової моделі в розрахунковому коді APM Structure для обичайок корпусу, штуцерів, еліптичних днищ і опор використовувався кінцевий елемент «оболонка».

Фланці і трубні дошки моделювалися за допомогою об'ємних кінцевих елементів. Навантаження від приєднаних трубопроводів були передані за допомогою моментів і зусиль для кожного з розрахункових станів експлуатації обладнання.

Розрахунковий аналіз напружено-деформованого стану теплообмінників проводився із застосуванням методу скінченних елементів.

Модель має такі характеристики:

- Кількість вузлів в розрахунковій моделі: 56334;
- Кількість об'ємних елементів: 171340.

Кінематичні граничні умови задавалися у вигляді обмеження всіх переміщень і поворотів конструкції в нерухомій опорі, а також дозволу переміщень в рухомій опорі по поздовжній осі розміщення теплообмінника.

Силкові граничні умови задавалися у вигляді:

- власної ваги теплообмінника;
- маси рідини;
- внутрішнього тиску;
- навантаження з боку приєднаних трубопроводів (зусилля і момент);
- зусилля затяжки фланцевого з'єднання.

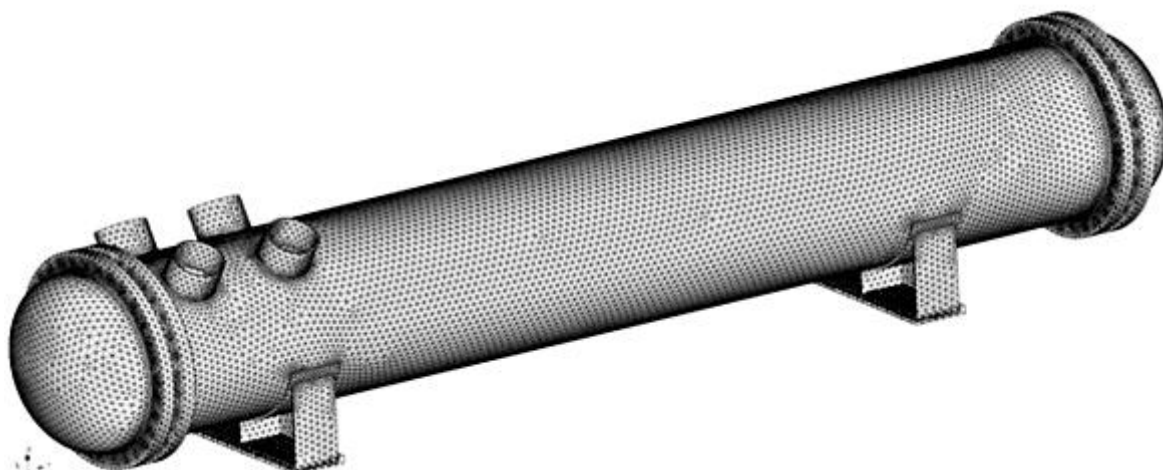


Рисунок 1 – Розрахункова модель теплообмінника

Оцінка міцності обладнання при роботі в нормальних умовах експлуатації та при гідровипробуваннях, відповідно до [4], приведена в таблиці 5.

Таблиця 5 - Напруження в елементах теплообмінника розхолодження БВ при НУЕ та ГВ, МПа.

Елемент теплообмінника	$(\sigma)_{2 \text{ НУЕ}}$	Допустиме напруження $1,3[\sigma]$	$(\sigma)_{2 \text{ ГВ}}$	Допустиме напруження $1,7[\sigma]^{\text{Th}}$
Корпус	30,86	163,8	40,98	224,9
	31,75		44,98	
	154,35		110,73	
Камера міжтрубного простору	66,93		114,04	
Патрубки	98,22		143,35	
Еліптична кришка з боку патрубків	24,56	164,4	33,98	
	66,59		85,05	
	21,53		163,8	

Елемент теплообмінника	$(\sigma)_2$ НУЕ	Допустиме напруження 1,3 $[\sigma]$	$(\sigma)_2$ ГВ	Допустиме напруження 1,7 $[\sigma]$ Th
Еліптична кришка з боку поворотної камери	41,01	164,4	79,58	
Опора корпусу	121,37		74,54	
Фланці камери трубного простору	115,69		120,06	

Процедура розрахунку на циклічну міцність відповідає рекомендаціям і формулам, зазначеним в [5] і виконана для попередньо обраних найбільш навантажених точок (за результатами статичного розрахунку). В обраних точках визначений тензор напружень від навантаження тиском і температурним перепадом і від навантаження робочими параметрами з урахуванням концентрації напружень в місцях приварювання і патрубках.

