

# Вплив зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків атомних станцій на їх сейсмічну міцність

## ■ Шугайло Олександр Петрович

Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1044-0299>

## ■ Білик Сергій Іванович, д-р техн. наук, проф.

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8783-5892>

Регламентована нормативними вимогами номенклатура сполучень технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання, трубопроводів атомних станцій та сейсмічних впливів є досить широкою і містить всі можливі випадки технологічних умов їх експлуатації. Під час виконання оцінки сейсмостійкості опорних конструкцій постає питання щодо можливості обґрунтованої оптимізації встановленої нормативними вимогами номенклатури сполучень навантажень. Така оптимізація може бути виконана на підставі дослідження впливу зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків атомних станцій на їх сейсмічну міцність.

У статті визначено номенклатуру параметрів технологічних умов експлуатації опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків атомних станцій, що впливають на їх сейсмічну міцність. Досліджено вплив зміни цих параметрів на сейсмічну міцність опорних конструкцій.

Стаття входить до циклу публікацій в журналі «Ядерна та радіаційна безпека», присвячених розгляду різних аспектів практичного використання нормативних вимог до оцінки сейсмостійкості елементів енергоблоків атомних станцій.

Ключові слова: сталеві опорні конструкції, обладнання і трубопроводи, сейсмічна міцність, сполучення навантажень.

© Шугайло О-р П., Білик С. І., 2022

## Вступ

НП 306.2.208-2016 [1] містить вимоги до сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів, які мають бути враховані під час оцінки сейсмостійкості різноманітних елементів енергоблока атомної станції (АС).

У таблиці 1 наведені вимоги НП 306.2.208-2016 [1] до сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів для тепломеханічного облад-

нання, трубопроводів та їх опорних конструкцій енергоблока АС.

Питання щодо аспектів практичної застосовності вимог НП 306.2.208-2016 [1] до сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів під час оцінки сейсмічної міцності безпосередньо обладнання та трубопроводів енергоблока АС детально розглянуті в циклі публікацій [2], [3] та [4]. Водночас, у [3] окреслено вказаний аспект також для опорних конструкцій окремого обладнання.

Таблиця 1 – Сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів для тепломеханічного обладнання, трубопроводів та їх опорних конструкцій енергоблока АС

Категорія сейсмістійкості	Сполучення навантажень згідно з НП 306.2.208-2016 [1]
I	HE + MP3
	ПНЕ + MP3
	HE* + ПА + MP3**
	HE + ПА + ПЗ
	HE + ПЗ
II	ПНЕ + ПЗ
	ПНЕ + ПЗ

Прийняті в таблиці позначення:

HE – нормальна експлуатація;

ПНЕ – порушення нормальної експлуатації;

ПА – проектна аварія;

ПЗ – проектний землетрус;

MP3 – максимальний розрахунковий землетрус.

\* – у сполученнях навантажень HE + ПА + MP3 та HE + ПА + ПЗ під навантаженнями HE йдеться про постійні навантаження (наприклад, від власної ваги);

\*\* – сполучення HE + ПА + MP3 застосовується для обладнання, трубопроводів та їх опорних конструкцій, що забезпечують локалізуючу функцію безпеки герметичного огороження.

Нині зупинимось на ґрунтовному дослідженні та аналізі практичного використання вимог НП 306.2.208-2016 [1] до сполучень технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання, трубопроводів енергоблока АС та сейсмічних впливів. Для виготовлення цих конструкцій загалом використовують балки двотаврові, швелери, кутики, профілі гнуті замкнені зварні квадратні та прямокутні для будівельних конструкцій (з прикладами опорних конструкцій елементів енергоблока АС можна ознайомитися в [3], [5]).

Відомості таблиці 1 демонструють, що, загалом, номенклатура сполучень навантажень є досить широкою та охоплює всі можливі випадки технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АС. Під час виконання оцінки сейсмістійкості цих опорних конструкцій, зазвичай, постає питання щодо можливості обґрунтованої оптимізації встановленої НП 306.2.208-2016 [1] номенклатури сполучень навантажень. Водночас зауважимо, що питання оптимізації номенклатури сполучень навантажень може розглядатися стосовно всіх сполучень, за винятком HE + MP3 для елементів I категорії сейсмістійкості та HE + ПЗ для елементів

II категорії сейсмістійкості. Ці сполучення є основними та обов'язковими під час оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС відповідних категорій сейсмістійкості. Згадана оптимізація може бути виконана на підставі дослідження зміни параметрів у режимах ПНЕ та ПА (відносно параметрів під час HE), які впливають на сейсмічну міцність опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС.

