

УДК 624.014, 621.039.58

ОЦІНКА БЕЗПЕКИ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕНЕРГОБЛОКІВ АТОМНИХ СТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВИХ УМОВ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.П. Шугайло¹,

д-р філософії

С.І. Білик²,

д-р техн. наук, професор

¹Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», Київ

²Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.113-124

Особливі умови експлуатації сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій (підвищена температура оточуючого середовища, необхідність врахування одночасної дії декількох епізодичних впливів тощо) вимагають використання спеціальних підходів до оцінки їх безпеки. Водночас, існуюче нормативне та методичне забезпечення не достатньо охоплює аспекти оцінки безпеки цих конструкцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації. Усунення цього недоліку сприятиме підвищенню рівня безпеки сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій.

Ключові слова: оцінка безпеки, динамічні навантаження, частота власних коливань, сталеві конструкції, епізодичні навантаження, міцність, раціональне проектування.

Вступ. На енергоблоках атомних електричних станцій (АЕС) з використанням сталей реалізують різноманітні конструктивні форми практично будь-якого призначення: від масштабних елементів крану кругової дії реакторного відділення до опорних конструкцій обладнання і трубопроводів. Ці сталеві конструкції енергоблоків АЕС знаходяться в особливих умовах експлуатації, серед яких підвищена температура оточуючого середовища, необхідність врахування сейсмічних впливів з повторюваністю 1 раз на 10000 років, одночасної дії декількох епізодичних впливів тощо.

Сейсмічний вплив відноситься до одного з найнебезпечніших впливів природного характеру для енергоблоків АЕС, який може призвести до відмов із загальної причини (тобто, численних відмов конструкцій, систем і елементів енергоблоку АЕС внаслідок однієї причини, що включає, зокрема зовнішні впливи). Серед згаданого різноманіття сталевих конструкцій важливу роль в забезпеченні безпеки АЕС відіграють опорні конструкції обладнання та трубопроводів, внаслідок того, що їх сейсмостійкість визначається, в тому числі, сейсмостійкістю опорних конструкцій, для виготовлення яких загалом використовуються швелери, кутики, профілі гнуті замкнені тощо. Приклади сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС (надалі – опорні конструкції) представлені на рис. 1.

З одного боку, оцінка безпеки опорних конструкцій має здійснюватися у відповідності до державних будівельних норм (ДБН). Водночас, пряме використання ДБН стосовно опорних конструкцій є недостатньо коректним та прийнятним, оскільки їх положення орієнтовані на традиційні сталеві конструкції, які піддані стандартним навантаженням і впливам, та не враховують згадані вище особливі умови експлуатації опорних конструкцій, а також ступень їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів.

З іншого боку, нормативно-правові акти з ядерної та радіаційної безпеки, наприклад НП 306.2.208-2016 [1], стосовно опорних конструкцій регламентують загалом лише вимоги до сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів, що обумовлено сучасною концепцією розвитку нормативно-правової бази України щодо забезпечення безпеки АЕС, яка передбачає розробку та впровадження нормативно-правових актів, що містять загальні регулюючі вимоги [2].

