

Т. В. Пирогов, В. В. Інюшев, В. О. Куров, А. С. Колядюк

ДП «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування»,  
просп. Героїв Сталінграда, 64/56, Київ, 04213, Україна

## Аналіз проектних розрахунків на міцність теплообмінника аварійного розхолодження на відповідність до вимог чинних нормативних документів в атомній енергетиці

### Ключові слова:

теплообмінник аварійного розхолодження, продовження строку експлуатації, розрахункове обґрунтування безпечної експлуатації, оцінка технічного стану.

Розглянуто та проаналізовано технічний документ 61409 РР1 «Теплообмінник аварійного расхоложивания. Расчет на прочность» на відповідність до вимог чинних нормативних документів України в атомній енергетиці як основний проектний та заводський документ, що регламентує безпечну експлуатацію теплообмінника під час його роботи в таких режимах, як нормальні умови експлуатації, гідравлічні випробування та сейсмічні навантаження під час нормальних умов експлуатації. Наведено приклади неврахування в технічному документі 61409 РР1 під час розрахунку міцності вимог чинних нормативних документів. Зокрема, встановлено перевищення значень допустимих напружень у шпильках фланцевих з'єднань. Визначено необхідність проведення додаткового розрахунку міцності теплообмінника аварійного розхолодження 08.8111.335 СБ із використанням методу скінченних елементів і дотриманням вимог чинних нормативних документів.

### Вступ

Одним із ключових завдань ДП «Національна атомна енергогенеруюча компанія "Енергоатом"» у рамках імплементації положень «Енергетичної стратегії України до 2035 року» [10], є продовження строку експлуатації (ПСЕ) діючих АЕС України. У рамках цього напрямку ПСЕ АЕС проводиться широкий спектр робіт, зокрема оцінка технічного стану (ОТС) обладнання. Основною метою робіт з ОТС є підтвердження безпечної експлуатації елементів реакторної установки (РУ) в понадпроектний період, які регламентуються документами [1, 5]. У рамках ОТС, зокрема, виконуються й роботи з аналізу міцності та надійності [1] відповідно до вимог сучасних норм та правил в атомній енергетиці.

Одним з основних елементів РУ є теплообмінник аварійного розхолодження (ТОАР) 08.8111.335 СБ.

Для підтвердження його безпечної експлуатації в понадпроектний період також проводяться роботи з ОТС.

Проведений у рамках ОТС аналіз матеріалів із розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації ТОАР, що представлені в проектно-конструкторській документації та у звітах із ПСЕ ТОАР на енергоблоках АЕС України, на предмет відповідності до вимог чинної нормативної документації та коректності прийнятих початкових та граничних умов показує, що проектні розрахунки на міцність мають типові відхилення від діючої нормативної документації, оскільки ТОАР був спроектований згідно з чинними у 70-х роках минулого століття нормами та правилами. Крім того, у проектних розрахунках на міцність враховані не всі розрахункові групи наведених напружень від механічних і температурних впливів.

© Т. В. Пирогов, В. В. Інюшев, В. О. Куров, А. С. Колядюк

### Постановка завдання

У рамках проведення ОТС ТОАР енергоблока № 4 Відокремленого підрозділу (ВП) «Запорізька АЕС» виконувалося розрахункове обґрунтування безпечної експлуатації за нормальних умов експлуатації, аварійних ситуацій та в умовах роботи під час дії впливів від сейсмічного навантаження.

ТОАР призначений для забезпечення аварійного та планового розхолодження РУ, а також для підтримання температури на вході насосів аварійного розхолодження в допустимих межах.

Теплообмінник є двокорпусним горизонтальним апаратом кожухотрубного типу. Теплоносій надходить у міжтрубний простір, а охолоджувальна технічна вода відповідальних споживачів подається в трубний пучок. Фланцеві з'єднання еліптичних днищ, «плаваючої» голівки та корпусу теплообмінника герметизуються за допомогою зварювального наплавлення на ребрах зварних вусиків.

Основним нормативним документом для оцінювання міцності посудин під тиском і теплообмінного обладнання є ПНАЕ Г-7-002-86 [3], положення якого трактують вимоги до проведення розрахунків та вибору допустимих значень за різними розрахунковими групами наведених напружень.