#### Метою статті є:

визначення номенклатури параметрів технологічних умов експлуатації опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС, що впливають на їх сейсмічну міцність;

дослідження впливу зміни технологічних умов експлуатації опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС на їх сейсмічну міцність.

#### Визначення номенклатури параметрів технологічних умов експлуатації опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС, що впливають на їх сейсмічну міцність

Опорні конструкції обладнання та трубопроводів енергоблока АС розташовані в різних будівлях та спорудах, зокрема: реакторне відділення, турбінне відділення, резервна дизельна електростанція тощо. Наразі, зупинимось на розгляді опорних конструкцій, які розташовані в герметичній частині реакторного відділення енергоблока з ВВЕР-1000. Внутрішні параметри середовища герметичного об'єму є зовнішніми параметрами навколишнього середовища для опорних конструкцій. У таблиці 2 згідно з [6] наведено параметри середовища в приміщеннях системи герметичного огороження за різних режимів роботи енергоблока АС з реакторною установкою ВВЕР-1000.

Аналіз параметрів внутрішнього середовища в системі герметичного огороження реакторного відділення в різних режимах продемонстрував, що найбільш несприятливі значення параметрів виникають у режимі «великої» течі – «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850». Отже, цей режим є показовим з погляду впливу параметрів навколишнього середовища на опорні конструкції обладнання та трубопроводів АС. Згідно з [7] під час максимальної проектно-аварійної «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850» починаючи приблизно з 100-ої секунди аварії:

тиск плавно стабілізується та у 1800-у секунду перехідного процесу складає приблизно 2,3 кгс/см<sup>2</sup>;  
температура плавно стабілізується від 120 °С до 100 °С на 1800-ій секунді перехідного процесу.

Таблиця 2 – Параметри середовища в приміщеннях системи герметичного огороження за різних режимів роботи енергоблока АС з реакторною установкою ВВЕР-1000

№ з/п	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення параметрів у режимах			
			Режим нормальної експлуатації	Режим порушення тепловідводу з герметичної частини	Режим «малої» течі	Режим «великої» течі
1	Температура	°С	15 – 60	30 – 75	до 90	до 150
2	Абсолютний тиск	МПа	0,083 – 0,101	0,069 – 0,118	до 0,167	до 0,49
3	Відносна вологість	%	до 90	до 100	парогазова суміш	парогазова суміш
4	Об'ємна активність	Бк/м <sup>3</sup>	до 7,4×10 <sup>7</sup>	до 7,4×10 <sup>7</sup>	до 5,55×10 <sup>9</sup>	до 4,68×10 <sup>13</sup>
5	Потужність поглиненої дози	Гр/годину	до 1	до 1	до 1	до 10 <sup>3</sup>
6	Тривалість існування режиму	година	–	до 15	до 5	до 10
7	Частота виникнення режиму	–	–	1 раз на рік	1 раз на 2 роки	1 раз за строк служби
8	Післяаварійна температура	°С	–	–	20 – 60	20 – 60
9	Післяаварійний абсолютний тиск	МПа	–	–	0,049–0,118	0,049–0,118
10	Тривалість існування післяаварійних параметрів	доба	–	–	до 30	до 30

У статті [5] визначено, що оцінка сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АС має виконуватися на підставі специфічних вимог, регламентованих нормами, правилами та стандартами з ядерної та радіаційної безпеки, а також з урахуванням положень ДБН В 2.6-198:2014 [8], ДБН В.1.1-12:2014 [9], ДБН В.1.2-2:2006 [10], ДБН В.1.2-14:2018 [11]. Відповідно до ДБН В 2.6-198:2014 [8] співвідношення для оцінки міцності (зокрема сейсмічної) сталевих конструкцій мають, зокрема такі вигляди:

– при центральному розтягу (стиску):

$$\frac{N \cdot \gamma_n}{A_n \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

де N – значення поздовжньої сили, що спричиняє розтяг (стиск);

$\gamma_n$  – коефіцієнт відповідальності конструкції;

$A_n$  – площа перерізу нетто;

$R_y$  – розрахунковий опір сталі розтягу, стиску за границею плинності;

$\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи конструкції;  
– під час дії поперечної сили Q, що спрямована паралельно серединній площині стінки:

$$\frac{Q \cdot S_x \cdot \gamma_n}{I_x \cdot t_w \cdot R_s \cdot \gamma_c} \leq 1, \quad (2)$$