На підставі даних про прогнозовані регламентні і власні режими роботи теплообмінника сумарна накопичена пошкоджуваність а за термін 60 років становить:

$$\Sigma a = 9,1 \cdot 10^{-3} < [a] = 1,$$

де Σa - сумарна пошкоджуваність;

$[a]$ - допустиме значення пошкоджуваності.

В якості вихідної інформації при проведенні аналізу сейсмостійкості використані спектри відгуку, наведені в [7]. В якості методу дослідження сейсмічного впливу на ТОР БВ був обраний лінійно-спектральний метод. Відповідно до нього виділяються власні частоти і власні форми коливань обладнання, які потім комбінуються на основі спектрів відгуку.

Розглянутий теплообмінний апарат відноситься до I категорії сейсмостійкості, тому відповідно до [8] він повинен розраховуватися на поєднання навантажень НУЕ + МРЗ. Розрахунок на сейсмічні впливи виконувався статичним методом з урахуванням прискорення ґрунту на позначці розміщення теплообмінника.

Результати розрахунку теплообмінного апарату від сейсмічних навантажень представлені на рисунках 2-6. Наведені напруження по групі категорій напружень $(\sigma_s)_2$ від сейсмічних навантажень, і порівняння їх з допустимими, наведено нижче в таблиці 6.

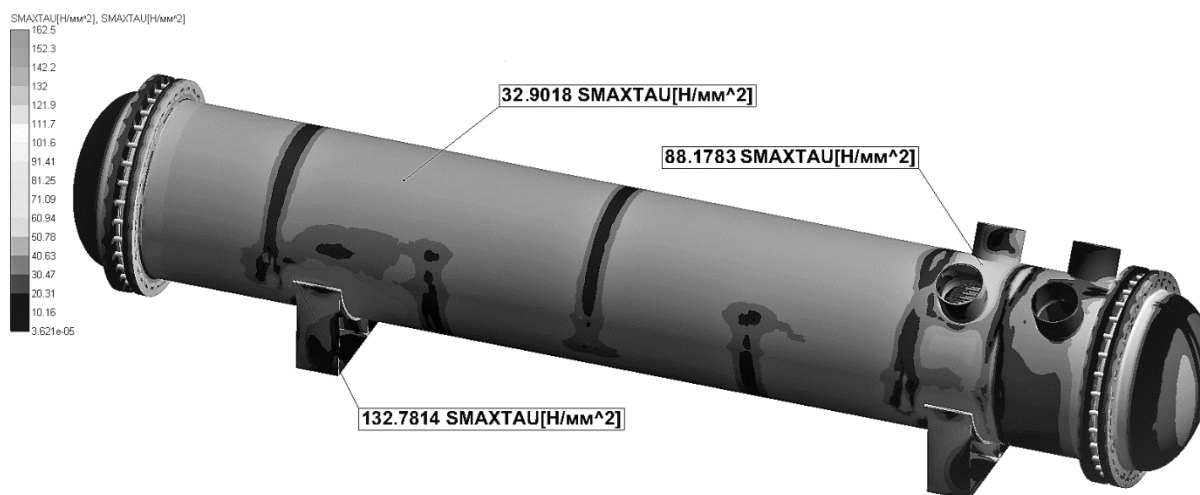


Рисунок 2 - Розподіл напружень в корпусі і опорних елементах теплообмінника при НУЕ+МРЗ

