

# Аналіз впливу моменту затягу шпильок фланцевих з'єднань теплообмінника аварійного розхолодження на його міцність

- **Корольов Олександр Вікторович**, д-р техн. наук., професор  
Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7898-8659>
- **Інюшев Владислав Валерійович**, канд. техн. наук  
Державне підприємство «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1040-950X>
- **Пирогов Тимофій Валерійович**  
Державне підприємство «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0877-1251>
- **Посох Валерій Олегович**  
Державне підприємство «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6911-7237>
- **Колядюк Андрій Сергійович**  
Державне підприємство «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2946-272X>

Під час робіт з оцінки статичної міцності елементів фланцевих з'єднань теплообмінника аварійного розхолодження 08.8111.335 СБ (ТОАР), встановлено, що для елементів фланцевих з'єднань Дн2130 та Дн2080 існує перевищення допустимих значень напружень. Ці розрахунки статичної міцності, виконані за допомогою методу скінчених елементів, проводилися з урахуванням проєктних значень затягу шпильок фланцевих з'єднань, що дорівнюють 22527 кгс та 8836 кгс відповідно.

Невиконання умов міцності елементами фланцевого з'єднання пояснюється тим, що за ефекту «випинання» днища і обичайки під дією тиску, рівнодія докладених векторів зусиль змінюється. Це, зі свого боку, призводить до деформацій елементів фланцевих з'єднань.

У статті описано підхід щодо визначення оптимального зусилля затягу шпильок фланцевих з'єднань Дн2130 та Дн2080 для дотримання умов безпечної експлуатації ТОАР. Цей підхід полягає у виконанні ітераційних розрахунків міцності елементів фланцевого з'єднання, основним змінним параметром яких є значення затягу шпильок. Отримані результати розрахунків міцності аналізуються з метою встановлення значення затягу шпильок, за якого будуть виконуватись умови міцності та герметичності елементами фланцевого з'єднання. Як приклад застосування вищезазначеного підходу детально розглянуто фланцеве з'єднання Дн2080.

Так, у результаті аналізу проведених ітераційних розрахунків встановлено, що оптимальне значення затягу, за якого дотримуються умови міцності й щільності фланцевого з'єднання Дн2080 та мінімізу-

ються деформації, досягається значенням затягу, рівним 6800 кгс (що відповідає моменту на ключі – 65 кг · м).

Аналогічно, для фланцевого з'єднання Дн2130 рекомендується понизити затяг шпильок до значення 14600 кгс (що відповідає моменту на ключі – 145 кг · м).

Ключові слова: елементи фланцевих з'єднань, оцінка технічного стану, продовження строку експлуатації, розрахункове обґрунтування безпечної експлуатації, теплообмінник аварійного розхолодження.

© Корольов О. В., Інюшев В. В., Пирогов Т. В., Посох В. О., Колядюк А. С., 2020

## Вступ

Під час оцінки технічного стану ТОАР, що входить до складу системи TQ енергоблока № 4 ВП ЗАЕС, проводився аналіз статичної міцності його елементів із використанням проєктного значення затягу шпильок фланцевих з'єднань, результати якого наведені в роботі [1]. Цей аналіз показав, що в шпильках та «зварювальних вусах» фланцевих з'єднань Дн2130 та Дн2080 є перевищення допустимих значень напружень.

З метою дотримання умов безпечної експлуатації ТОАР авторами статті був запропонований підхід щодо зниження значень напружень в елементах фланцевих з'єднань для дотримання умов міцності відповідно до норм [2] та зменшення рівня небажаних деформацій. Результати розрахунків, отримані з використанням зазначеного підходу, в складі звітних матеріалів із розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації ТОАР, пройшли державну експертизу ядерної та радіаційної безпеки [3] та погоджені Державною інспекцією ядерного регулювання України.

Як приклад застосування вищезазначеного підходу розглянемо фланцеве з'єднання Дн2080 ТОАР.