Одним з основних проаналізованих технічних документів, що розглядалися в рамках ОТС ТОАР 08.8111.335 СБ, був «61409 РР1 Теплообмінник аварійного расхоложивания. Расчет на прочность» [2]. Цей розрахунок міцності був виконаний у 1982 р., а тому в ньому не враховані окремі положення та вимоги чинної нормативної документації, що використовується для обґрунтування безпечної експлуатації обладнання АЕС України сьогодні. У зв'язку з цим було вирішено детально проаналізувати, наскільки проектні розрахунки міцності ТОАР відповідають вимогам чинних нормативних документів України.

Технічний документ 61409 РР1 [2] містить такі основні розділи:

1. Вихідні дані.
2. Конструкційний розрахунок.
3. Перевірочний розрахунок.

### Аналіз розділу «Вихідні дані»

У розділі «Вихідні дані» зазначено відомості щодо конструкційних даних елементів теплообмінника, механічні характеристики матеріалів, з яких він виготовлений, а також відомості щодо режимів роботи теплообмінника та граничних умов, що використовуються для розрахунків міцності патрубків та корпусних елементів теплообмінника.

Механічні характеристики матеріалів елементів теплообмінника ТОАР, що використовуються в документі 61409 РР1 [2], прийняті відповідно до [6]. Порівняння значень механічних характеристик елементів теплообмінника, наведених у документі 61409 РР1 [2] та в нормах ПНАЕ ГГ-7-002-86 [3], представлено в табл. 1.

Як видно з табл. 1, значення механічних характеристик елементів теплообмінника, зазначені в чинних нормах ПНАЕ Г-7-002-86 [3], децю нижчі, ніж значення механічних характеристик, наведених у документі 61409 РР1 [2]. Слід зазначити, що норми ПНАЕ Г-7-002-86 [3] не містять значень механічних характеристик для температури 70 °С — ці значення були отримані авторами за допомогою апроксимації.

Для проведення проектного перевірконого розрахунку міцності були обрані граничні умови роботи елементів теплообмінника як у стаціонарних, так і в нестационарних режимах роботи. Обрані режими роботи теплообмінника та їхні параметри наведено в табл. 2.

Водночас детальний аналіз режимів роботи РУ енергоблока № 4 ВП «Запорізька АЕС», в яких задіяний

Таблиця 1. Порівняння механічних характеристик матеріалів теплообмінника ТОАР 08.8111.335 СБ

Найменування складових ТОАР	Матеріал	Температура, °С	Проектний розрахунок міцності 61409 РР1		Норми ПНАЕ Г-7-002-86	
			Межа міцності, МПа	Межа пластичності, МПа	Межа міцності, МПа	Межа пластичності, МПа
Елементи теплообмінника	08X18H10T	20	490	215	490	196
		70	470	209	470	192
		150	441	196	437	186
Шпильки, болти	ХН35ВТ	20	735	392	735	392
		150	706	387	676	362

Таблиця 2. Параметри режимів роботи ТООР 08.8111.335 СБ

Режим роботи	Температура теплоносія, °С (міжтрубне середовище)		Температура технічної води, °С (трубне середовище)		Тиск, МПа	
	$T_{вх}$	$T_{вих}$	$T_{вх}$	$T_{вих}$	Теплоносій	Технічна вода
Стаціонарні режими роботи теплообмінника						
Початковий стан*	–	–	–	–	–	–
Стаціонарний режим (НЕ)	150	58	2	49	2,1	0,5
Розрахунковий режим	150	150	70	70	2,1	0,5
Гідравлічні випробування по міжтрубному середовищу	5–40	5–40	5–40	5–40	2,9	0
Гідравлічні випробування по трубному середовищу	5–40	5–40	5–40	5–40	0	0,8
Нестаціонарні режими роботи теплообмінника						
Режим порушення нормальних умов експлуатації (ПНЕ)**	2>150	2>58	150>2	150>49	2,1>0>2,1	0,5

\* Цей режим роботи теплообмінника характеризується навантаженнями з боку власної ваги обладнання і від приєднаних трубопроводів та зусиллями від затягу шпильок фланцевих з'єднань.

\*\* Для цього режиму роботи теплообмінника розглядається зміна параметрів (тиск, температура) теплоносія та технічної води в часі.