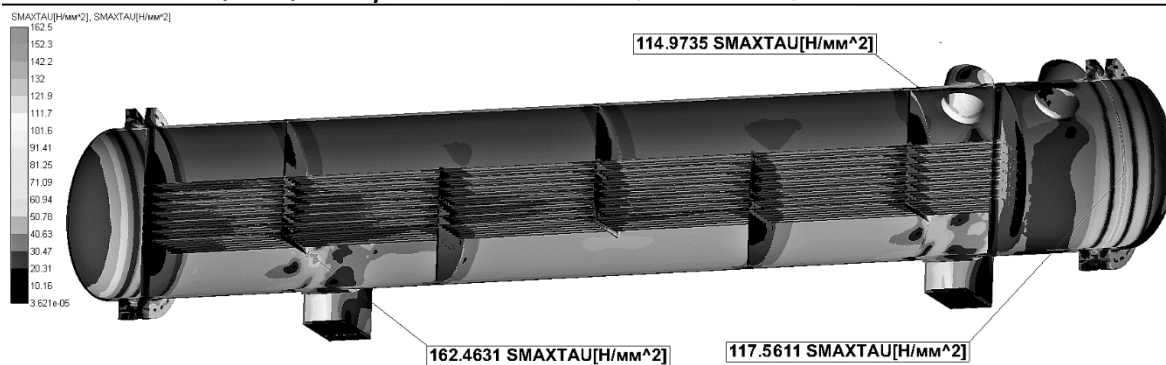


Рисунок 3 - Розподіл напружень в корпусі і опорних елементах теплообмінника (в розрізі) при НУЕ+МРЗ



Рисунок 4 - Розподіл еквівалентних напружень в еліптичній кришці №1 теплообмінника при НУЕ+МРЗ

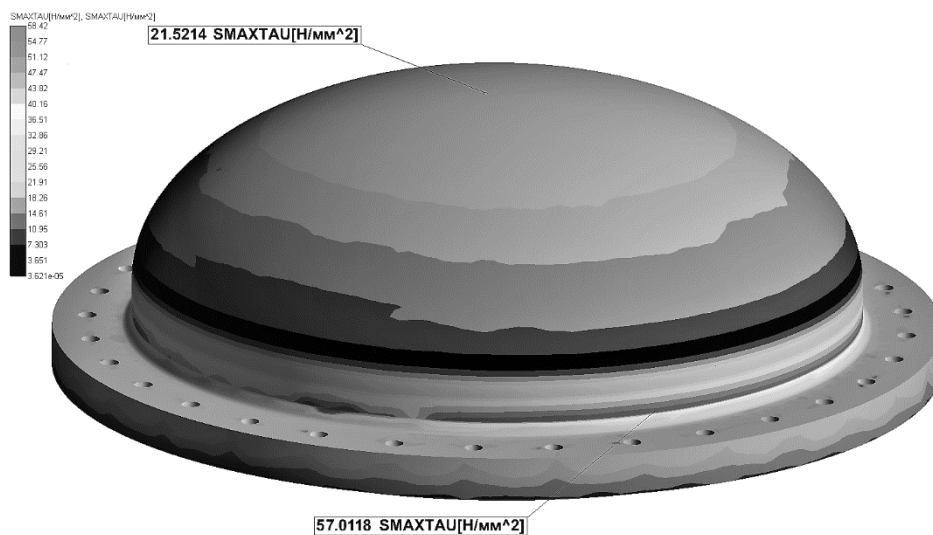


Рисунок 5 - Розподіл еквівалентних напружень в еліптичній кришці №2 теплообмінника при НУЕ+МРЗ