де  $S_x$  – статичний момент зсувної частини перерізу брунто;

$I_x$  – момент інерції перерізу брунто відносно головних осей інерції x-x;

$t_w$  – товщина стінки;

$R_s$  – розрахунковий опір сталі зсуву;

– під час дії згинальних моментів  $M_x, M_y$ :

$$\frac{M_x \cdot \gamma_n}{I_{xn} \cdot R_y \cdot \gamma_c} y \pm \frac{M_y \cdot \gamma_n}{I_{yn} \cdot R_y \cdot \gamma_c} x \leq 1, \quad (3)$$

де  $I_{xn}, I_{yn}$  – моменти інерції перерізу нетто відносно головних осей x-x, y-y відповідно;

x, y – відстані від головних осей до точки перерізу, яка розглядається.

Як видно з співвідношень (1)–(3) до їх складу входять:

механічні властивості матеріалів;  
навантажувальні фактори;  
геометричні характеристики перерізів;  
коефіцієнти відповідальності та умов роботи конструкції;

відстані до точок перерізів, які розглядаються.

За результатами аналізу номенклатури параметрів середовища в приміщеннях системи герметичного огороження під час різних режимів роботи енергоблока АС з реакторною установкою ВВЕР-1000, наведених у Таблиці 2, а також складових співвідношень (1) – (3), можна зробити висновок, що з урахуванням прийнятої на АС України експлуатаційної практики (а саме: антикорозійний захист опорних елементів лакофарбовим покриттям на період експлуатації, періодичне проведення технічного опосвідчення конструкцій обладнання та трубопроводів тощо) з усіх параметрів, наведених у таблиці 2, на сейсмічну міцність опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АС впливає лише температура навколишнього середовища в режимах НЕ, ПНЕ та ПА.

Під час виконання скінченно-елементних розрахунків опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС, наприклад, програмним засобом «ANSYS», користувачем задаються також значення модуля пружності (E), густини ( $\rho$ ) та, за необхідності, коефіцієнта лінійного розширення ( $\alpha$ ) матеріалу для розрахункової температури.

Отже, підвищення температури середовища в приміщеннях системи герметичного огороження в режимах ПНЕ та ПА буде впливати на розрахункові значення фізико-механічних властивостей матеріалу опорних конструкцій, а саме: границя плинності, границя пропорційності, модуль пружності, густина, коефіцієнт лінійного розширення.

До технологічних умов експлуатації опорних конструкцій належать також навантаження на них безпосередньо від обладнання та трубопроводів енергоблока АС. Під час ПНЕ та ПА відбувається зміна параметрів внутрішнього середовища (наприклад: тиску, агрегатного стану) в обладнанні та трубопроводах енергоблока АС, які встановлені на відповідні опорні конструкції. Ця зміна призводить до того, що навантаження на опорні конструкції від обладнання та трубопроводів енергоблока АС під час ПНЕ та ПА також можуть змінюватися відносно рівня навантажень під час НЕ. Водночас, залежно від розташування трубопроводів та обладнання в різних системах енергоблока АС, навантаження від них на опорні конструкції під час ПНЕ та ПА можуть як збільшуватися, так і зменшуватися, внаслідок зміни параметрів внутрішнього середовища обладнання та трубопроводів.

Отже, за результатами виконаного

аналізу визначено номенклатуру параметрів технологічних умов експлуатації опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АС, що впливають на їх сейсмічну міцність.

#### **Дослідження впливу зміни технологічних умов експлуатації опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС на їх сейсмічну міцність**

Механічні характеристики будівельних сталей суттєво залежать від товщини прокату, а саме: у разі зменшення товщини в маловуглецевих сталях усіх трьох ступенів розкислення, а також зі збільшенням ступеня стиску, зниженням температури в кінці прокатування та підвищенням швидкості охолодження подрібнюються зерна фериту. Це суттєво підвищує, зокрема, границю плинності. Вказана особливість враховується ДБН В 2.6-198:2014 [8], у якому розрахункові характеристики сталей наведені залежно від типу та товщини прокату [12].

Відповідно до ДБН В.1.2-14:2018 [11] у розрахункових ситуаціях, в яких властивості матеріалів конструкцій можуть змінюватися у часі або якщо зміни цих властивостей можуть спричинитися умовами навколишнього середовища (наприклад, у разі впливу нагрівання на міцнісні характеристики сталі) розрахункове значення повинно встановлюватися з урахуванням таких змін. Водночас, в ДБН В 2.6-198:2014 [8] відсутні характеристики сталей залежно від температури.