## Аналіз розрахунків статичної міцності елементів фланцевого з'єднання Дн2080 ТОАР, виконаних з використанням проєктного значення затягу шпильок

Проведення детальних розрахунків міцності обладнання з метою отримання найбільш точних значень напружень, що виникають в елементах конструкції, потребує застосування великої кількості скінченних елементів у моделі. Це може потребувати тривалого часу розрахунків та необхідності застосування електронно-обчислювальних машин із досить високими технічними характеристиками. Водночас, сучасні програмні комплекси для виконання розрахунків міцності методом скінчених елементів дозволяють використовувати симетрію граничних умов. Такий

підхід дозволяє зменшити розмірність поставленої задачі та значно скоротити час виконання розрахунків [4], [5]. Тому, для виконання розрахунків статичної міцності елементів фланцевого з'єднання Дн2080 ТОАР застосовувалась вісесиметрична постановка задачі.

Для розрахунку на статичну міцність елементів фланцевих з'єднань ТОАР були розроблені окремі скінчено-елементні моделі напівперіоду одного болтового з'єднання. Загальний вигляд моделі напівперіоду фланцевого з'єднання Дн2080, а також точки найбільш навантажених елементів фланцевого з'єднання («зварювальні вуси» під наплавку (точки 1, 2), зварювальна наплавка (точка 3) та шпилька (точка 4)) показані на Рисунку 1.

Основними граничними умовами для розрахунків міцності були: сила затягу шпильок, тиск та температура робочого середовища, визначені відповідно до [6]. Ці розрахунки міцності проводилися з використанням розрахункового коду APM Structure3D, який, відповідно до розпорядження ДП «НАЕК «Енергоатом» від 16.09.2019 № 944-р, внесений у Перелік дозволених до використання в ДП «НАЕК «Енергоатом» розрахункових кодів

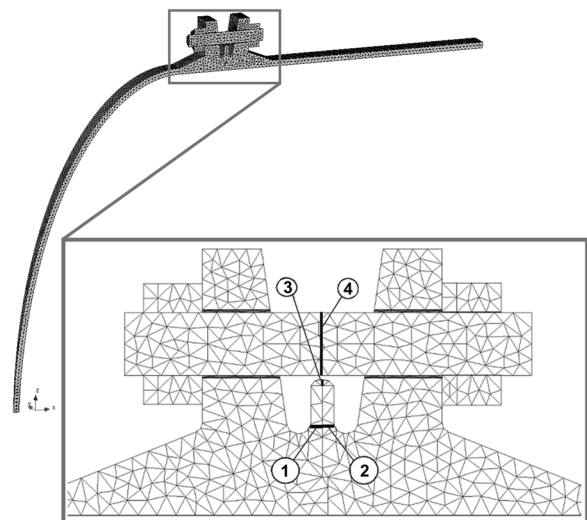


Рисунок 1 – Загальний вид моделі напівперіоду фланцевого з'єднання Дн2080

Таблиця 1 – Напруження в елементах напівперіоду фланцевого з'єднання Дн2080 за НЕ, МПа

Елемент фланцевого з'єднання	$(\sigma)_1$ або $(\sigma)_{mw}$	Допустиме напруження	$(\sigma)_2$ або $(\sigma)_{3w}$	Допустиме напруження	$(\sigma)_{RV}$ або $(\sigma)_{4w}$	Допустиме напруження
Шпилька	98,27	193,1	<b>280,24</b>	251,03	<b>339,16</b>	328,27
Зварювальна наплавка	43,60	201	44,08	261,3	127,86	522,6
Зварювальний вус (точка 1)	68,82	126,8	<b>204,98</b>	164,84	309,96	380,4
Зварювальний вус (точка 2)	67,71		<b>211,32</b>		205,23	

**Примітка.**  $(\sigma)_1$  і  $(\sigma)_{mw}$  – загальні мембранні напруження;  $(\sigma)_2$  – загальні або місцеві мембранні і загальні згинальні напруження;  $(\sigma)_{3w}$  – загальні або місцеві мембранні та загальні температурні напруження;  $(\sigma)_{RV}$  і  $(\sigma)_{4w}$  – розмах загальних або місцевих мембранних, загальних і місцевих згинальних, температурних напружень.