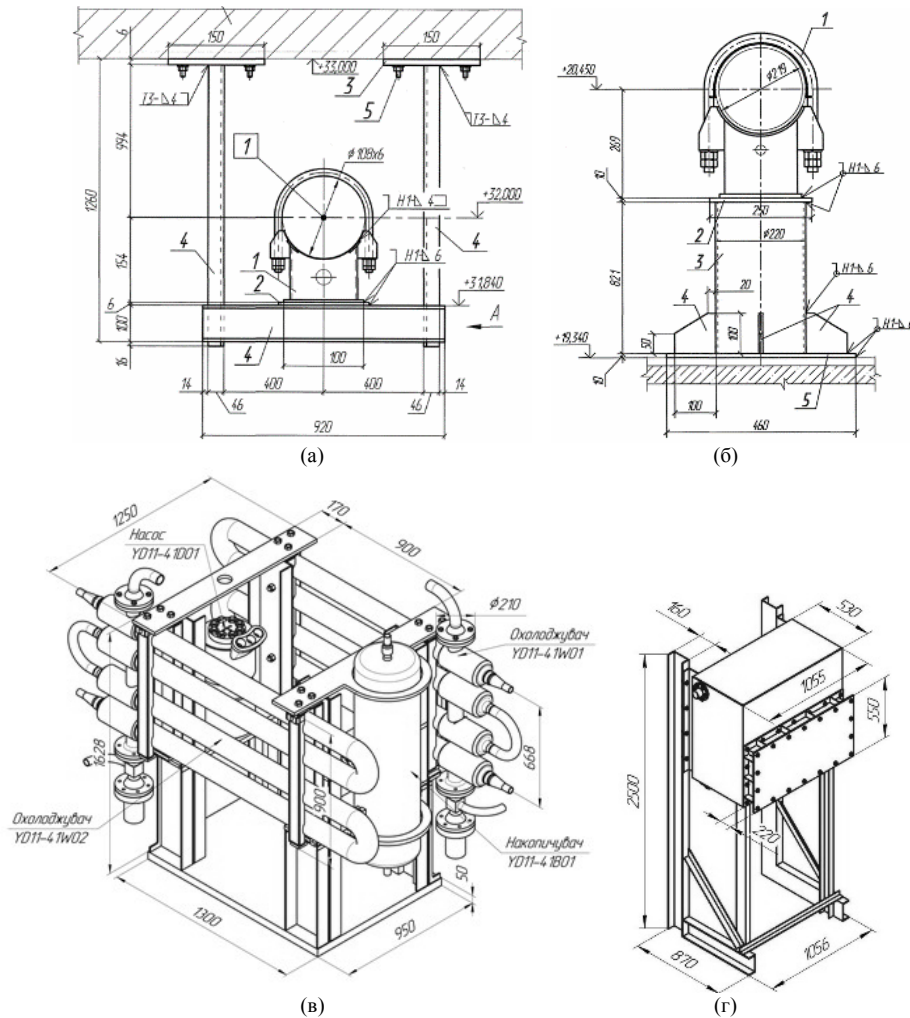


Рис. 1. Приклади опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС

Отже, існуюче нормативне та методичне забезпечення не достатньо охоплює аспекти оцінки безпеки опорних конструкцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації.

З урахуванням викладеного, актуальним постало питання розробки, формування та узагальнення підходів до оцінки безпеки опорних конструкцій, які враховують особливі умови їх експлуатації, а також ступень відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів, що і є метою цієї статті.

Розробці запропонованих підходів до оцінки безпеки опорних конструкцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації передували [3-7]: аналіз особливих умов експлуатації, визначення специфічних навантажень та їх розрахункових сполучень, формування загальних принципів оцінки сейсмічної міцності, дослідження напружено-деформованого стану.

Загальний підхід до оцінки безпеки. В атомній енергетиці стосовно конструкцій енергоблоків АЕС прийнятий такий загальний підхід: під час оцінки безпеки за основу технічних прийомів та теоретичних засад приймають положення відповідних державних будівельних норм. Водночас, врахування відповідальності конструкцій АЕС за ядерну та радіаційну безпеку, а також особливих умов їх експлуатації здійснюється шляхом: введення спеціальних коефіцієнтів стосовно значень навантажень та впливів,

розрахункових сполучень навантажень; встановлення спеціальних критеріїв відповідних величин; встановлення спеціальних вимог до епізодичних впливів тощо. Цей підхід успішно апробований національною багаторічною практикою проектування та оцінки безпеки конструкцій енергоблоків АЕС. З урахуванням викладеного, під час оцінки безпеки опорних конструкцій в якості основних технічних прийомів та теоретичних засад приймемо положення ДБН В 2.6-198:2014 [8], ДБН В.1.2-2:2006 [9] та ДБН В.1.2-14:2018 [10]. Врахування особливих умов експлуатації опорних конструкцій здійснюватиметься шляхом уточнення або розширення відповідних положень цих державних будівельних норм. При цьому, під час оцінки безпеки опорних конструкцій необхідним є дотримання консервативного підходу, відповідно до якого для параметрів і характеристик опорних конструкцій приймаються значення і межі, які явно призводять до більш несприятливих результатів.

Класифікація опорних конструкцій згідно державних будівельних норм. Відмова опорних конструкцій (не виконання своїх функцій в повному обсязі) потенційно може привести як до аварії на АЕС, так і до перевищення допустимих рівнів загального радіоактивного забруднення робочих поверхонь та/або допустимих концентрацій радіонуклідів у повітрі робочих приміщень [1]. Отже, з погляду потенційного негативного впливу відмови опорних конструкцій на ядерну та радіаційну безпеку енергоблоку АЕС необхідно:

- відносити їх до категорії відповідальності «А» згідно ДБН В 2.6-198:2014 [8];
- розрахунковий переріз відносити до I класу напружено-деформованого стану згідно ДБН В 2.6-198:2014 [8], тобто нормальні напруження на всіх ділянках розрахункового перерізу є меншими за розрахунковий опір сталі і можуть досягати його лише в найбільш напружених волокнах перерізу;
- відносити їх до класу наслідків СС3 згідно ДБН В.1.2-14:2018 [10].

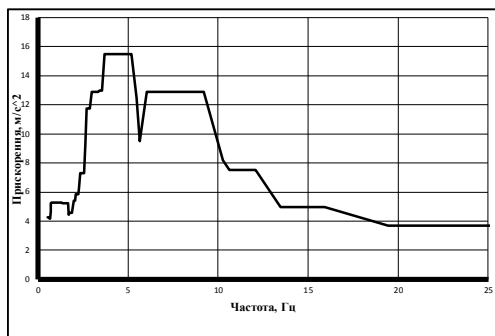
Сейсмічні вихідні дані. Опорні конструкції розміщуються всередині будівель та споруд енергоблоку АЕС. Отже, наведені в ДБН В.1.1-12:2014 [11] динамічні навантаження у вигляді залежності спектрального коефіцієнта динамічності від категорії ґрунту за сейсмічними властивостями не можуть бути використані як вихідні сейсмічні дані. Замість них в якості динамічних навантажень, викликаних землетрусом, повинні використовуватися поверхові спектри відгуку, які відображають розподіл максимальних значень прискорень відгуку матеріальної системи за частотами зовнішнього впливу, що залежать від співвідношення частотної характеристики системи і спектра впливу. Приклади поверхових спектрів відгуку представлені на рис. 2.

Згідно НП 306.2.208-2016 [1] поверхові спектри відгуку повинні бути визначені відповідно до спектра відгуку ґрунту, отриманого за результатами спеціальних сейсмологічних досліджень конкретного промислового майданчика АЕС.