Вище було встановлено, що в режимах ПНЕ та ПА відбувається підвищення температури навколишнього середовища опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС, яке впливає на значення фізико-механічних характеристик сталі. Отже, необхідно дослідити зміну відповідних фізико-механічних властивостей сталі у разі підвищення температури до значень, які відповідають ПНЕ та ПА.

Аналіз та узагальнення низки існуючих проєктів опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС (наприклад, [13], [14]) продемонстрував, що широко вживаним матеріалом для їх виготовлення є вуглецева сталь марки СтЗсп5. Ця сталь дозволена також для виготовлення обладнання [15] та елементів локалізуючих систем безпеки енергоблока АС [16].

У таблиці 3 на підставі даних ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016 [17] наведено значення коефіцієнтів зниження для діаграми «напруження-деформація» вуглецевої сталі за підвищеної температури.

Як видно з таблиці 3 підвищення температури середовища в приміщеннях системи герметичного огороження в режимах ПНЕ та ПА не призводить

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів зниження для діаграми «напруження-деформація» вуглецевої сталі за підвищеної температури

Температура, °С	Коефіцієнт зниження для розрахункової границі плинності	Коефіцієнт зниження для границі пропорційності	Коефіцієнт зниження для нахилу лінійної пружної ділянки
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
150	1,000*	0,904*	0,950*

\* – значення розраховано з використанням лінійної інтерполяції.

до зниження границі плинності матеріалу, але певною мірою знижує значення границі пропорційності та кут нахилу лінійної пружної ділянки діаграми «напруження-деформація». Це свідчить, що під час оцінки міцності опорних конструкцій у пружній постановці підвищення температури в режимах ПНЕ та ПА не призводить до суттєвого впливу на їх несучу здатність. Особливістю цього випадку є те, що під час оцінки міцності з урахуванням ПА та сейсмічних впливів відбувається врахування одночасно двох епізодичних впливів в аварійному сполученні навантажень. Для цього випадку відповідно до ДБН В.1.2-14:2018 [11] розглядається лише перша група граничних станів, тобто втрата несучої здатності.

Водночас, у разі виконання уточнених пружно-пластичних розрахунків сейсмічної міцності опорних конструкцій ситуація буде іншою, а саме:

1) значення границі пропорційності в режимі ПА зменшується на  $\approx 10\%$  (див. таблицю 3). Це призведе до того, що діапазон пружно-пластичної роботи матеріалу збільшиться, а залежність між напруженнями та деформаціями в цій зоні матиме вже нелінійний характер (див. ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016 [17]);

2) значення тангенсу кута нахилу лінійної пружної ділянки в режимі ПА зменшується на  $5\%$  (див. таблицю 3). Водночас, у пружно-пластичній області модуль пружності також матиме вже нелінійну залежність від деформацій (див. ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016 [17]). Це призведе до певного зменшення жорсткості конструкції та вплине на значення частот її власних коливань.

З огляду на зазначене зауважимо, що аспекти пружно-пластичної роботи опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС детальніше будуть розглянуті в подальших дослідженнях.

За результатами розгляду та аналізу відомостей [18], [19] можна дійти висновку, що густина конструкційних вуглецевих сталей, до яких належить сталь СтЗсп5, практично не змінюється в діапазоні

температур до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  та під час виконання розрахунків може прийматися рівною  $7850\text{ кг/м}^3$ . Такий підхід узгоджується також з положеннями [17] стосовно того, що густину матеріалу приймають незалежною від температури.

Щодо використання коефіцієнта лінійного розширення  $\alpha$  під час виконання оцінки сейсмічної міцності опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АС зауважимо таке: НП 306.2.208-2016 [1] під час оцінки сейсмічної міцності елементів енергоблока АС не регламентує необхідність врахування безпосередньо температурних навантажень, спричинених нерівномірним розподілом температур по об'єму тіла або внаслідок різниці коефіцієнтів лінійного розширення різних матеріалів. Цей підхід є основою оцінки сейсмічної міцності всіх елементів енергоблока АС (див., наприклад, [20], [21]). З урахуванням зазначеного, немає потреби в розгляді та аналізі значення коефіцієнта лінійного розширення  $\alpha$  матеріалу при температурах, які відповідають режимам ПНЕ та ПА.