для обґрунтування безпеки ядерних установок [7] згідно з положеннями СТП 0.41.076-2008 [8].

Результати розрахунку еквівалентних напружень SMAXTAU у фланцевому з'єднанні Дн2080 (використовуючи проєктний зтяг шпильок, що дорівнює 8836 кгс) за нормальних умов експлуатації (НЕ) наведено в Таблиці 1. Додатково виконано порівняння отриманих напружень із їх допустимими значеннями.

На Рисунку 2 графічно зображено розподіл еквівалентних напружень SMAXTAU в елементах фланцевого з'єднання Дн2080 за НЕ.

Як видно з отриманих результатів розрахунків міцності елементів фланцевого з'єднання Дн2080, у шпильці та «зварювальних вусах» виникають перевищення допустимих значень напружень за групами категорій  $(\sigma)_2$ ,  $(\sigma)_{3w}$  та  $(\sigma)_{4w}$ .

### Аналіз впливу моменту зтягу шпильок на статичну міцність фланцевого з'єднання Дн2080 ТОАР

Для визначення умов, за яких в елементах фланцевого з'єднання Дн2080 значення напружень будуть відповідати допустимим, були проведені додаткові розрахунки міцності. В цих розрахунках значення параметрів робочого середовища (тиск та температура) були незмінними, проте значення попереднього зтягу шпильки змінювалося в проміжку від 8836 кгс до 3600 кгс.

У результаті проведених розрахунків було отримано значення напружень в елементах фланцевого з'єднання. Значення отриманих результатів розрахунків від зтягу шпильок наведено в Таблицях 2 та 3.

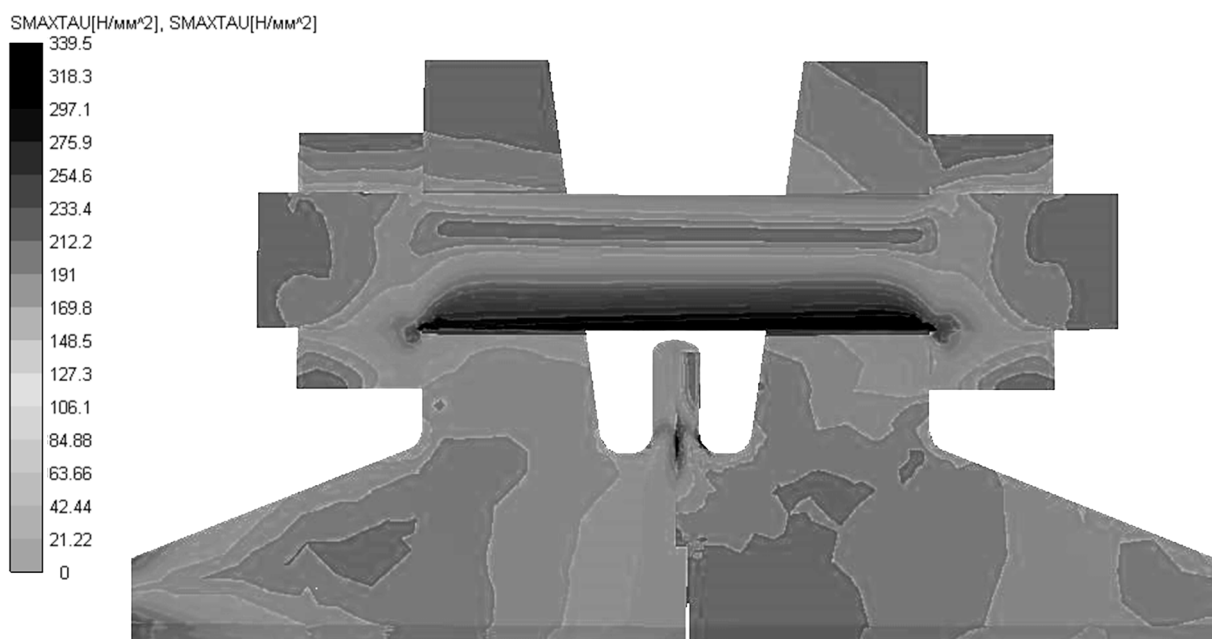


Рисунок 2 – Результати розрахунку еквівалентних напружень в елементах фланцевого з'єднання Дн2080 за НЕ

