

УДК 621.039.58

М.Є. Пахалович

ТОВ «Експертно-технічний центр «ЕНЕРГОРЕСУРС», Харків

## НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНКИ МІЦНОСТІ ТРУБОПРОВІДІВ РЕАКТОРНОГО ВІДДІЛЕННЯ ПІВДЕННО-УКРАЇНСЬКОЇ АЕС ПРИ СЕЙСМІЧНІЙ ДІЇ

*У статті розглядаються питання оцінки міцності трубопроводів реакторного відділення ПУ АЕС в зв'язку з продовженням термінів експлуатації. Розглянуто питання безпеки і надійності при підвищених навантаженнях на устаткування і трубопровідні системи з урахуванням сейсмічних впливів.*

**Ключові слова:** сейсмостійкість, міцність, надійність, інтенсивність напружень, безпека експлуатації.

### Вступ

Продовження термінів експлуатації атомних станцій пов'язано з безпечною роботою енергоблоків і надійністю при зовнішніх впливах. При обґрунтуванні продовження термінів експлуатації необхідно враховувати вимоги правил ядерної та радіаційної безпеки [1, 2] під впливом сейсмічних навантажень. Оцінка технічного стану трубопроводів головного циркуляційного контуру (розрахунок напружено деформованого стану), а також міцності при дії сейсмічних навантажень є невід'ємною частиною при обґрунтуванні продовження термінів експлуатації [3].

**Метою роботи** є розрахунок напружено деформованого стану та оцінка міцності при дії сейсмічних навантажень головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ), головної запірної засувки (ГЗЗ) і трубопроводу зв'язку компенсатор об'єму (КО) з «гарячої» ниткою петлі головного циркуляційного контуру (ГЦК) реакторного цеху енергоблоку ВП «ПУ АЕС» відповідно до рекомендацій міжнародних організацій і результатів кваліфікації обладнання ПУ АЕС [4].

**Актуальність** даної роботи полягає в тому, що оцінка міцності при дії сейсмічних навантажень раніше не враховувала даних, накопичених в результаті експлуатації та проведених періодичних обстежень. Національний і міжнародний досвід, практичні дослідження, рекомендації з безпеки МАГАТЕ, уроки, витягнуті з аварії на Фукусімі і т.ін. вимагають поліпшення безпеки.

### Виклад основного матеріалу

Розрахунок на сейсмічні впливи проводять для АЕУ з сейсмічністю майданчика 5 балів і вище [5]. Дослідження сейсмічної безпеки ПУ АЕС [6] показали, що пік прискорення ґрунту збільшився майже в два рази ( $0,05g \Rightarrow 0,093g$ ) в порівнянні з початком експлуатації. Тому для усунення недоліків запропоновано збільшити запас міцності до 30%, що підтримує виконання функцій безпеки [7]. За даними рекомендаціям державним комітетом ядерного ре-

гулювання пік прискорення ґрунту було прийнято рівним  $0,093g \cdot 0,3 + 0,093g = 0,12g$ .

Вихідними даними для розрахунку є [4]:

1) вплив від землетрусів (проектний землетрус ПЗ і максимальний розрахунковий землетрус МРЗ) у вигляді акселерограм і спектрів відгуку для обладнання і трубопроводів для трьох взаємно перпендикулярних напрямків (вертикального і двох горизонтальних);

2) навантаження при режимах нормальної експлуатації (НЕ).

Для визначення сейсмічних навантажень при виконанні розрахунку використані узагальнені спектри відгуку вертикальних коливань на відмітки 0.00 реакторного відділення по трьох осях будівлі. Горизонтальне прискорення на поверхні ґрунту 0.12g (рис. 1). Коефіцієнти загасання дорівнюють:

$$\beta_1=0,01; \beta_2=0,02; \beta_3=0,05.$$

Обладнання I категорії розраховувалося на поєднання навантажень НЕ + МРЗ та НЕ + ПЗ. Обладнання II категорії розраховувалося на поєднання навантажень НЕ + ПЗ. У табл. 1 наведено поєднання навантажень і допустимих напружень.

$$\text{НЕ} + \text{МРЗ} \quad \text{та} \quad \text{НЕ} + \text{ПЗ}.$$

Розрахунковий аналіз конструкції обладнання при сейсмічних впливах проводився з використанням лінійно-спектрального методу в такому порядку:

– складено розрахункова модель конструкції обладнання і трубопроводів;

– проведена дискретизація розрахункової моделі на необхідну кількість кінцевих елементів заданого розміру і з необхідним згущенням в обраних місцях конструкції.