ТООР 08.8111.335 СБ, дає змогу більш точно встановити параметри теплоносія та технічної води, що протікають у міжтрубному та трубному середовищах теплообмінника. Ці відомості використані в подальшому розрахунковому обґрунтуванні безпечної експлуатації ТООР енергоблока № 4 ВП «Рівненська АЕС» та представлені в табл. 3.

Слід зауважити, що в цілому значення параметрів теплоносія та технічної води, представлені в документі 61409 РР1 [2], узгоджуються з даними, наведеними в табл. 3.

### Аналіз розділу «Конструкційний розрахунок»

У розділі «Конструкційний розрахунок» розглядається вибір допустимих напружень в елементах теплообмінника, визначення значень тиску для проведення гідравлічних випробувань, а також наводиться розрахунок основних елементів теплообмінника.

Номінальні допустимі напруження для елементів теплообмінника приймаються за заданої розрахункової температури як менші з таких співвідношень:

$$[\sigma_n] = \min \left\{ R_m^T / n_m ; R_{p0,2}^T / n_{0,2} ; R_{mt}^T / n_{mt} \right\}, \quad (1)$$

де  $n_m = 2,6$ ;  $n_{0,2} = 1,5$ ;  $n_{mt} = 1,5$ ;  $R_m^T$  — мінімальне значення тимчасового опору за розрахункової температури;  $R_{p0,2}^T$  — мінімальне значення межі плинності за розрахункової температури;  $n_m$  — коефіцієнт запасу міцності за тимчасовим опором;  $n_{0,2}$  — коефіцієнт запасу міцності за межею плинності.

Номінальні допустимі напруження в болтах та шпильках, отримані від тиску та сили затягу, визначаються як

$$[\sigma_n]_w = R_{p0,2}^T / n_{0,2}, \quad (2)$$

де  $n_{0,2} = 2$ .

Наведені вище співвідношення узгоджуються з вимогами ПНАЕ Г-7-002-86 [3], а тому ці значення допустимих напружень доцільно використовувати для різних режимів роботи теплообмінника надалі.

У документі 61409 РР1 [2] зазначено, що значення тиску за гідравлічних випробувань  $P_r$  отримані з використанням формули

$$P_r = 1,25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma_n]^{nr}}{[\sigma_n]}, \quad (3)$$

де  $[\sigma_n]^{nr}$  — номінально допустимі напруження, отримані для режиму роботи теплообмінника «гідравлічні випробування»;  $P_p$  — значення розрахункового тиску.

Таблиця 3. Уточнені режими роботи ТОАР 08.8111.335 СБ та їхні параметри

Режим роботи	Температура теплоносія, °С (міжтрубне середовище)		Температура технічної води, °С (трубне середовище)		Тиск, МПа	
	$T_{вх}$	$T_{вих}$	$T_{вх}$	$T_{вих}$	Теплоносій	Технічна вода
Стационарні режими роботи теплообмінника						
Початковий стан*	–	–	–	–	–	–
Режим планового розхолодження РУ	150	45,8	40	47,1	2,1	0,5
	150	14,7	5	14,1	2,1	0,5
	60	41,8	40	41,2	2,1	0,5
	60	11,4	5	8,2	2,1	0,5
	150	68,5	40	60,6	2,1	0,5
	150	47,0	5	31,0	2,1	0,5
	60	46,2	40	43,5	2,1	0,5
Аварійний режим (теча першого контуру)	60	24,0	5	14,0	2,1	0,5
	150	90	40	70,5	2,1	0,5
	150	74,5	5	43,1	2,1	0,5
	60	49,9	40	45,1	2,1	0,5
Розрахунковий режим	60	33,8	5	18,1	2,1	0,5
Гідравлічні випробування по міжтрубному середовищу	150	150	70	70	2,1	0,5
Гідравлічні випробування по трубному середовищу	20	20	20	20	2,9	0
Гідравлічні випробування по трубному середовищу	20	20	20	20	0	0,8
Нестационарні режими роботи теплообмінника						
Режим порушення умов нормальної експлуатації ПНЕ-1 (припинення подачі теплоносія)*	150→5→150	150→5→150	5	70→5→70	2,1→0→2,1	0,5
Режим порушення умов нормальної експлуатації ПНЕ-2 (припинення подачі технічної води)**	150	14,7→150→14,7	5→150→5	5→150→5	2,1	0,5→0→0,5

\* Цей режим роботи теплообмінника характеризується навантаженнями з боку власної ваги обладнання, навантажень від приєднаних трубопроводів та зусиллями від затягу шпильок фланцевих з'єднань.