Таблиця 2 – Значення напружень в елементах фланцевого з'єднання Дн2080 за НЕ, отримані від затягу шпильок, МПа

Елемент фланцевого з'єднання	Зусилля затягу, кгс	$(\sigma)_1$ , МПа	$(\sigma)_2$ , МПа	$(\sigma)_{RV}$ , МПа
Зварювальний вус (точка 1)	8836	68,820	204,982	309,961
	7836	61,688	178,061	282,354
	7200	51,095	165,17	267,445
	6400	40,825	136,875	236,540
	5600	32,412	113,999	210,508
	5200	28,304	102,475	187,071
	4400	25,071	56,746	131,724
	3600	30,213	64,321	38,379
Зварювальний вус (точка 2)	8836	67,715	211,327	205,230
	7836	62,531	189,628	180,830
	7200	52,220	178,947	168,182
	6400	42,503	147,926	140,995
	5600	34,051	125,118	120,603
	5200	29,942	113,999	104,311
	4400	26,141	68,022	78,846
	3600	29,366	56,857	120,516
Зварювальна наплавка	8836	43,607	44,088	127,865
	7836	39,901	40,342	124,761
	7200	37,828	38,296	122,905
	6400	35,354	35,823	120,898
	5600	32,547	32,976	118,393
	5200	31,431	31,917	117,668
	4400	28,797	29,049	118,444
	3600	56,952	251,142	281,838

Таблиця 3 – Значення напружень в шпильках фланцевого з'єднання Дн2080 за НЕ, отримані від їх затягу, МПа

Елемент фланцевого з'єднання	Зусилля затягу, кгс	$(\sigma)_1$ , МПа	$(\sigma)_{3w}$ , МПа	$(\sigma)_{4w}$ , МПа
Шпилька	8836	98,275	280,249	339,169
	7836	87,153	253,155	312,466
	7200	80,080	236,165	295,366
	6400	71,183	215,285	274,604
	5600	62,285	194,099	253,474
	5200	57,836	183,556	243,565
	4400	48,939	163,969	224,327
	3600	40,0417	147,838	208,380