Обчислені матриці жорсткості і маси конструкції. Враховано кінематичні граничні умови для тих вузлових компонент, яким відповідають обмеження опор. Визначено  $n$  власних частот системи:

$$([K] - \lambda \cdot [M])\{X\} = 0. \quad (1)$$

Тут  $[K]$  – матриця жорсткості системи,  $[M]$  – матриця мас,  $\lambda$  – власне число,  $\{X\}$  – відповідний їй власний вектор.

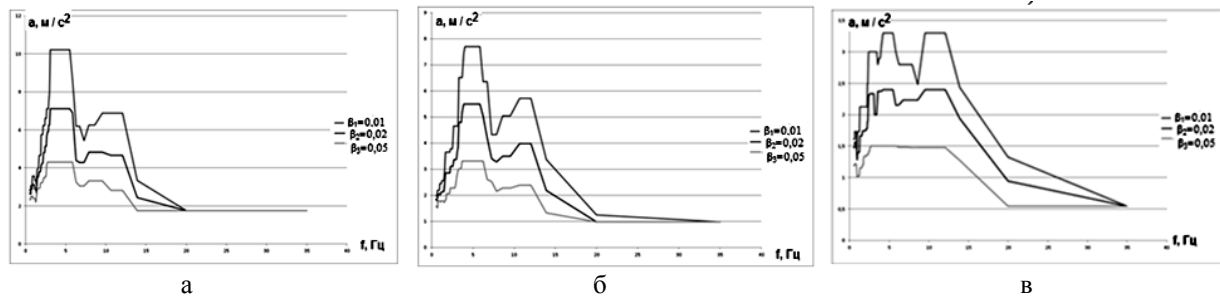


Рис. 1. Узагальнені спектри відгуку на відмітки 0.00 реакторного відділення по трьох осях будівлі: а – X, б – Y, в – Z. Горизонтальне прискорення на поверхні ґрунту 0.12g

Визначена кругова власна частота:

$$\omega_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\lambda_i} \quad (2)$$

Кількість обчислюваних власних частот  $n$  повинна бути такою, щоб  $\omega_n$  не перевищувало максимальної частоти, для якої задані спектри відгуку.

Визначено сейсмічне навантаження, що діє в напрямку  $i$ -ї узагальненої координати  $i$  відповідна  $j$ -ї формі власних коливань системи:

$$P_{ij} = m_{ii} \ddot{X}_j \varphi_j x_{ij} \quad (3)$$

де  $m_{ii}$  – маса опори, відповідна  $i$ -ї узагальненій координаті;  $X_j$  – прискорення, яке визначається по спектру відгуку для частоти  $\omega_j$  в вузлі з  $i$ -ї узагальненою координатою;  $x_{ij}$  – компонента  $j$ -го власного вектора, що відповідає узагальненій координаті;  $\varphi_j$  – постійна  $j$ -ї форми коливань (нормувальний множник):

$$\varphi_j = \frac{\sum_{i=1}^k m_{ii} x_{ij} \cos \alpha_i}{\sum m_{ii} x_{ij}^2} \quad (4)$$

тут  $\alpha_i$  – кут між напрямком сейсмічного впливу (чинного в позитивному напрямку осей  $x, y, z$  глобальної системи координат) і напрямком  $i$ -ї узагальненої координати.

Виконано статичний розрахунок обладнання з урахуванням доданих сейсмічних навантажень, визначені відповідні вузлові переміщення і внутрішні зусилля. Вузлові переміщення визначені з рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь виду:

$$[K] \cdot \{X\} = \{P\} \quad (5)$$

де  $\{P\}$  – вектор прикладених зовнішніх вузлових навантажень;  $\{X\}$  – вектор вузлових переміщень.