\*\* Для цього режиму роботи теплообмінника розглядається зміна параметрів (тиск, температура) теплоносія та технічної води в часі.

Такий підхід узгоджується з вимогами п. 5.2 норм ПНАЕ Г-7-008-89 [9], а тому може вважатися прийнятним, а значення параметрів для гідравлічних випробувань, отримані за допомогою наведеної вище формули, можуть використовуватися надалі.

У результаті визначення тиску для проведення гідравлічних випробувань отримано такі значення:

для трубного середовища  $P_r = 2,9$  МПа, для міжтрубного середовища  $P_r = 0,8$  МПа.

У підрозділі «Розрахунок основних елементів теплообмінника» визначені значення товщин стінок та інших конструкційних характеристик його елементів, які узгоджуються з вимогами розділу 4 норм ПНАЕ Г-7-002-86 [3], а тому можуть вважатися прийнятними.

Для виконання розрахунку з вибору основних розмірів необхідно керуватися положеннями норм ПНАЕ Г-7-008-89 [9] та ПНАЕ Г-7-002-86 [3]. Ці норми є чинними для АЕС України та встановлюють такі вимоги:

під час виконання «розрахунку з вибору основних елементів» розрахунковими навантаженнями є розрахункове значення тиску та сила затягу болтів і шпильок; для фланців, нажимних кілець та елементів їхнього кріплення враховуються значення тиску гідравлічних випробувань;

під час визначення розрахункової товщини стінки враховується сумарна прибавка, що враховує корозійний вплив робочого середовища на матеріал елементів теплообмінника в експлуатаційних умовах. Додатково враховується значення допуску на товщину стінки та заводське потоншення напівфабрикату під час виготовлення.

Документ 61409 РР1 [2] враховує вищезазначені вимоги, що є прийнятним. З огляду на це можна стверджувати, що розрахунки, представлені в підрозділі «Розрахунок основних елементів теплообмінника», відповідають вимогам норм ПНАЕ Г-7-008-89 [9] та ПНАЕ Г-7-002-86 [3].

Окрім визначення товщини стінок та інших конструктивних характеристик елементів теплообмінника, у пунктах підрозділу «Розрахунок основних елементів теплообмінника» наведено розрахунки напружень в елементах теплообмінника та порівняння їх із допустимими. Виконання цих розрахунків узгоджується з положеннями п. 5.1.1 норм ПНАЕ Г-7-002-86 [3].

Однак ці розрахунки враховують і визначають тільки загальні мембранні напруження.

Так, наприклад, під час визначення значення розтягу в шпильках фланцевого з'єднання «плаваючої голівки» у документі 61409 РР1 [2] наведено співвідношення

$$\sigma = \frac{Q_{unn}^{\max}}{z \cdot f_{unn}} = \frac{654460}{28 \cdot 900} = 26 \text{ кгс/мм}^2 \cong \cong [\sigma_n]' = 1,3 \cdot 19,75 = 25,7 \text{ кгс/мм}^2, \quad (4)$$

де  $Q_{unn}^{\max}$  — зусилля на шпильках у робочих умовах, отримане відповідно до п. 6.3 розділу 7 [6];  $f_{unn}$  — площа мінімального поперечного перерізу шпильки;  $z$  — кількість шпильок.

Оскільки отримане значення напружень розтягу шпильок фланцевого з'єднання «плаваючої голівки» від механічних навантажень перевищує допустимі значення для цієї категорії напружень та порівнюється з допустимим значенням для напружень розтягу від

механічних і температурних навантажень, можна зробити висновок, що умови міцності для шпильок фланцевого з'єднання «плаваючої голівки» не виконуються.

Зважаючи на це, а також відповідно до п. 3.9 Додатку 5 до норм ПНАЕ Г-7-002-86 [3], рекомендується провести додатковий розрахунок міцності шпильок фланцевих з'єднань ТОАР, що повинен враховувати «напруження кручення» та «напруження вигину». Для цих категорій напружень мають виконуватися умови неперевикнення їхніх допустимих значень, отриманих відповідно до положень норм [3].