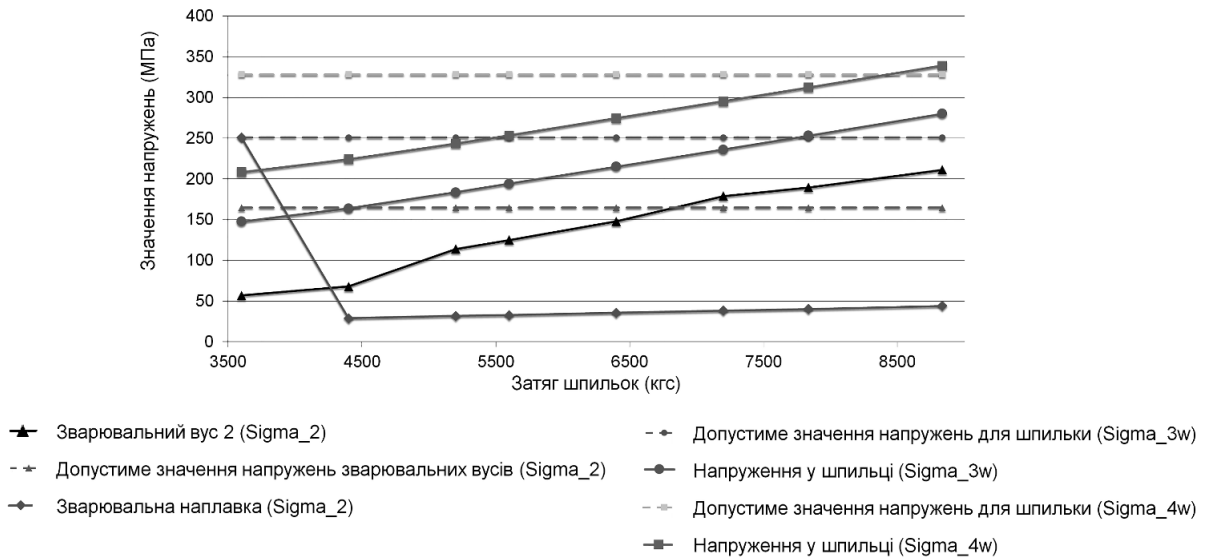


Рисунок 3 – Результати порівняння значень напружень за групами  $(\sigma)_2$ ,  $(\sigma)_{3w}$  та  $(\sigma)_{4w}$  елементів фланцевого з'єднання Дн2080, отримані в різних значеннях затягу шпильок, з їх допустимими значеннями

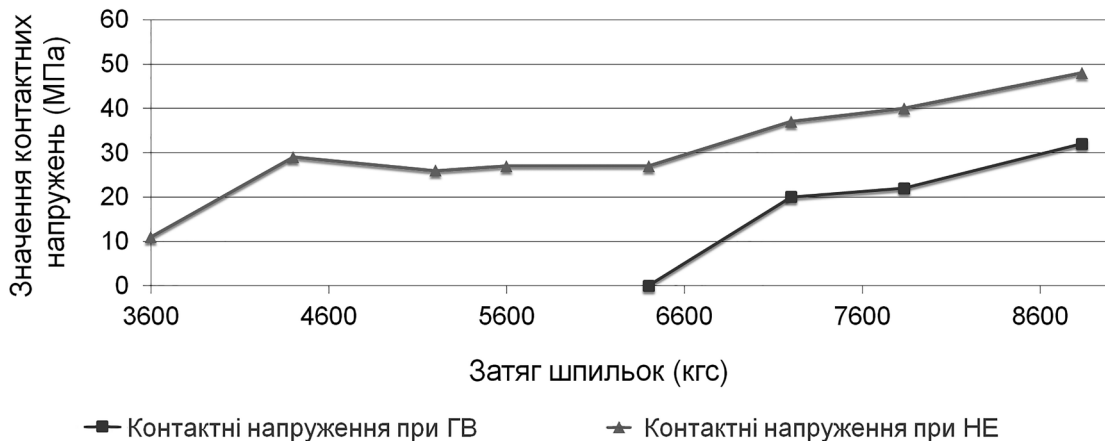


Рисунок 4 – Графіки зміни напруження між стінками «зварювальних вусиків» від затягу шпильок

На Рисунку 3 відображено зміни значень напружень за групами  $(\sigma)_2$ ,  $(\sigma)_{3w}$  та  $(\sigma)_{4w}$  отримані в різних значеннях затягу шпильок. Додатково наведено допустимі значення напружень для відповідних груп.

З отриманих результатів розрахунків можна зробити висновок, що для значення затягу шпильок від 4400 до 6800 кгс виконуються умови міцності для всіх елементів фланцевого з'єднання.

Перевищення допустимих значень напружень в елементах фланцевих з'єднань є не єдиним обмежуючим фактором для обґрунтування безпечної експлуатації ТОАР. Під час дослідження питання статичної міцності елементів фланцевих з'єднань необхідно стежити також за тим, щоб шов

зварювального наплавлення не був навантажений та сила затягу шпильок була достатньою для компенсації тиску робочого середовища.

Отже, з одного боку, для зменшення значення напружень бажано зменшити силу затягу шпильок, з іншого боку – це може призвести до втрати герметичності фланцевого з'єднання. Оптимальним вирішенням цієї проблеми є вибір такого значення затягу шпильок, який буде забезпечувати як виконання умов міцності, так і умов герметичності.

Для встановлення мінімального значення затягу шпильок фланцевого з'єднання Дн2080, за якого виконуються умови герметичності, був проведений додатковий розрахунок, результати якого зображено на Рисунку 4.