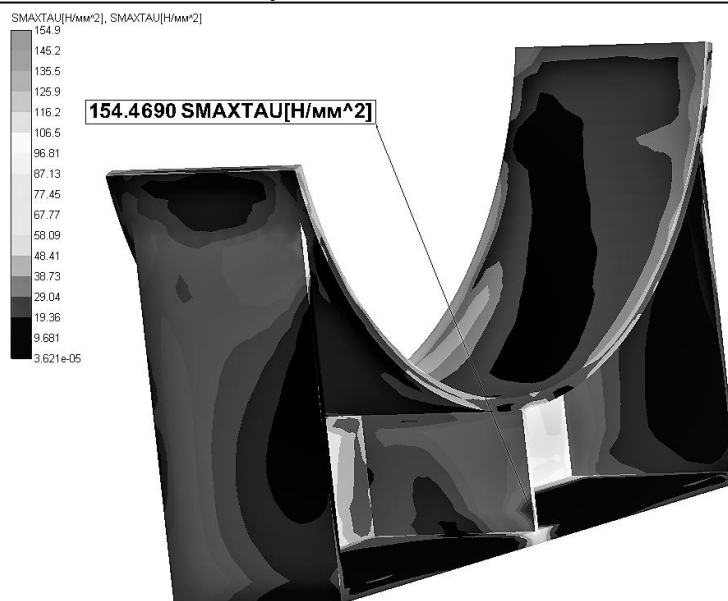


Рисунок 6 - Розподіл еквівалентних напружень в рухомій опорі теплообмінника при НУЕ+МРЗ

Таблиця 6 - Напруження в елементах теплообмінного апарату при НУЕ + МРЗ, МПа.

Елемент теплообмінника	$(\sigma_s)_2$	Допустиме напруження $1,8[\sigma]$
Корпус	32,90	226,8
	132,78	
	162,46	
Камера міжтрубного простору	88,17	228,24
Патрубки	114,97	
Еліптична кришка з боку патрубоків (Кришка №1)	24,57	226,8
Еліптична кришка з боку поворотної камери (Кришка №2)	77,34	
Опора корпусу	21,52	228,24
Фланці камери трубного простору	57,01	
	154,46	
	117,56	

При розрахунку елементів кріплення теплообмінників використані наступні залежності.
Умова міцності на розтяг:

$$\sigma_p = \frac{F}{A} = \frac{4F_z}{\pi d^2} \leq 1,4[\sigma]_w.$$

Умова міцності на зріз:

$$\tau_{zp} = \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\pi d^2} \leq 0,7[\sigma]_w.$$

Для зазначеної сталі: $[\sigma]_w = 107,5$ МПа .

Максимальні напруження, що виникають в анкерах при комбінації навантажень при НУЕ+МРЗ, і порівняння їх з допустимими значеннями наведені нижче в таблиці 7.

Таблиця 7 – Напруження в елементах кріплення теплообмінника при НУЕ + МРЗ, МПа

Номер болта	Напруження розтягу $(\sigma_s)_{mw}$	Допустиме напруження $1,4[\sigma]_w$	Напруження зрізу $(\tau_s)_s$	Допустиме напруження $0,7[\sigma]_w$
1	0,06	150,5	0,77	75,25
2	-0,15	150,5	1,65	75,25
3	0,24	150,5	23,18	75,25
4	0,58	150,5	21,09	75,25

Висновки

Попередня оцінка технічного стану показала відповідність фактичних значень встановлених параметрів технічного стану чисельним значенням і якісним показникам, що наведені в технічній, нормативній або іншій документації для відповідних параметрів технічного стану.

Аналізуючи результати додаткового контролю металу методом заміру твердості встановлено, що отримані значення механічних властивостей відповідають вимогам, зазначеним в [4].

Як видно з таблиць 5 та 6, наведені напруження по групах категорій $(\sigma)_2$ та $(\sigma_s)_2$ відповідно в розрахункових зонах конструкції не перевищують допустимі значення, отже, умови статичної та сейсмічної міцності виконуються.

Циклічна міцність елементів теплообмінника БВ з урахуванням терміну експлуатації, рівним 60 років включно, забезпечена в відповідності з вимогами [2].

Аналізуючи результати розрахунку кріплень теплообмінника до фундаменту, можна зробити висновок, що всі елементи при поєднанні навантажень НУЕ, ГВ і НУЕ + МРЗ задовольняють критеріям міцності.

Список використаної літератури

1. ПЛ-Д.0.03.126-10. Положення про порядок продовження терміну експлуатації обладнання систем, важливих для безпеки.
2. ПМ-Т.0.08.163-05. Типова програма оцінки технічного стану та перепризначення ресурсу / терміну служби посудин.
3. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій.
4. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, Высшая школа, М., 1989р.
5. ПМ-Д.0.03.222-14. Типова програма з управління старінням елементів і конструкцій енергоблоку АЕС.
6. . 08.8111.333 ИЭ. Инструкция с эксплуатации теплообменника.
7. 4. 75.107-00.03.03-10-15-ПР. Технічний звіт. Забезпечення сейсмостійкості елементів, систем і споруд, важливих для безпеки. Побудова комплексу поверхових акселерограми і спектрів відгуку для будівель і споруд енергоблоків № 3. Книга 3.
8. ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций, Высшая школа, М., 1989р.