Таблиця 1

Сполучення навантажень і допустимі напруження для обладнання

Категорія	Сочетання на-грузок	Расчетная группа категорий напряжений	Допускаемое напряжение
I	НЭ+МРЗ	$(\sigma_s)_1$	1,4 $[\sigma]$
		$(\sigma_s)_2$	1,8 $[\sigma]$
	НЭ+ПЗ	$(\sigma_s)_1$	1,2 $[\sigma]$
		$(\sigma_s)_2$	1,6 $[\sigma]$
II	НЭ+ПЗ	$(\sigma_s)_1$	1,5 $[\sigma]$
		$(\sigma_s)_2$	1,9 $[\sigma]$

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  $i, 1 \leq n$ .

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, та сил що перерізують. Розрахунок напружено-деформованого стану при сейсмічних впливах ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК виконаний з використанням комп'ютерної програми Circle-3D [8]. Результати розрахунку напружень, що виникають в ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводі зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК при поєднанні навантажень від нормальної експлуатації та сейсмічних впливів при проектному землетрусі наведені на рис. 2, 4. На рис. 3, 5 – результати розрахунку при поєднанні навантажень від нормальної експлуатації та сейсмічних впливів при максимальному розрахунковому землетрусі.

Результати розрахунку, які представлені на рис. 2 – 5, показують, що отримані значення перших від однієї до п'яти власних частот ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК потрапляють в діапазон значень, для яких розраховані спектри відповідей.

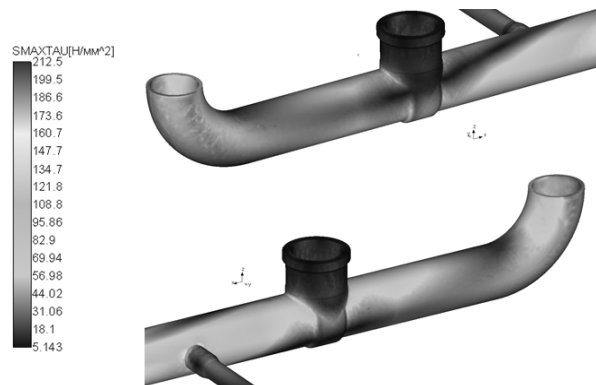


Рис. 2. Розподіл наведених напруг  $\sigma_{13}$  в «гарячій» нитці ГЦТ (режим НЭ + ПЗ, навантаження – внутрішній тиск)

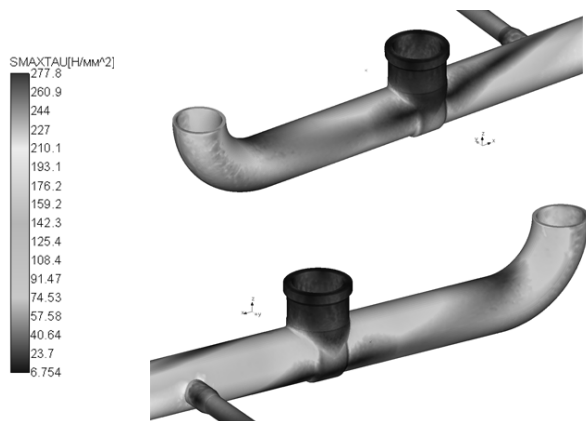


Рис. 3. Розподіл наведених напруг  $\sigma_{13}$  в «гарячій» нитці ГЦТ (режим НЕ + МРЗ, навантаження - внутрішній тиск, вага і температура)

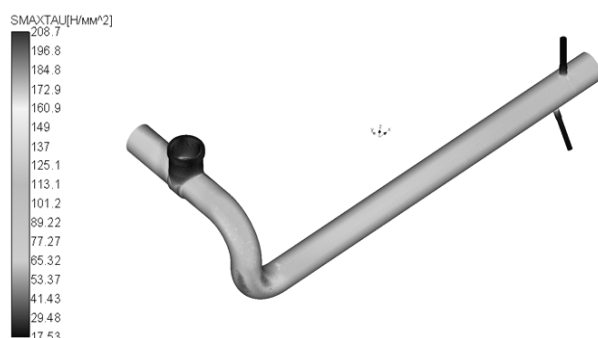


Рис. 4. Розподіл наведених напруг  $\sigma_{13}$  в ГЦТ («холодна» нитка, від ГЦН до КР; режим НЕ + МРЗ, навантаження – внутрішній тиск)