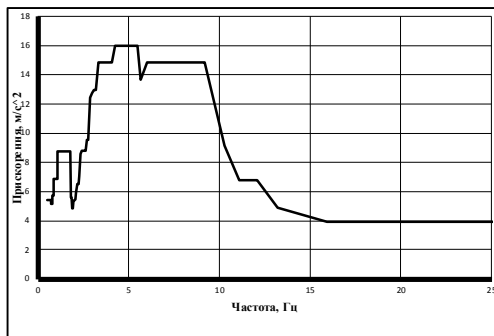
Фізико-механічні характеристики опорних конструкцій. Внутрішні параметри середовища герметичного об'єму (ГО) енергоблоку АЕС є зовнішніми параметрами навколишнього середовища для опорних конструкцій. В режимах нормальної експлуатації (НЕ), порушень нормальної експлуатації (ПНЕ) температура в ГО не перевищує 100°C. Водночас, під час максимальної проекційної аварії (ПА) «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850» на енергоблоці АЕС температура в ГО сягає значення близько 150°C, що в свою чергу впливає на значення фізико-механічних характеристик матеріалів опорних конструкцій. В цьому випадку необхідно дотримуватися вимог ДБН В.1.2-14:2018 [10] стосовно того, що у розрахункових ситуаціях, в яких властивості матеріалів конструкцій можуть змінюватися внаслідок впливу навколишнього середовища, розрахункове значення повинно встановлюватися з урахуванням таких змін. Для виготовлення опорних конструкцій використовуються матеріали, регламентовані ДБН В 2.6-198:2014 [8], який не містить відомостей щодо значень фізико-механічних характеристик матеріалів за температури 150°C. З урахуванням викладеного та керуючись положеннями ДСТУ-Н Б.В.2.6-

211:2016 [12] для використання пропонуються такі значення фізико-механічних характеристик вуглецевих сталей за температури 150°C:

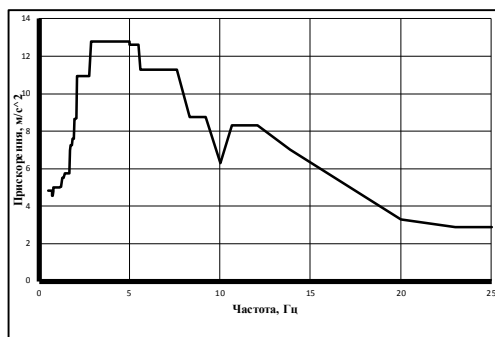
- характеристичний опір сталі за границею плинності: $R_{yn}^{150^{\circ}C} = 1,000 \cdot R_{yn}^{ДБН198}$;
- границя пропорційності: $R_p^{150^{\circ}C} = 0,904 \cdot R_{yn}^{ДБН198}$;
- модуль пружності: $E^{150^{\circ}C} = 0,950 \cdot E^{ДБН198}$.



(а)



(б)



(в)

Рис. 2. Приклади поверхових спектрів відгуків реакторного відділення енергоблоку АЕС з реакторною установкою ВВЕР-1000: (а) - поверховий спектр відповіді за горизонтальним напрямком X; (б) поверховий спектр відповіді за горизонтальним напрямком Y; (в) - поверховий спектр відповіді за вертикальним напрямком Z

При тому, значення коефіцієнтів зниження характеристичного опору сталі за границею плинності, границі пропорційності та модулю пружності за температури 150°C розраховані з використанням лінійної інтерполяції даних ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016 [12] щодо зміни параметрів діаграми «напруження-деформація» вуглецевих сталей за підвищених температур.

Для режимів НЕ, ПНЕ та ПА, в яких температура в ГО не перевищує 100°C, значення фізико-механічних характеристик приймаються відповідно до ДБН В 2.6-198:2014 [8].

Під час оцінки міцності конструкції за сейсмічних впливів ДБН В.1.1-12:2014 [11] пропонує враховувати підвищення механічних властивостей матеріалів за високих швидкостей навантажень. Врахування цього ефекту відбувається шляхом використання коефіцієнту $m=1,3$ (для сталевих конструкцій), який використовується для зменшення частини розрахункового значення зусилля, напруження або іншого силового фактора, що пов'язаний із виключно сейсмічним навантаженням. З погляду важливості опорних конструкцій для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки енергоблоку АЕС та задля забезпечення консервативності отриманих оцінок безпеки рекомендується не враховувати підвищення механічних властивостей матеріалів опорних конструкцій за високих швидкостей навантажень під час сейсмічних впливів.

Навантаження та впливи на опорні конструкції. Під час роботи енергоблоку АЕС в режимах НЕ, ПНЕ та ПА на опорні конструкції передаються механічні навантаження від

обладнання та трубопроводів. Під час землетрусу опорні конструкції додатково до навантажень НЕ, ПНЕ, ПА піддаються динамічному впливу, що викликаний максимальним розрахунковим землетрусом (МРЗ) або проєктним землетрусом (ПЗ). Отже, під час експлуатації опорні конструкції піддані яcosновним, так і епізодичним навантаженням. При тому, до основних навантажень на опорні конструкції відносяться:

- постійні: власна вага опорної конструкції;
- змінні тривалі: вага обладнання/трубопроводу, вага теплової ізоляції обладнання/трубопроводу, навантаження від середовища обладнання/трубопроводу під час НЕ;
- змінні короточасні: навантаження від середовища обладнання/трубопроводу під час ПНЕ.

До епізодичних навантажень на опорні конструкції відносяться: навантаження від середовища обладнання/трубопроводу під час ПА, сейсмічні навантаження, що передаються на опорні конструкції як від будівельних конструкцій, так і від обладнання/трубопроводу під час МРЗ, ПЗ.