УДК 62.621

В.И.Коньшин, канд. техн. наук, доц.,

Т.Г.Иваненко, магистрант

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ РАСХОЛАЖИВАНИЯ БАСЕЙНА ВЫДЕРЖКИ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000 С ЦЕЛЬЮ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Проведена оцінка технічного стану теплообмінника системи расхоложивания бассейна выдержки энергоблока №3 ОП ЮУАЭС. Выполнен анализ проектной, технической и эксплуатационной документации в объеме предварительной оценки технического состояния. Определены потенциальные механизмы старения элементов теплообменников. Описана методика проведения поверочных расчетов на статическую, циклическую и сейсмическую устойчивость. Приведены результаты поверочного расчета теплообменника системы расхоложивания бассейна выдержки в расчетных состояниях, соответствующих нормальным условиям эксплуатации (НУЭ), гидроиспытаниям (ГИ) и при сейсмических воздействиях в условиях максимального расчетного землетрясения (МРЗ). Установлено соответствие фактических напряжений в расчетных зонах теплообменника допустимым, указанным в действующей нормативной документации. Определена величина повреждаемости элементов теплообменника для допустимого количества циклов нагрузки.

Ключевые слова: теплообменник системы расхоложивания бассейна выдержки (ТОР БВ), механизмы старения, сварное соединение, твердость, повреждаемость, сейсмическая устойчивость.

V. Konshyn, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.,
T. Ivanenko, Msc.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ASSESSMENT OF THE TECHNICAL STATE OF THE HEAT EXCHANGER OF THE COOLING SYSTEM OF THE FUEL STORAGE POOL FOR THE NUCLEAR POWER PLANT WITH THE WWER-1000 REACTOR WITH THE AIM OF OPERATION PROLONGATION

The technical condition of the heat exchanger of the cooling system of the fuel storage pool for the power unit No. 3 of the SUNPPP was assessed. The analysis of design, technical and operational documentation in the amount of preliminary assessment of technical condition was performed. Potential mechanisms of wear of heat exchanger elements were determined. The technique of carrying out verification calculations for static, cyclic and seismic stability was described. The results of the verification calculation of the heat exchanger of the cooling system of the fuel storage pool in the calculated states corresponding to normal operating conditions, hydrotests and under seismic influences in the conditions of the maximum design earthquake were presented. The correspondence of the actual stresses in the calculation zones of the heat exchanger to the permissible values, specified in the current regulatory documentation was established. The amount of damage to the heat exchanger elements was determined for the allowable number of load cycles.

Key words: heat exchanger of the cooling system of the fuel storage pool, wear of mechanisms, welded joint, hardness, damageability, seismic stability.

References

1. PL-D.0.03.126-10. Provisions on the procedure for operation prolongation of systems equipment important for safety.
2. PM-T.0.08.163-05. Typical evaluation of the technical condition and reassignment of the resource / service life of the vessels.
3. NP 306.2.141-2008. State of emergency. General provisions on the safety of nuclear power plants.
4. PNAE G-7-002-86. Regulations for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants, Vyshcha shkola, Moscow, 1989.
5. PM-D.0.03.222-14. Typical wear control program for elements and structures of the NPP power unit.
6. 08.8111.333 IE. Instruction on the operation of the heat exchanger.
7. 4. 75.107-00.03.03-10-15-PR. Technical report. Provision of seismic resistance of elements, systems and structures important for safety. Construction of a complex of surface accelerograms and response spectra for buildings and structures of power units No. 3. Book 3.
8. PNAE G-5-006-87. Design standards for seismic resistant nuclear power plants, Vyshcha shkola, Moscow, 1989.

Надійшла 26.02.2018
Received 26.02.2018