### Аналіз розділу «Перевірочний розрахунок»

У розділі визначаються значення допустимих напружень в елементах теплообмінника для різних режимів його роботи та наводяться розрахунки статичної, циклічної та сейсмічної міцності.

Значення допустимих напружень в елементах корпусу теплообмінника, властиві для різних умов експлуатації, наведено в табл. 4.

Вищенаведені розрахункові групи приведених напружень для елементів корпусу теплообмінника в цілому відповідають вимогам розділу 5 норм ПНАЕ Г-7-002-86 [3]. Однак значення допустимих напружень для груп  $\sigma_{r1}$  та  $\sigma_{r2}$  у нормах ПНАЕ Г-7-002-86 [3] визначаються за формулою

$$\sigma_{r1} \text{ та } \sigma_{r2} = (2,5 - R_{p0,2}^T / R_m^T) R_{p0,2}^T, \quad (5)$$

але не більше ніж  $2R_{p0,2}^T$ .

У результаті порівняння значень допустимих напружень  $\sigma_{r1}$  та  $\sigma_{r2}$ , отриманих за допомогою формул, наведених у документі 61409 РР1 [2] та нормах ПНАЕ Г-7-002-86 [3], встановлено, що значення, отримані в документі 61409 РР1, нижчі, що є більш консервативним, а тому задовольняють вимоги ПНАЕ Г-7-002-86 [3].

Додатково в документі 61409 РР1 [2] зазначено, що допустиме значення для групи наведених напружень  $\sigma_2$  для режиму роботи теплообмінника «Гідравлічні випробування» отримується як  $\sigma_2 = 1,5[\sigma_n]$ . У той же час у нормах ПНАЕ Г-7-002-86 [3] зазначено, що для цієї групи наведених напружень та цього режиму роботи обладнання слід встановлювати значення за співвідношенням  $\sigma_2 = 1,7[\sigma_n]$ . У такому випадку значення, отримані в документі 61409 РР1 [2], задовольняють вимоги ПНАЕ Г-7-002-86 [3].

У результаті вищенаведеного аналізу можна зробити висновок, що співвідношення для отримання значень допустимих напружень за різними розрахунковими групами, що наведені в документі 61409 РР1 [2],

Таблиця 4. Допустимі напруження в елементах корпусу теплообмінника

Розрахункові режими	Розрахункові групи приведених напружень					
	$\sigma_m$	$\sigma_2$	$\sigma_{r1}$	$\sigma_{r2}$	$(\sigma_a)_1$	$(\sigma_a)_2$
Нормальні умови експлуатації	$[\sigma_n]$	1,3 $[\sigma_n]$	2,5 $[\sigma_n]$	2,5 $[\sigma_n]$	$[\sigma_a]$	$[\sigma_a]$
Порушення нормальних умов експлуатації (ПНЕ), проектний землетрус (ПЗ) + умови нормальної експлуатації (НЕ)	1,2 $[\sigma_n]$	1,6 $[\sigma_n]$	–	–	$[\sigma_a]$	$[\sigma_a]$
Максимальний розрахунковий землетрус (МРЗ) + умови нормальної експлуатації (НЕ)	1,4 $[\sigma_n]$	1,8 $[\sigma_n]$	–	–	–	–
Гідравлічні випробування (ГВ)	1,35 $[\sigma_n]$	1,5 $[\sigma_n]$	–	–	–	–

Примітка.  $[\sigma_n]$  — номінальне допустиме напруження, розраховане за формулою (1);  $[\sigma_a]$  — допустима амплітуда напружень;  $\sigma_m$  — загальні мембранні напруження;  $\sigma_2$  — загальні або місцеві мембранні та загальні згинальні напруження;  $\sigma_{r1}$  — розмах загальних або місцевих мембранних, загальних і місцевих згинальних, температурних напружень;  $\sigma_{r2}$  — розмах загальних або місцевих мембранних напружень компенсації (мембранних, згинальних та кручення), загальних і місцевих згинальних та загальних температурних напружень;  $(\sigma_a)_1$  — амплітуда загальних або місцевих мембранних, загальних і місцевих згинальних, загальних і місцевих температурних і місцевих напружень у зонах їхніх концентрацій;  $(\sigma_a)_2$  — амплітуда загальних або місцевих мембранних напружень, напружень компенсації (мембранних, згинальних та кручення), загальних і місцевих згинальних, загальних і місцевих температурних напружень і напружень у зонах їхніх концентрацій.