Навантаження від сейсмічного впливу за трьома компонентами (двома горизонтальними та вертикальною) розглядається як одне епізодичне навантаження.

Значення навантажень від середовища обладнання/трубопроводу під час НЕ, ПНЕ та ПА визначаються за результатами аналізу проєктно-конструкторської та експлуатаційної документації (інструкцій з експлуатації, карт уставок захистів та блокування, паспортів обладнання/трубопроводів тощо) із застосуванням рекомендацій, наведених в [13].

Розрахункові сполучення навантажень, яким піддані опорні конструкції. Згідно ДБН В.1.2-2:2006 [9] як сейсмічні впливи, так і ПА відносяться до епізодичних впливів. Отже, під час оцінки безпеки сталевих конструкцій розглядається аварійне сполучення. При тому, на відміну від підходів ДБН В.1.2-2:2006 [9] в аварійне сполучення включаються одночасно ці два епізодичні впливи. Під час складання розрахункових сполучень навантажень (РСН) слід дотримуватися стандартних правил державних будівельних норм, зокрема:

- припускається, що всі навантаження в обраному РСН одночасно впливають на опорні конструкції;
- до РСН входять навантаження, які найбільш несприятливо впливають на опорні конструкції;
- навантаження, які взаємно виключають один одного, не можуть входити до одного РСН;
- мала імовірність одночасної реалізації розрахункових значень декількох навантажень враховується множенням розрахункових значень навантажень, що увійшли до РСН, на коефіцієнт сполучення $\psi \leq 1$.

Під час складання РСН в аварійному сполученні для постійних та аварійних навантажень рекомендується використовувати коефіцієнт сполучення навантажень рівний 1,0, для змінних короточасних – 0,8, що узгоджується з підходами ДБН В.1.2-2:2006 [9].

Черговою особливістю умов експлуатації опорних конструкцій є те, що в залежності від системи енергоблоку АЕС, в якій вони знаходяться, одне й те саме змінне тривале навантаження (наприклад, вага середовища (пар або вода) обладнання/трубопроводу) може як бути, так і не бути основним навантаженням за ступенем впливу. З метою врахування вказаної особливості рекомендується коефіцієнт сполучення, що відповідає основному за ступенем впливу змінному тривалому навантаженню приймати рівним 1,0, а коефіцієнти сполучень для інших змінних тривалих навантажень приймати рівними 0,95, що також не суперечить підходам ДБН В.1.2-2:2006 [9].

Як відзначено вище, за підходами ДБН В.1.2-2:2006 [9] режими ПНЕ на енергоблоці АЕС стосовно опорних конструкцій відносяться до змінних короточасних навантажень. Водночас, в окремих режимах ПНЕ відбувається спрацювання систем безпеки

енергоблоку АЕС. З метою врахування ще й цієї особливості, а також підвищеної відповідальності опорних конструкцій обладнання та трубопроводів систем безпеки щодо забезпечення ядерної та радіаційної безпеки енергоблоку АЕС за сейсмічних навантажень рекомендується для них коефіцієнт сполучення приймати рівним 0,95 замість 0,8 під час розгляду режимів ПНЕ.

Розрахункові схеми (моделі) опорних конструкцій. Під час складання розрахункових схем опорних конструкцій рекомендується дотримуватися загальних вимог ДБН В 2.6-198:2014 [8] до розрахункових схем (наприклад: схеми та передумови розрахунку повинні відображати дійсні умови роботи сталевих конструкцій, які рекомендується розраховувати як єдині просторові системи тощо). Додатково слід враховувати вимоги НП 306.2.208-2016 [1] стосовно того, що розрахункова схема опорної конструкції повинна відображати важливі для оцінки сейсмічної міцності особливості її геометрії, а також розподілу мас і жорсткостей.

Навантаження від трубопроводів в розрахункових схемах їх опорних конструкцій задаються у вигляді результуючих сил та моментів за відповідними осями. Під час розрахунку результуючих сил та моментів від трубопроводів слід врахувати: геометричні, а також фізико-механічні характеристики трубопроводу (в залежності від температури внутрішнього середовища); кінематичні граничні умови трубопроводу, які моделюють всю його опорно-підвісну систему; власну вагу трубопроводу та його внутрішнього середовища (вода, пар, пароводяна суміш); параметри теплової ізоляції; встановлені в трубопроводній системі арматури та обладнання з їх ваговими та геометричними характеристиками; тиск внутрішнього середовища трубопроводу; сейсмічні навантаження, що передаються на трубопровід; переміщення трубопроводу внаслідок дії всіх врахованих навантажень.

Під час визначення навантажень на опорні конструкції від обладнання пріоритетним є пряме моделювання цього обладнання в розрахунковій схемі. Врахування обладнання в розрахунковій схемі опорної конструкції у вигляді зосереджених або розподілених навантажень допускається за умови, що в опорній конструкції використовуються такі в'язі елементів, які забезпечують відсутність зміни кінематичних граничних умов опорної конструкції в порівнянні із підходом врахування моделювання обладнання в розрахунковій схемі. Під час спрощеного врахування обладнання значення зосереджених або розподілених навантажень необхідно визначати з урахуванням впливу приєднаних до обладнання трубопроводів; власної ваги обладнання та його внутрішнього середовища (вода, пар, пароводяна суміш); параметрів теплоізоляції, а також тиску та температури внутрішнього середовища; сейсмічних навантажень на обладнання від приєднаних трубопроводів; переміщень обладнання внаслідок дії всіх врахованих навантажень. Під час складання розрахункової схеми опорної конструкції під обладнання з суттєво винесеним центром мас (наприклад, винесеним електродвигуном тощо) необхідно враховувати цей ефект як такий, що суттєво впливає на динамічні характеристики системи «опорна конструкція + обладнання».