Узагальнюючи результати дослідження зміни фізико-механічних властивостей вуглецевих сталей можна зробити такий висновок: у разі підвищення температури до значень, що відповідають температурам у приміщеннях системи герметичного огороження під час режимів ПНЕ та ПА, зниження відповідних властивостей не призводить до суттєвого впливу на несучу здатність опорних конструкцій під час оцінки їх міцності в пружній постановці.

Отже, навантаженість опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС:

I категорії сейсмостійкості у разі сполучення ПНЕ + МРЗ, НЕ + ПА + ПЗ, НЕ + ПА + МРЗ, НЕ + ПЗ, ПНЕ + ПЗ загалом буде відповідати навантаженості опорних конструкцій у разі сполучення НЕ + МРЗ;

II категорії сейсмостійкості у разі сполучення ПНЕ + ПЗ загалом буде відповідати навантаженості опорних конструкцій у разі сполучення НЕ + ПЗ.

Отже, необхідною та достатньою номенклатурою сполучень технологічних умов експлуатації та



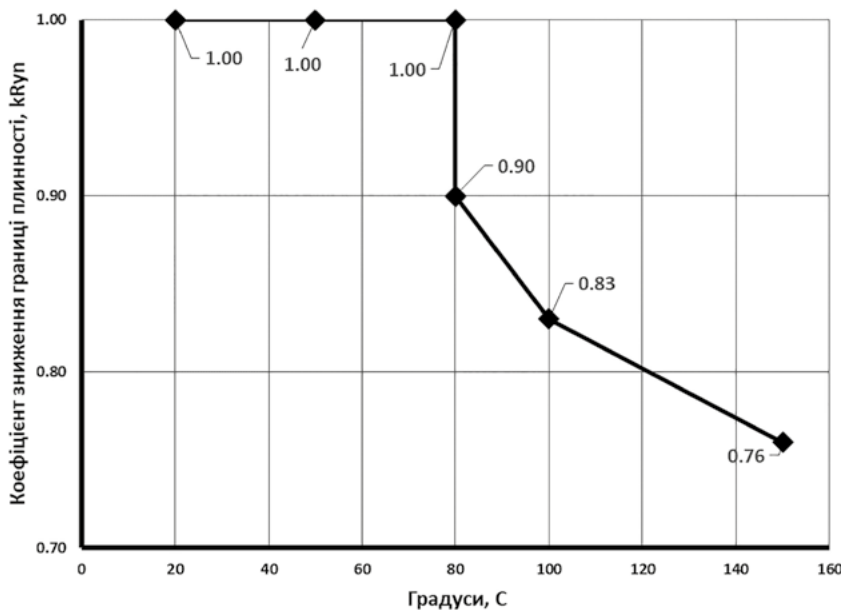


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта зниження границі плинності сталі S355 у разі підвищення температури елементів АС

сейсмічних впливів, які мають бути враховані під час оцінки сейсмічної міцності опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС, можна вважати НЕ + МРЗ та НЕ + ПЗ для елементів I та II категорій сейсмостійкості відповідно. Водночас, обмежуватися розглядом згаданих сполучень можливо лише за дотримання таких умов:

1) результати розрахунків у пружній постановці для сполучень НЕ + МРЗ та НЕ + ПЗ (для елементів I та II категорій сейсмостійкості відповідно) демонструють наявність запасу до переходу через граничний стан першої групи;

2) матеріалом опорної конструкції є сталь, у якої тенденції зниження фізико-механічних властивостей у разі підвищення температури до 150 °С є не гіршими ніж розглянуті вище;

3) навантаження на опорні конструкції від обладнання та трубопроводів енергоблока АС під час ПНЕ та ПА не перевищують тих, які були використані під час розрахунку на сполучення навантажень НЕ + МРЗ та НЕ + ПЗ для елементів I та II категорій сейсмостійкості відповідно.

У разі недотримання встановлених обмежень для опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС мають бути розглянуті всі сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів, регламентовані НП 306.2.208-2016 [1]. Ґрунтовний аналіз дотримання умови «З» є особливо актуальним для опорних конструкцій обладнання та трубопроводів систем безпеки енергоблока. Особливістю експлуатації систем безпеки є те, що під час НЕ вони загалом не функціонують, проте знаходяться постійно в режимі «очікування». У такому разі робочі рівні навантажень від обладнання та трубопроводів будуть

передаватися на опорні конструкції саме у разі спрацювання систем безпеки.