Таблиця 4 – Значення напружень в елементах фланцевого з'єднання Дн2080 за НЕ, отримане за сили затягу шпильок – 6800 кгс, МПа

Елемент фланцевого з'єднання	$(\sigma)_1$ або $(\sigma)_{mw}$	Допустиме напруження	$(\sigma)_2$ або $(\sigma)_{3w}$	Допустиме напруження	$(\sigma)_{RV}$ або $(\sigma)_{4w}$	Допустиме напруження
Шпилька	75,63	193,1	225,49	251,03	285,22	328,27
Зварювальна наплавка	36,14	201	36,56	261,3	122,09	522,6
Зварювальний вус (точка 1)	49,98	126,8	161,32	164,84	150,52	380,4
Зварювальний вус (точка 2)	48,04		151,44		248,83	

Метою цього розрахунку було отримання значення контактних напружень, які виникають між стінками «зварних вусиків», від затягу шпильок фланцевого з'єднання за НЕ ТОАР та гідравлічних випробувань. Присутність цих напружень показує наявність контакту між стінками. За значення напружень 0 МПа контакт між стінками «зварних вусиків» відсутній і можливе невиконання умов герметичності фланцевого з'єднання.

Як видно з Рисунка 4, умови герметичності фланцевого з'єднання Дн2080 виконуються, якщо значення затягу шпильок вище 6400 кгс.

Аналізуючи отримані результати оцінки міцності та герметичності фланцевого з'єднання Дн2080 рекомендується використовувати значення

зтягу шпильок, рівне 6800 кгс. За такого значення зтягу шпильок фланцевого з'єднання Дн2080 виконуються як умови герметичності, так і умови міцності для всіх груп наведених напружень. Тобто виконуються всі умови безпечної експлуатації ТОАР, відповідно до [9] та [10].

Результати розрахунку статичної міцності елементів фланцевого з'єднання Дн2080 за НЕ, отримані за сили зтягу шпильок – 6800 кгс, а також порівняння отриманих значень з допустимими, наведені в Таблиці 4.

На Рисунку 5 графічно зображено розподіл еквівалентних напружень SMAXTAU в елементах фланцевого з'єднання Дн2080 за НЕ, отримані за сили зтягу шпильок – 6800 кгс.