Під час розробки скінчено-елементної моделі опорної конструкції особлива увага повинна приділятися якості скінчено-елементної сітки, оскільки це впливає на збіжність та точність результатів розрахунків. Вибір скінчено-елементної сітки повинен ґрунтуватися на підставі результатів розрахунків напружень на декількох послідовно згущених скінчено-елементних сітках. В якості навантажувального фактору слід приймати сейсмічні впливи у вигляді поверхових спектрів відгуку.

Методи оцінки сейсмічної міцності та співвідношення для визначення напружено-деформованого стану. Як відзначено вище, вихідними сейсмічними даними є поверхові спектри відгуку. Отже, для оцінки сейсмічної міцності опорних конструкцій доцільно використовувати лінійно-спектральний метод (ЛСМ), в основу якого покладено виконання модального аналізу конструкції з подальшим її навантаженням інерційними силами за кожною з обчислених форм коливань і для кожного просторового напрямку сейсмічного впливу. При тому, на відміну від положень ДБН В.1.1-12:2014 [11] ЛСМ

необхідно використовувати у класичній постановці, тобто без застосування коефіцієнтів $k_1, k_2, k_3, a_0, \beta_i$ тощо згідно ДБН В.1.1-12:2014 [11], які не можуть бути застосовні для опорних конструкцій в силу їх конструктиву та особливих умов експлуатації.

В ЛСМ сейсмічне навантаження S_{ij} , що діє у напрямку i -ої узагальненої координати та відповідає j -ій формі власних коливань опорної конструкції, визначають за формулою [2]:

$$S_{ij} = m_{ij} \cdot \ddot{\varphi}_j \cdot \Phi_j \cdot x_{ij},$$

де m_{ij} – коефіцієнт інерції i -ої парціальної системи, $\ddot{\varphi}_j$ – сейсмічне прискорення згідно спектру відгуку для відповідного значення частоти власних коливань опорної конструкції, x_{ij} – переміщення у напрямку i -ої узагальненої координати j -ої форми власних коливань, Φ_j – постійна j -ої форми коливань, що визначається за формулою:

$$\Phi_j = \frac{\sum_{i=1}^N m_{ij} \cdot x_{ij} \cdot \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^N m_{ij} \cdot x_{ij}^2},$$

де α_i – кут між напрямками сейсмічного впливу та i -ої узагальненої координати.

Для забезпечення консервативності оцінок сейсмічної міцності опорних конструкцій направляючий косинус приймається рівним 1, тобто приймається, що горизонтальні та вертикальна складові поверхового спектру відгуку співпадають з горизонтальними та вертикальною вісями глобальної системи координат розрахункової моделі опорної конструкції.

Під час розрахунків враховується одночасне навантаження за трьома просторовими взаємно перпендикулярними складовими сейсмічного впливу (двома горизонтальними та вертикальним).

Визначення загального відгуку системи (R_a) від сейсмічних навантажень виконується за правилом «Корінь квадратний із суми квадратів»

$$R_a = \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i)^2},$$

де R_i – відгук системи для i -ої форми коливань.

Як відзначено вище для опорних конструкцій розглядається аварійне сполучення до якого входять одночасно два таких епізодичних впливи як землетрус та ПА. Отже, розглядається перша група граничних станів (втрата несучої здатності) для яких позаграничним станом опорної конструкції є в'язке руйнування.

Сейсмічні навантаження характеризуються одночасною дією в трьох просторових взаємно перпендикулярних напрямках. Крім цього, механічні навантаження на опорні конструкції також є просторовими. Отже, в загальному випадку для визначення інтенсивності напружень рекомендується четверта теорія міцності (критерій питомої потенційної енергії формозміни), на якув свою чергу також орієнтований ДБН В 2.6-198:2014 [8]. Виразивши інтенсивність напружень через нормальні та дотичні напруження у загальному випадку маємо [5, 7, 8, 14]

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}.$$

Використання цієї формули редукованих (приведених) напружень в запропонованому вигляді передбачає суттєве зменшення впливу розвитку обмежених пластичних деформацій, на відміну від перевірок міцності за ДБН В 2.6-198:2014 [8]. В свою чергу, зменшення впливу розвитку обмежених пластичних деформацій підвищує вимоги до конструктивної безпеки опорних конструкцій, що особливо важливо під час довгострокової

експлуатації (додатково необхідно відзначити, що наразі більшість енергоблоків АЕС України вже вичерпали свій проектний строк експлуатації та знаходяться у стані довгострокової експлуатації). Тим самим також обмежується накопичення дислокацій в сталі конструктивних елементів під час проектних навантажень та впливів. Загальний тензор механічних напружень (σ_{ij}), як відомо, записується так:

$$(\sigma_{ij}) = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}.$$

Отже, під час обчислення редукованих (приведених) напружень використовуються всі складові тензора механічних напружень [14].

Під час оцінки безпеки опорних конструкцій слід врахувати, що їх розрахунковий переріз віднесено до I класу напружено-деформованого стану згідно ДБН В.2.6-198:2014 [8].

Розрахунки сейсмічної міцності опорних конструкцій повинні виконуватися у такій послідовності:

- розрахунок статичної міцності під час НЕ;
- розрахунок форм і частот власних коливань;
- виконання лінійно-спектрального аналізу;
- розрахунок для сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів (див. нижче).