Якщо для опорних конструкцій використовуються закордонні сталі (наприклад, у разі постачання габаритного обладнання з власними опорними конструкціями, які виготовлені за кордоном) питання визначення необхідної та достатньої номенклатури сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів потребує ґрунтовного аналізу та дослідження в кожному окремому випадку. На рисунку 1 на підставі даних німецького стандарту з ядерної безпеки КТА 3205.1 [22] наведена залежність коефіцієнта зниження границі плинності сталі S355 у разі підвищення температури.

Як видно з рисунка 1, для сталі S355 характерне суттєве (приблизно 25 %) зниження границі плинності при температурі 150 °С, що не дає можливості скористатися описаним вище алгоритмом оптимізації номенклатури сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів.

## Висновки

1. Визначено номенклатуру параметрів технологічних умов експлуатації опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС. Установлено, що з усіх параметрів середовища в приміщеннях системи герметичного огороження енергоблока АС на міцність опорних конструкцій обладнання та трубопроводів впливає лише температура навколишнього середовища в режимах НЕ, ПНЕ та ПА.

2. Досліджено тенденції змін фізико-механічних властивостей вуглецевих сталей у разі підвищення температури. Встановлено, що у разі підвищення температури до значень, що відповідають температурам в приміщеннях системи герметичного огороження під час режимів ПНЕ та ПА, зниження відповідних властивостей не призводить до суттєвого впливу на несучу здатність опорних конструкцій під час оцінки їх сейсмічної міцності.

3. Необхідною та достатньою номенклатурою сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів, які мають бути враховані під час оцінки сейсмічної міцності опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС, можна вважати НЕ + МРЗ та НЕ + ПЗ для елементів I та II категорій сейсмостійкості відповідно. Водночас, обмежуватися розглядом згаданих сполучень можливо лише у випадку дотримання таких умов:

результати розрахунків для сполучень НЕ + МРЗ та НЕ + ПЗ (для елементів I та II категорій сейсмостійкості відповідно) демонструють наявність запасу до переходу через граничний стан першої групи;

матеріалом опорної конструкції є сталь, у якої тенденції зниження фізико-механічних властивостей у разі підвищення температури до 150 °С є не гіршими ніж розглянуті вище;

навантаження на опорні конструкції від обладнання та трубопроводів енергоблока АС під час ПНЕ та ПА не перевищують тих, які були використані під час розрахунку на сполучення навантажень НЕ + МРЗ та НЕ + ПЗ для елементів I та II категорій сейсмостійкості відповідно.

У разі недотримання встановлених обмежень для опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС мають бути розглянуті всі сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів, регламентовані НП 306.2.208-2016 [1].

4. Наведені висновки справедливі для випадку оцінки сейсмічної міцності опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблока АС в пружній постановці. Аспекти пружно-пластичної роботи опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АС під час сейсмічних навантажень будуть розглянуті в подальших дослідженнях.

## Список використаної літератури

1. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій. Затверджено наказом Держатомрегулювання від 17.10.2016 № 175, зареєстровано в М-ві юстиції України від 07.11.2016 за № 1449/29579.

2. Шугайло О-р П., Рижов Д. І., Мустафін М. А., Підгаєцький Т. В., Леткова Н. Г. Окремі аспекти практичного використання нормативних вимог до сполучення експлуатаційних та сейсмічних навантажень для тепломеханічного обладнання та трубопроводів. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. № 4(84). С. 5-11. doi: 10.32918/nrs.2019.4(84).01.

3. Шугайло О-р П., Рижов Д. І., Сахно О. В., Павлів Є. А., Хамровська Л. В. Щодо вимог до сполучень навантажень під час оцінки сейсмостійкості конструкцій, систем та елементів непрямыми методами. *Ядерна та радіаційна безпека*. № 1(85), С. 56-61. doi: 10.32918/nrs.2020.1(85).06.

4. Шугайло О-р П., Рижов Д. І., Жабін О. І., Данильчук Є. Л., Трусов І. О., Посох В. О., Куров В. О. Методологічні підходи до визначення необхідності врахування різних технологічних умов експлуатації елементів енергоблоків АЕС під час оцінки їх сейсмостійкості відповідно до нормативних вимог. *Ядерна та радіаційна безпека*. № 3(91). С. 5-10. doi: 10.32918/nrs.2021.3(91).01.