задовольняють вимоги ПНАЕ Г-7-002-86 [3]. Водночас у документі 61409 РР1 [2] не вказано, яким чином отримано значення допустимих напружень для шпильок та матеріалу зварювального наплавлення. Також не наведено значення допустимих напружень для цих елементів.

У документі 61409 РР1 [2] наведено статичний та циклічний розрахунки корпусу теплообмінника та його патрубків. Розрахунки виконано для трьох режимів роботи теплообмінника: «гідравлічні випробування по стороні міжтрубного середовища», «гідравлічні випробування по стороні трубного середовища» та «нормальні умови експлуатації».

У розрахунках прийнято, що напружено-деформований стан корпусу теплообмінника є віссиметричним, параметри навантаження усереднені по окружній координаті. Найвність у корпусі теплообмінника довгої (біля 5 метрів) циліндричної ділянки дає змогу розбити розрахункову схему на дві: схема № 1 містить вхідну та вихідну камери міжтрубного середовища, трубну дошку, трубний пучок та частину корпусу до довгої ділянки, схема № 2 — останню частину корпусу. Додатково врахована схема № 3 — розрахункова схема «плаваючої голівки».

У результаті проведених розрахунків статичної міцності отримано значення напружень для всіх розглянутих розрахункових груп, властивих для різних режимів роботи теплообмінника, та ви-

конано їх порівняння з допустимими значеннями. У результаті проведеного розрахунку циклічної міцності елементів корпусу теплообмінника для допустимої кількості циклів навантаження для режиму НЕ  $[N] = 600$  та даного  $N = 120$ ; допустимої кількості циклів ГВ  $[N] = 1700$  та даного  $N = 20$  отримано пошкоджуваність  $a = 0,0318$ .

У пункті 3.5 «Розрахунок на сейсмостійкість» документа 61409 РР1 [2] вказано, що розрахунок проводився за спектральною теорією відповідно до «Норм розрахунку на міцність обладнання і трубопроводів атомних електростанцій із водо-водяними реакторами від сейсмічного впливу». Такий підхід є прийнятним, оскільки відповідає вимогам п. 5.11.2.9 норм ПНАЕ Г-7-002-86 [3].

Для проведення розрахунку були прийняті такі вимоги щодо сейсмостійкості — нижчі власні частоти теплообмінника в разі розрахунку без урахування приєднаних мас та рідин трубопроводів і закріпленні його на абсолютно жорсткій основі повинні бути не нижче 40 Гц. За рахунок мас та податливості трубопроводів і реальних опор нижчі частоти можуть знижуватися до 20 Гц. Водночас власні частоти теплообмінника не потрапляють в область резонансних частот у разі сейсмічного впливу (тобто в область максимальних прискорень спектрів відповідей).

Як зазначено в документі 61409 РР1 [2], детальний аналіз спектрів відповідей показує, що за першої ча-

стоти власних коливань теплообмінника, яка більша 20 Гц, горизонтальні прискорення не перевищують 2,2 g, а вертикальні — 1,0 g, де  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .

Подальші розрахунки проводили для опорних елементів теплообмінника та болтів кріплення опор до фундаменту, оскільки додаткові розрахунки показують, що додаткові напруження від сейсмічних впливів в елементах конструкцій теплообмінників (корпусів, трубних дошках, фланцевих з'єднаннях) не перевищують 5–10 % від експлуатаційних напружень.

Розрахунки проводили окремо для трьох напрямків сейсмічного впливу (двох горизонтальних та вертикального). Під час визначення максимальних напружень у конструкції було прийнято, що сейсмічний вплив виникає одночасно за всіма трьома напрямками.

У результаті проведених розрахунків на сейсмічні впливи в документі 61409 РР1 [2] вказано, що отримані значення напружень в елементах конструкції нижчі за допустимі — теплообмінник сейсмостійкий.