Сполучення технологічних умов експлуатації опорних конструкцій та сейсмічних впливів. Важливою особливістю умов експлуатації опорних конструкцій є жорсткі вимоги до номенклатури сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів, які мають бути враховані під час оцінки їх безпеки. Ці вимоги містяться в НП 306.2.208-2016 [1] та представлені в таблиці 1 в залежності від категорії сейсмостійкості опорної конструкції.

Таблиця 1

Категорія сейсмостійкості опорної конструкції	Номенклатура сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів
I	НЕ + МРЗ, НЕ + ПЗ, ПНЕ + МРЗ, ПНЕ + ПЗ, НЕ + ПА + МРЗ, НЕ + ПА + ПЗ
II	НЕ + ПЗ, ПНЕ + ПЗ

У сполученнях НЕ + ПА + МРЗ (ПЗ) під навантаженнями НЕ йдеться про постійні навантаження (наприклад, від власної ваги).

Приведена в табл. 1 номенклатура сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів в залежності від конкретного сполучення та категорії сейсмостійкості обумовлює необхідність диференційовано підходити до вибору значень властивостей матеріалу (що вже розглянуто вище), а також коефіцієнтів надійності та відповідальності під час оцінки безпеки опорних конструкцій з використанням методу граничних станів та з урахуванням особливих умов їх експлуатації.

Під час використання методу граничних станів для врахування ступеню відповідальності опорних конструкцій щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів пропонується використовувати (по аналогії з коефіцієнтом відповідальності конструкції за ДБН В.1.2-14:2018 [10]) коефіцієнти відповідальності за ядерну та радіаційну безпеку з такими значеннями: 1,15 – для опорних конструкцій I категорії сейсмостійкості, 1,10 – II категорії сейсмостійкості. Коефіцієнт умов роботи опорних конструкцій для всіх сполучень технологічних умов експлуатації та категорій сейсмостійкості рекомендується приймати рівним 1,0, оскільки опорні конструкції можуть мати різноманітні складені профілі, а

сейсмічні навантаження характеризуються одночасною дією в трьох просторових взаємно перпендикулярних напрямках. Коефіцієнт надійності за матеріалом необхідно приймати згідно вимог ДБН В 2.6-198:2014 [8] для всіх сполучень технологічних умов експлуатації та категорій сейсмостійкості опорних конструкцій.

Раціональне проєктування опорних конструкцій. Для виготовлення опорних конструкцій використовуються матеріали та сортаменти сталей, які виготовляються серійно у відповідності до чинних нормативних документів. Отже, питання раціональності розглядається стосовно опорної конструкції загалом, а не окремих характеристик перерізів її конструктивних елементів.

Усталеною практикою раціонального проєктування за динамічних навантажень, наприклад, використання різних демпферів, динамічних гасників коливань тощо (див. [15-18]). Особливістю розглядуваних опорних конструкцій є те, що динамічні навантаження на них, викликані землетрусом, не можна виключити згаданими шляхами, оскільки для них не прийнято використовувати антисейсмічні заходи внаслідок вкрай великої кількості таких конструкцій на енергоблоці АЕС та можливого будь-якого їх просторового розміщення (підлога, стіна, стеля). Отже, прийоми раціонального проєктування опорних конструкцій мають бути спрямовані не на виключення сейсмічних напружень, а на їх мінімізацію (регулювання). Викладене формує такий цільовий критерій раціональності опорної конструкції: раціональною вважається опорна конструкція (з прийнятими вагово-габаритними та жорсткостними характеристиками), в якій за динамічних навантажень, викликаних землетрусом, виникають менші із можливих сейсмічні напруження. Розрахунковий переріз опорних конструкцій віднесений до І класу напружено-деформованого стану за ДБН В 2.6-198:2014 [8], що виключає під час раціонального проєктування можливість використання запасів міцності конструкції шляхом врахування обмежених пластичних деформацій.

Можливі підходи до раціонального проєктування формують наявні особливості ЛСМ та поверхових спектрів відгуку. Як видно з рис. 2, в залежності від напрямку сейсмічного впливу, а також значення частоти власних коливань опорної конструкції, сейсмічні прискорення $\ddot{\varphi}_j$, яким вони можуть бути піддані, варіюються у широкому діапазоні.

Особливістю поверхових спектрів відгуку є наявність ділянки сейсмічних прискорень, які після певного значення частоти є постійними та не залежать від неї (див., наприклад, на рис. 2 горизонтальні ділянки значень прискорень після 23 Гц). Цей діапазон на поверхових спектрах відгуку прийнято називати прискоренням нульового періоду. Отже, пріоритетним прийомом раціонального проєктування є попередній підбір (шляхом варіювання вагово-габаритних та жорсткостних характеристик опорної конструкції) динамічних характеристик (наприклад, за наближеними співвідношеннями, представленими в [14]) за яких вони одразу попадають в діапазон прискорень нульового періоду, що в свою чергу забезпечує автоматичне досягнення цільового критерію раціональності опорної конструкції.

Якщо конструктивні особливості опорної конструкції не дають можливості скористатися описаним прийомом, то наступним шляхом досягнення цільового критерію раціональності опорної конструкції є регулювання її динамічних характеристик шляхом варіювання умов закріплення на конструктивній основі. Рекомендується виконати варіантні розрахунки опорної конструкції для таких умов закріплення: переміщення у всіх трьох напрямках заборонені, а моменти – дозволені; переміщення та моменти заборонені у всіх трьох напрямках. Остаточо слід обрати той варіант закріплення за якого в опорній конструкції виникають менші сейсмічні напруження, що знову ж таки забезпечує досягнення цільового критерію раціональності опорної конструкції.