5. Шугайло О-р П., Рижов Д. І., Загальні принципи оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів атомних станцій відповідно до нормативних вимог. *Ядерна та радіаційна безпека*. № 4(92). С. 4-11. doi: 10.32918/nrs.2021.4(92).01.

6. Установка реакторная В-320. Техническое описание. 320.00.00.000ТО. Подольськ, 1982.

7. Отчет по периодической переоценке безопасности энергоблоков № 1, 2 ОП ЗАЭС. Фактор безопасности № 5. Детерминистический анализ безопасности энергоблока № 1 ЗАЭС. Анализ нарушений нормальной эксплуатации и проектных аварий при работе энергоблока на мощности. 21.1.59.ОППБ.05.01.1. Энергодар, 2014.

8. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування.

9. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України.

10. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування.

11. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.

12. Нілов О. О., Пермьяков В. О., Шимановський О. В., Білик С. І., Лаврінченко Л. І., Белов І. Д., Володимирський В. О. Металеві конструкції. Видання друге, перероблене та доповнене. Київ, видавництво «Сталь», 2010. 869 с.

13. Кресленик «ОП ЗАЭС. Энергоблок 1. Реакторное отделение. Герметичная часть. Техническое переоснащение. Выполнение монтажа опорно-подвесной системы. Трубопроводы аварийной питательной воды  $P_p > 22 \text{ кгс/см}^2$ . 003-62-310-ТМ». Харків, 2020.

14. Розрахункове обґрунтування запасу сейсмостійкості обладнання з формуванням переліку компенсуючих заходів. Том 2. Оцінка сейсмостійкості та визначення запасу сейсмостійкості обладнання РВ енергоблоку № 6 ВП ЗАЭС. ЗВ-Т.41.16.032.02-21. Звіт. Энергодар, 2021.

15. СОУ НАЕК 158:2020. Обеспечение технической безопасности. Технические требования к устройству и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР.

Затверджено наказом ДП «НАЕК «Енергоатом» від 02.11.2020 № 880.

16. ПНАЭ Г-10-021-90. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций. Москва: Энергоатомиздат, 1991, 32 с. (в межах, установлених листом Держатомрегулювання від 25.06.2018 № 15-28/4141).

17. ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.

18. Стали и сплавы. Марочник. Под редакцией В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева, Москва, «Интермет Инжиниринг», 2001, 608 с.

19. Марочник сталей и сплавов. Под общей редакцией А. С. Зубченко. Москва: «Издательство «Машиностроение», 2003. 784 с.

20. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 454 с.

21. РД 24.035.04-89. Нормы расчета на сейсмостойкость подъемно-транспортного оборудования атомных станций. Часть 1. Москва, 1990.

22. Safety Standards of the Nuclear Safety Standards Commission (KTA). Component Support Structures with Non-Integral Connections. Part 1: Component Support Structures with Non-Integral Connections for Components of the Primary Coolant Circuit of Light Water Reactors. KTA 3205.1 (2018-10).

## References

1. NP 306.2.208-2016. Requirements for seismic resistance design and for evaluation of seismic safety of Ukrainian NPPs. Approved by SNRIU Order No. 175 dated of 17 October 2016, registered in the Ministry of Justice on 11 July 2016 under No. 1449/29579.

2. Shugaylo, O.-r., Ryzhov, D., Mustafin, M., Pidhaietskyi, T., Letkova, N. (2019). Some aspects of practical application of regulatory requirements related to operating and seismic load combinations for thermomechanical equipment and piping. *Nuclear and Radiation Safety*, 4(84), 5-11. doi: 10.32918/nrs.2019.4(84).01.

3. Shugaylo, O.-r., Ryzhov, D., Sakhno, O., Pavliv, Y., Khamrovskaya, L. (2020). Regarding requirements for load combinations in case of evaluation of SSC seismic resistance by indirect methods. *Nuclear and Radiation Safety*, 1(85), 56-61. doi: 10.32918/nrs.2020.1(85).06.

4. Shugaylo, O.-r., Ryzhov, D., Zhabin, O., Danylchuk, I., Trusov, I., Posokh, V., Kurov, V. (2021). Methodological approaches to determining the need to consider different operational loads of NPP components in assessing their seismic resistance in accordance with regulatory requirements, *Nuclear and Radiation Safety*, 3(91), 5-10. doi: 10.32918/nrs.2021.3(91).01.