Водночас обсяг розглянутих комбінацій навантажень не відповідає вимогам норм НП 306.2.208-2016 [4], зокрема, відсутній аналіз міцності за комбінації навантажень ПНЕ + МРЗ, тому 61409 РР1 [2] не може використовуватися як технічний документ, що регламентує безпечну експлуатацію ТОАР під час сейсмічних впливів у роботах, пов'язаних з обґрунтуванням безпечної експлуатації обладнання діючих АЕС України.

## Висновки

У статті детально проаналізовано проектний розрахунок міцності 61409 РР1 [2] як основний проектний та заводський документ ТОАР 08.8111.335 СБ. Цей розрахунок міцності був виконаний в 1982 р., а тому в ньому не повною мірою враховані положення та вимоги чинних нормативних документів [3, 4], що використовуються для обґрунтування безпечної експлуатації обладнання АЕС України сьогодні.

За результатами аналізу технічного документа [2] можна зробити висновки:

значення механічних характеристик матеріалів, з яких виготовлений теплообмінник, відповідають вимогам нормативного документа [3];

відомості щодо режимів роботи теплообмінника та граничних умов, що використовуються для розрахунків міцності патрубків та корпусних елементів теплообмінника, узгоджуються з даними, наведеними в експлуатаційній документації ВП «Запорізька АЕС» та документах [7, 8];

вибір допустимих напружень в елементах теплообмінника та визначення значень тиску для проведення гідравлічних випробувань узгоджуються з вимогами норм [3, 9];

значення допустимих напружень в елементах теплообмінника для різних режимів його роботи є або однаковими, або не перевищуються значень допустимих напружень, наведених у нормах [3];

у документі [2] не наведено результати розрахунку статичної та циклічної міцності для елементів фланцевих з'єднань і шпильок зокрема;

розрахунки міцності теплообмінника в разі сейсмічних впливів не відповідають вимогам норм [4] у частині додаткового аналізу міцності за комбінації навантажень ПНЕ + МРЗ.

З огляду на вищезазначене, вважаємо за доцільне провести додаткові розрахунки міцності для всіх елементів теплообмінника ТОАР 08.8111.335 СБ із використанням методу скінченних елементів та врахуванням вимог чинних нормативних документів в атомній енергетиці України.

## Список використаної літератури

1. НП 306.099-2004. Загальні вимоги до продовження експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектний строк за результатами здійснення періодичної переоцінки безпеки. [Прийнятий Наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 26.11.2004 р. № 181, чинний від 15.12.2004 р.]
2. 61409 РР1. Теплообмінник аварійного расхоложивания. Расчет на прочность. Москва: ВНИИАМ, 1982.
3. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Введены с изменениями 01.07.1987 г.] / Госатомэнергонадзор СССР. — Москва: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
4. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій / Державна інспекція ядерного регулювання України. — Київ, 2016. — 37 с.
5. ПЛ-Д.0.03.126-10. Положення про порядок продовження строку експлуатації обладнання, систем, важливих для безпеки. — Київ, 2010. — 34 с.
6. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. — Москва: Металлургия, 1973. — 408 с.
7. ТУ 108.1089-82. Теплообменник аварийного расхоложивания. Технические условия. — 1986.

8. 08.8111.335 ИЭ. Теплообменник аварийного расхолаживания. Инструкция по эксплуатации.
9. ПНАЕ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — Госатомнадзор, 1990.
10. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р]. — 66 с.

**Т. В. Пирогов, В. В. Инюшев, В. А. Куров,  
А. С. Колядюк**

*ГП «Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования»,  
просп. Героев Сталинграда, 64/56, Киев, 04213, Украина*

#### **Анализ проектных расчетов прочности теплообменника аварийного охлаждения на соответствие требованиям действующих нормативных документов в атомной энергетике**

Рассмотрен и проанализирован проектный расчет прочности 61409 PP1 теплообменника аварийного охлаждения 08.8111.335 СБ на соответствие требованиям действующих нормативных документов в атомной энергетике Украины как основной проектный и заводской документ, раскрывающий вопросы безопасной эксплуатации теплообменника во время его работы в таких режимах как: нормальные условия эксплуатации, гидравлические испытания и сейсмические нагрузки во время нормальных условий эксплуатации. Приведены примеры неучёта в проектом расчете прочности требований действующих нормативных документов, в частности установлено превышение значений допустимых напряжений в шпильках фланцевых соединений. Определена необходимость проведения дополнительного расчета прочности теплообменника аварийного расхолаживания 08.8111.335 СБ с использованием метода конечных элементов и соблюдением требований действующих нормативных документов.