Висновок. ДБН В 2.6-198:2014 [8] для сталевих конструкцій, що знаходяться в особливих умовах експлуатації, регламентує необхідність дотримання додаткових вимог, які відображають особливості роботи цих конструкцій та передбачені відповідними нормативними документами. Запропоновані підходи до оцінки безпеки опорних

конструкцій враховують як особливі умови їх експлуатації, так і ступень відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів. До того ж під час їх розробки враховані також вимоги нормативно-правових актів з ядерної та радіаційної безпеки енергоблоків АЕС України. Отже, синергія нормативно-правових актів з ядерної і радіаційної безпеки та державних будівельних норм сприяє підвищенню рівня безпеки конструкцій енергоблоків АЕС, що знаходяться в особливих умовах експлуатації.

СПИСОК 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. Оцінка сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій : монографія / Д. Рижов, О. Шугайло, О. Сахно та ін. ; ред. Д. Рижов. – Київ : ДНТЦ ЯРБ, 2022. – 144 с.
3. Шугайло О. 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. – 2021. – № 4(92). – С. 4-11. Doi: 10.32918/nrs.2021.4(92).01.
4. Шугайло О. П., Білик С.І., Вплив зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків атомних станцій на їх сейсмічну міцність // Ядерна та радіаційна безпека. – 2022. – № 1(93). – С. 62-70. Doi: 10.32918/nrs.2021.1(93).07.
5. Shugaylo O. P., Bilyk S.I. Research of the stress-strain state for steel support structures of nuclear power plant components under seismic loads // Nuclear and Radiation Safety. – 2022. – № 3(95). – P. 15-26. Doi:10.32918/nrs.2022.3(95).02.
6. Oleksandr P. Shugaylo, Serhii I. Bilyk. The specifics of the compilation of the calculated load combinations in the assessment of seismic resistance of steel supporting structures of nuclear power plant equipment and piping. // Journal of Mechanical Engineering – Problemy mashynobuduvannya. – 2022. – vol. 25, № 3. – P. 6-15. Doi:10.15407/pmach2022.03.006.
7. Шугайло О. П., Білик С.І. Розвиток методів оцінки безпеки сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних станцій за сейсмічних навантажень // Ядерна та радіаційна безпека. – 2023. – № 1(97). – С. 20-29. Doi:10.32918/nrs.2023.1(97).03.
8. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – Чинний від 01.01.2015.
9. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К.: Мінбуд України, 2006. – 60 с. – Чинний від 01.01.2007.
10. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. – К.: Мінрегіонбуд України, 2018. – 36 с. – Чинний від 01.01.2019.
11. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. – 110 с. – Чинний від 01.10.2014.
12. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 107 с. – Чинний від 01.04.2017.
13. Шугайло О. П., Рижов Д. І., Жабін О. І., Данильчук С. 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. – 2021. – № 3(91). – С. 5-10. Doi:10.32918/nrs.2021.3(91).01.
14. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
15. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. – СПб.: Наука, 1998. – 255 с.
16. Немчинов Ю. И. Сейсмостойкость зданий и сооружений. – Київ: ФОП Гудименко С.В., 2008. – 480 с.
17. Савицький М. В., Данишевський В. В., Гайдар А. М. Динамічне моделювання та раціональне проектування будівель із демпферами сухого тертя за допомогою методів штучного розуму // Український журнал будівництва та архітектури. – 2021. – № 1 (001). – С. 14-25. Doi:10.30838/J.BPSACEA.2312.230221. 14.713.
18. Тімченко Р. О., Крішко Д.А., Савенко В. О., Коваль С.А. Застосування енергопоглиначів у металевих каркасах будівель // Вісник Криворізького національного університету. – 2022. – Вип. 54. – С. 115-121. Doi:10.31721/2306-5451-2022-1-54-115-121.

REFERENCES

1. NP 306.2.208-2016 Vymohy do seismostiikoho proektuvannya ta otsinky seismichnoi bezpeky enerhobloktiv atomnykh stantsii (Requirements for seismic resistance design and for seismic safety evaluation nuclear power plants). Zatverdzheno nakazom Derzhatomreghuliuvannya vid 17.10.2016 № 175, zareiestrovano v M-vi yustytitsii Ukrainy vid 07.11.2016 za № 1449/29579 – Ukr.
2. Otsinka seismichnoi bezpeky enerhobloktiv atomnykh stantsii (Seismic safety assessment for nuclear power plants units) : monohrafiia / D. Ryzhov, O. Shugaylo, O. Sakhno ta in.; red. D. Ryzhov. Kyiv : DNTT's YaRB, 2022. 144 c.– Ukr.