5. Shugaylo, O.-r., Ryzhov, D. (2021). General principles of seismic resistance assessment of steel support structures of NPP equipment and piping according to regulatory

requirements, *Nuclear and Radiation Safety*, 4(92), 4-11. doi: 10.32918/nrs.2021.4(92).01.

6. Nuclear Installation V-320. Technical description. 320.00.00.00.000TO, Podolsk, 1982.

7. Unit 1, 2 Zaporizhzhya NPP periodic safety reassessment report. Safety factor No. 5. Unit 1 Zaporizhzhya NPP deterministic safety analysis. Analysis of operational occurrences and design basis accidents during operation of the power. 21.1.59.OPPB.05.01.1, Energodar, 2014.

8. DBN V.2.6-198:2014. Steel Structures. Design Standards. Kyiv, Ukrarkhbudinform, 2014, 199 p.

9. DBN V.1.1-12:2014. Construction in seismic regions of Ukraine, Kyiv, Ministry of Regional Development of Ukraine, 2014, 110 p.

10. DBN V.1.2-2:2006. Loads and hazards. Design standards. Kyiv, Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 2006, 60 p.

11. DBN V.1.2-14:2018. General principles of reliability and structural safety of buildings and structures. Kyiv, Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 2018, 48 p.

12. Nilov, O., Permiakov, V., Shymanovskyy, O., Bilyk, S., Lavrinenko, L., Belov, I., Volodymirskyy, V. (2010). Metal structures. Second edition, revised and edited, 869 p.

13. Drawing ZNPP. Unit 1. Reactor compartment. Hermetic part. Technical re-equipment. Installation of support-hanger system. Emergency feed water piping Pp>22 kgf/cm<sup>2</sup>. 003-62-310-TM, Kharkiv, 2020.

14. Report. Feasibility study of equipment seismic resistance margin with the formation of a list of compensatory measures. Value 2. Assessment of seismic resistance and margin calculation of seismic resistance equipment of RC unit 6 ZNPP. ZV-T.41.16.032.02-21, Energodar, 2021.

15. SOU NNEGC 158:2020. Technical safety provision. Technical requirements for design and safety operation of equipment and piping of nuclear power plants with VVER reactors. Kyiv, SE "NNEGC "Energoatom", 2020.

16. ПНАЭ Г-10-021-90. Rules for design and operation of confining safety systems of nuclear power plants. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 32 p. (within the limits according to SNRIU letter No. 15-28/4141 of 25 June 2018).

17. DSTU-N B.V.2.6-211:2016. Steel structures. Design. Fire resistance calculation of structures.

18. Sorokina, V., Gervaseva, M., Eds. (2001). Steels and alloys. Grades. Moscow, 608 p.

19. Grades of steels and alloys. Under the general editorship of Zubchenko, A. (2003). Moscow, 784 p.

20. ПНАЭ Г-7-002-86. Standards for strength calculations of equipment and piping of nuclear power installations. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 454.

21. RD 24.035.04-89. Standards for seismic resistance calculations of nuclear power plant lifting-transport equipment. Part 1, Moscow, 1990.

22. Safety standards of the Nuclear Safety Standards Commission (KTA). Component support structures with non-integral connections. Part 1: component support structures with non-integral connections for components of the primary coolant circuit of light water reactors. KTA 3205.1 (2018-10).



## **Impact of Changes in Process Conditions for Operation of Steel Support Structures of Nuclear Power Plant Equipment and Piping on Their Seismic Resistance**

**O-r Shugaylo<sup>1</sup>, S. Bilyk<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>State Enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation safety», Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

The list indicating combinations of process conditions for operation of steel support structures of nuclear power plant equipment and piping and seismic hazards established in regulatory requirements is relatively extensive. It includes all possible cases of process conditions for operation of equipment and piping. Therefore, in assessing the seismic resistance of support structures, the question about potential optimization of the list with load combinations established by regulatory requirements arises. Such optimization can be performed after analyzing the impact of changes in the process conditions for operation of steel support structures of nuclear power plant equipment and piping on their seismic resistance.

The article defines a list with parameters of process conditions for operation of support structures of nuclear power plant equipment and piping that affect their seismic resistance. The impact of changes in these parameters on the seismic resistance of support structures is studied.

The article is part of the series of publications in the Nuclear and Radiation Safety Journal focusing on various aspects related to application of regulatory requirements for the assessment of seismic resistance of nuclear power plant components.

**Keywords:** steel support structures, equipment and piping, seismic resistance, load combinations.

Отримано 24.01.2022