*Ключевые слова:* теплообменник аварийного расхолаживания, продление срока эксплуатации, расчетное обоснование безопасной эксплуатации, оценка технического состояния.

**T. V. Pyrohov, V. V. Inyushev, V. O. Kurov,  
A. S. Koliadiuk**

*SE “State Scientific Engineering Center for Control System and Emergency Response”, 64/56, Heroiv Stalinhrada ave, Kyiv, 04213, Ukraine*

#### **Analysis of the Design Calculations of the Emergency Cooling Heat Exchanger Strength for Compliance with Requirements of Existing Regulatory Documents in Nuclear Power Engineering**

The design strength of 61409 RR1 emergency cooling of the heat exchanger 08.8111.335 SB, as the main design and factory document governing the safe operation of the heat exchanger during its operation in such modes as normal operating conditions, hydraulic tests and seismic loads under time of normal operating conditions is considered and analyzed in the article. The purpose of the work is to analyze the document 61409 RR1 for compliance with current standards of Ukraine in nuclear energy.

It is shown that the design strength calculation 61409 RR1 doesn't comply with the requirements of current regulatory documents.

The document does not present the results of the calculation of static and cyclic strength for the elements of flange joints and studs in particular. However, the results of the calculations of the studs, given in the section “Structural calculation” demonstrate the excess of the allowable values of stresses in the group of membrane stresses.

Since 2016, a new normative document NP 306.2.208-2016 has been in force in Ukraine, which replaced the norms of PNAE G-5-006-87. The new normative document states that one of the combinations of loads, when considering seismic effects, is violation of normal operating conditions and maximum considered earthquake. Therefore, document 61409 PP1 can not be used as a technical document regulating the safe operation of the emergency cooling heat exchanger 08.8111.335 SB during seismic impacts in works related to the justification of safe operation of equipment of existing NPPs of Ukraine.

Based on the above, it is recommended to perform additional calculations on the strength of the emergency heat exchanger 08.8111.335 SB, which will also take into account the calculations of the elements of flange connections, as well as a combination of violations of normal loads and the maximum predicted earthquake, and generally meet current regulations of Ukraine in nuclear energy.



*Keywords:* emergency cooling heat exchanger, lifetime extension, calculational substantiation of safe operation, stiffness characteristics, technical condition assessment.

### References

1. NP 306.099-2004. *General requirements for the extension of the NPP unit's operation beyond the design lifetime based on the results of periodic safety review*. Kyiv: State Committee for Nuclear Regulation of Ukraine, 2004, 16 p. (in Ukr.)
2. 61409 PPI. *Emergency cooling heat exchanger. Strength calculation*. Moscow: VNIIAM, 1973.
3. PNAE G-7-002-86. *Standards for strength calculation of equipment and pipelines of nuclear power plants* [introduced with changes on 07/01/1987]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 525 p. (in Russ.)
4. NP 306.2.208-2016. *Requirements for seismic-resistant design and seismic safety assessment of nuclear power plant units*. Kyiv: State Committee for Nuclear Regulation of Ukraine, 2016, 37 p. (in Ukr.)
5. PL-D.0.03.126-10. *Regulation of the procedure for extending the life of equipment of systems important to safety*. Kyiv: NNEGC "Energoatom", 2010, 34 p. (in Russ.)
6. *Standards for strength analysis of reactors elements, steam generators, vessels and pipelines of nuclear power plants, experimental and research nuclear reactors and installations*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 408 p. (in Russ.)
7. TU 108.1089-82. *Emergency cooling heat exchanger. Specifications*. 1986. (in Russ.)
8. 088111.335 IE. *Emergency cooling heat exchanger*. Instruction manual. (in Russ.)
9. PNAE G-7-008-89. *Rules for Arrangement and Safe Operation of Equipment and Piping of Nuclear Power Installations*. Gosatomnadzor, 1990. (in Russ.)
10. *Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness"*. Approved by the Order of the Cabinet of Ministers dated 18.08.2017 no. 605-p, 66 p. (in Ukr.)

Надійшла 12.05.2020

Received 12.05.2020