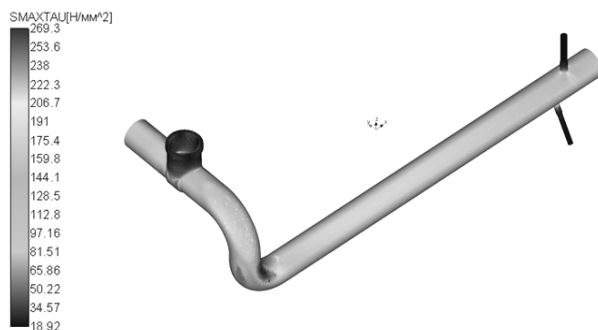


Рис. 5. Розподіл наведених напруг  $\sigma_{13}$  в ГЦТ («холодна» нитка, від ГЦН до КР; режим НЕ + МРЗ, навантаження – внутрішній тиск, вага і температура)

## НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ РЕАКТОРНОГО ОТДЕЛЕНИЯ ЮЖНО-УКРАИНСКОЙ АЭС ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Н.Е. Пахалович

В статье рассматриваются вопросы оценки прочности трубопроводов реакторного отделения ЮУ АЭС в связи с продлением сроков эксплуатации. Рассмотрены вопросы безопасности и надежности при повышенных нагрузках на оборудование и трубопроводные системы с учетом сейсмических воздействий.

**Ключевые слова:** сейсмостойкость, прочность, надежность, интенсивность напряжений, безопасность эксплуатации.

## REGULATORY PROVISION ESTIMATION OF THE RESISTANCE OF PIPELINE OF REACTOR DEPARTMENT SOUTH-UKRAINIAN NPP AT SEISMIC IMPACTS

N.E. Pahalovic

The article deals with the evaluation of the strength of pipeline reactor compartment SUNPP in connection with the extension of the service life. The questions of safety and reliability at high loads on equipment and piping systems, taking into account seismic effects.

**Keywords:** seismic stability, resistance, reliability, stress intensity, operational safety.

## Висновки

Найбільші наведені напруги, що виникають в перерізах ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК при сейсмічній дії НЕ + ПЗ і НЕ + МРЗ не перевищують допустимі. Міцність головного циркуляційного трубопроводу і трубопроводу зв'язку компенсатора об'єму з «гарячої» ниткою петлі №4 головного циркуляційного контура при сейсмічних впливах нормальної експлуатації та максимального розрахункового землетрусу забезпечена, що відповідає вимогам органів регулювання України.

## Список літератури

1. НП 306.2.099-2004. Общие требования к продолжению эксплуатации энергоблоков АЭС в сверхпроектный срок по результатам осуществления периодической переоценки безопасности [Текст].
2. НП 306.2.106-2005 Требования к проведению модификаций ядерных установок и порядку оценки их безопасности [Текст].
3. Кіпоренко Г.С. Удосконалення нормативного забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем атомних електростанцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Кіпоренко Г.С. – Х., 2010. – 20 с.
4. Shugailo O-i. Strengthening the Capabilities of State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine through Interaction of Ukrainian and International Technical Safety Organizations in the Framework of Licensing of Long Term Operation of South-Ukrainian NPP Unit 1 / O-i Shugailo, O-r Shugailo, D. Ryzhov // Ядерна та радіаційна безпека. – 2015. – 2(66). – С. 27-30
5. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Текст].
6. Пахалович М.С. Класифікаційні ознаки нормативного забезпечення з продовження ресурсу тепломеханічного обладнання атомних станцій [Текст] / М.С. Пахалович, С.О. Кучер та інші. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 1(8). – С. 21-28.
7. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Specific Safety Guide. No. SSG-9, IAEA, Vienna, 2010.
8. Комп'ютерна програма «Расчетный комплекс CIRCLE 3D» / Левуцький Ю.П., Кучер С.О., Пахалович М.С. – Авт. свідоцтво на твор №50314, 19.07.2013.

Надійшла до редакції 24.05.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.П. Тарасюк, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.