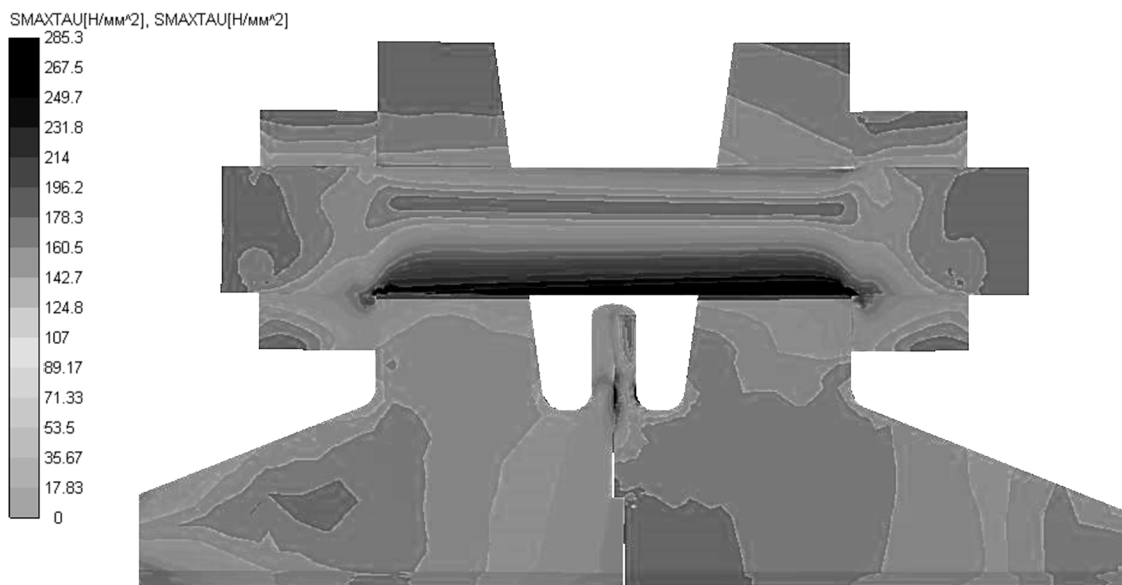


Рисунок 5 – Результати розрахунку еквівалентних напружень в елементах фланцевого з'єднання Дн2080 за НЕ, від сили зтягу шпильок 6800 кгс

## Висновки

У цій статті описано результати розрахунків міцності фланцевого з'єднання Дн2080 ТОАР, як приклад наведеного в статті підходу до зниження значень напружень в елементах фланцевих з'єднань. Спочатку розрахунки виконані з використанням проєктного значення зтягу шпильок фланцевого з'єднання, рівного 8836 кгс. Аналіз цих розрахунків показав перевищення допустимих значень напружень у шпильках та «зварювальних вусах» фланцевого з'єднання.

З метою дотримання теплообмінником умов міцності, відповідно до [2], [9] та [10], наведено підхід щодо пониження напружень в елементах фланцевих з'єднань до допустимих значень. Основою цього підходу є використання ітераційних розрахунків, які враховують різні значення зтягу шпильок фланцевих з'єднань. Водночас, одним із параметрів виконання умов безпечної експлуатації ТОАР є його герметичність. Оптимальним вирішенням вищенаведених вимог є вибір такого значення зтягу шпильок, який забезпечує як виконання умов міцності, так і умов герметичності одночасно.

У результаті аналізу проведених розрахунків встановлено, що за значення зтягу шпильок фланцевого з'єднання Дн2080, рівного 6800 кгс (що відповідає моменту на ключі – 65 кг · м), виконуються умови герметичності та умов міцності для всіх груп зазначених напружень у всіх елементах фланцевого з'єднання. Аналогічно, для фланцевого з'єднання Дн2130 рекомендується понизити зтяг шпильок до значення 14600 кгс (що відповідає моменту на ключі – 145 кг · м).

## Список використаної літератури

1. Pyrohov T. Analysis of the Static Strength of the Emergency-Cooldown Heat Exchanger with the Use of the Design Tightness Value of Flange-Joint Pins. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020. Vol. 23(3), pp. 37-45. doi: 10.15407/pmach2020.03.037.
2. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Москва «Энергоатомиздат», 1989.
3. Звіт про виконання державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки технічних звітів з розрахунків на міцність ТОАР та ТОР БВ енергоблока № 4 ВП ЗАЕС (реєстраційний № 18-09-10476).
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Перевод с английского под редакцией Б. Е. Победри. Москва: издательство «МИР», 1975. 541 с.

5. Левин М. П., Темис Ю. М. Способ учета симметрии при решении задач теории упругости методом конечных элементов. *Ученые записки ЦАГИ*. 1979, том 10, № 3. 136-139 с.

6. Комплект документации на технологический процесс. Капитальный ремонт теплообменника аварийного расхолаживания чертёж 08.8111.335.

7. Перечень разрешенных к использованию в ГП «НАЭК «Энергоатом» расчетных кодов для обоснования безопасности ядерных установок по состоянию на 01 сентября 2019 г. Додаток до розпорядження № 944-р від 16.09.2019 р. ДП «НАЕК «Енергоатом». Київ, 2019. 24 с.

8. СТП 0.41.076-2008. Анализ и оценка безопасности. Порядок использования расчетных кодов для обоснования безопасности ядерных энергетических установок. Методические указания. Київ, 2008. 20 с.

9. НП 306.2.099-2004. Загальні вимоги до продовження експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектний строк за результатами здійснення періодичної переоцінки безпеки. Затвердж. Наказом Держатомрегулювання від 26.11.2004 № 181, зареєстр. в М-ві юстиції України від 15.12.2004 за № 1587/10186.

10. ПЛ-Д.0.03.126-10. Положення про порядок продовження строку експлуатації обладнання, систем, важливих для безпеки. Київ, 2010. 34 с.

## References

1. Pyrohov, T. (2020). Analysis of the static strength of the emergency-cooldown heat exchanger with the use of the design tightness value of flange-joint pins. *Journal of Mechanical Engineering*, 23(3), 37-45. doi: 10.15407/pmach2020.03.037.
2. PNAE G-7-002-86. Strength calculation standards for equipment and pipelines of nuclear power plants with amendments of 07 January 1987. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 525.
3. Report on the state review of nuclear and radiation safety of technical reports on strength calculation of ZNPP-4 ECHE and EPCHE (registration No. 18-09-10476).
4. Zenkevich, O. (1975). Finite element method in technology. Translation from English edited by B. Pobedy. Moscow: MIR Publishing House, 541.
5. Levin, M., Temis Y. (1979). A method of accounting for symmetry in solving elasticity theory problems by the finite element method. *Scientific notes of TsAGI*. 10(3), 136-139.
6. A set of documentation for the process. Refurbishment of the emergency cooling heat exchanger drawing 08.8111.335.
7. List of settlement codes allowed for use in NNEGC «Energoatom» to justify safety of nuclear facilities as of 1 September 2019. Addendum to Energoatom order No. 944-r dated 16 September 2019, Kyiv, 24.

8. STP 0.41.076-2008. Safety analysis and assessment. Procedure for using settlement codes to justify safety of nuclear power plants. Guidelines, Kyiv: NNEGC «Energoatom», Ukraine.

9. NP 306.099-2004. General requirements for NPP long-term operation based on periodic safety review results. Kyiv: State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2004, 16.

10. PL-D.0.03.126-10. Regulation of lifetime extension procedure for equipment of systems important to safety. Kyiv: NNEGC «Energoatom», 2010, 34.

### **Influence of Tightening Torque of Emergency Cooling Heat Exchanger Flange Studs on Strength**

**Koroliiv O.<sup>1</sup>, Iniushev V.<sup>2</sup>, Pyrohov T.<sup>2</sup>, Posokh V.<sup>2</sup>, Koliadiuk A.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Odesa National Polytechnic University, Odesa, Ukraine

<sup>2</sup>State Enterprise «State Scientific Engineering Center for Control System and Emergency Response», Kyiv, Ukraine

Previous efforts on assessing static strength of the flange joint components of the emergency cooling heat exchanger 08.8111.335 SB (ECHE) performed using the finite element method (FEM) revealed that there is an excess of permissible stress values for flange joint components of heat exchanger Dn2130 and Dn2080. These static strength calculations considered the design values for tightening of flange studs.

Failure to meet the strength conditions flange joint components is due to the fact that the effect of «protrusion» under pressure of the bottom and shell attached to the flanges, as well as depending on the tightening force of the studs, the system of equilibrium applied force changes. This, in turn, leads to deformation of flange joint components.

The paper presents an approach to reducing stress in flange joint components of ECHE first used at ZNPP-4. As a result of additional iterative calculations, the boundary conditions under which the strength conditions in all flange joint components of the heat exchanger are met are determined. In addition, the compliance with tightness condition for flange connections is considered.

Thus, the analysis of the calculations established that when the tightening value of flange connection Dn2080 studs equal to 6800 kgf (corresponding to the torque on the key of 65 kg · m), the strength conditions for all groups of reduced stresses in all elements of the flange unite. In addition, at this value of stud tightening, the tightness of the flange connection Dn2080 is maintained.

Analysis of similar iterative calculations of flange connection Dn2130 shows that for this flange connection it is recommended to reduce the tightening of the flange connection studs to the value of 14600 kgf, which is equal to the torque on the key of 145 kg · m.

Keywords: emergency cooling heat exchanger, lifetime extension, design safe operation justification, technical condition assessment, flange joint connection.

Отримано 24.06.2020.