3. *Shugaylo O. P., Ryzhov D. I.* Zahalni pryntsypy otsinky seismichnoi mitsnosti stalevykh opornykh konstrukttsii obladnannia i truboprovodiv atomnykh stantsii vidpovidno do normatyvnykh vymoh (General principles of seismic resistance assessment of steel support structures of NPP equipment and piping according to regulatory requirements) // Nuclear and Radiation Safety. – 2021. – № 4(92). – P. 4-11. Doi: 10.32918/nrs.2021.4(92).01.– Ukr.
4. *Shugaylo O. P., Bilyk S. I.* Vplyv zminy tekhnolohichnykh umov ekspluatatsii stalevykh opornykh konstrukttsii obladnannia ta truboprovodiv enerhoblokov atomnykh stantsii na yikh seismichnu mitsnist (Impact of changes in process conditions for operation of steel support structures of nuclear power plant equipment and piping on their seismic resistance) // Nuclear and Radiation Safety. – 2022. – № 1(93). – P. 62-70. Doi: 10.32918/nrs.2021.1(93).07.– Ukr.
5. *Shugaylo O. P., Bilyk S. I.* Research of the stress-strain state for steel support structures of nuclear power plant components under seismic loads // Nuclear and Radiation Safety. – 2022. – № 3(95). – P. 15-26. Doi:10.32918/nrs.2022.3(95).02.
6. *Oleksandr P. Shugaylo, Serhii I. Bilyk.* The specifics of the compilation of the calculated load combinations in the assessment of seismic resistance of steel supporting structures of nuclear power plant equipment and piping. // Journal of Mechanical Engineering – Problemy mashynobuduvannia. – 2022. – vol. 25, № 3. – P. 6-15. Doi:10.15407/pmach2022.03.006.
7. *Shugaylo O. P., Bilyk S. I.* Rozvytok metodiv otsinky bezpeky stalevykh opornykh konstrukttsii obladnannia i truboprovodiv enerhoblokov atomnykh stantsii za seismichnykh navantazhen (Development of safety assessment methods for steel support structures of nuclear power plant equipment and piping under seismic loads) // Nuclear and Radiation Safety. – 2023. – № 1(97). – P. 20-29. Doi:10.32918/nrs.2023.1(97).03.– Ukr.
8. DBN V 2.6-198:2014. Stalevi konstrukttsii. Normy proektuvannia (Steel structures. Design standards). – K.: Minrehion Ukrainy, 2014. – 199 p. – Chynnyi vid 01.01.2015.– Ukr.
9. DBN V.1.2-2:2006. Systema zabezpechennia nadiinoshti ta bezpeky budivelnikh ob'iektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia (The system for ensuring the reliability and safety of construction objects. Loads and hazards. Design standards.). – K.: Minbud Ukrainy, 2006. – 60 p. – Chynnyi vid 01.01.2007.– Ukr.
10. DBN V.1.2-14:2018. Systema zabezpechennia nadiinoshti ta bezpeky budivelnikh ob'iektiv. Zahalni pryntsypy zabezpechennia nadiinoshti ta konstruktivnoi bezpeky budivel i sporud (The system for ensuring the reliability and safety of construction objects. General principles of ensuring reliability and structural safety of buildings and structures). – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2018. – 36 p. – Chynnyi vid 01.01.2019.– Ukr.
11. DBN V.1.1-12:2014. Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy (Construction in seismic regions of Ukraine). – K.: Ministerstvo rehionalnogo rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnogo hospodarstva Ukrainy, 2014. – 110 p. – Chynnyi vid 01.10.2014.
12. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Proektuvannia stalevykh konstrukttsii. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist (Steel structures design. Fire resistance calculation of structures). – K.: DP «UkrNDNTs», 2017. – 107 p. – Chynnyi vid 01.04.2017.– Ukr.
13. *Shugaylo O. P., Ryzhov D. I., Zhabin O. I., Danylchuk Ye. L., Trusov I. O., Posokh V. O., Kurov V. O.* Metodolohichni pidkhody do vyznachennia neobkhidnosti vrakhuvannia riznykh tekhnolohichnykh umov ekspluatatsii elementiv enerhoblokov AES pid chas otsinky yikh seismostiikosti vidpovidno do normatyvnykh vymoh (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. – 2021. – № 3(91). – P. 5-10. Doi:10.32918/nrs.2021.3(91).01.– Ukr.
14. *Pysarenko H. S., Yakovlev A. P., Matveev V. V.* Spravochnyk po soprotivleniu materyalov (Material strength guide). – Kyev: Nauk. dumka, 1988. – 736 p.– Rus.
15. *Byrbraer A. N.* Raschet konstrukttsyi na seismostoikost (Construction seismic resistance calculation). – SPb.: Nauka, 1998. – 255 p. – Rus.
16. *Nemchynov Yu. I.* Seismostoikost zdanyi y sooruzhenyi (Seismic resistance of buildings and constructions). – Kyiv: FOP Hudymenko S.V., 2008. – 480 p.– Rus.
17. *Savytskyi M. V., Danishevskiy V. V., Haidar A. M.* Dynamichne modeliuвання ta ratsionalne proektuvannia budivel iz dempferamy sukhooho tertia za dopomohoiu metodiv shtuchnoho roiovoho intelektu (Dynamic modelling and optimal design of buildings with friction dampers using particle swarm optimization) // Ukrainskiy zhurnal budivnytstva ta arkhitektury. – 2021. – № 1 (001). – P. 14-25. Doi:10.30838/J.BPSACEA.2312.230221.14.713.– Ukr.
18. *Timchenko R. O., Krishko D.A., Savenko V. O., Koval S.A.* Zastosuvannia enerhopohlynachiv u metalevykh karkasakh budivel (Application of energy absorbers in metal frames of buildings) // Visnyk Kryvorizkoho natsionalnogo universytetu. – 2022. – Vyp. 54. – P. 115-121. Doi:10.31721/2306-5451-2022-1-54-115-121.– Ukr.

Стаття надійшла 13.10.2023

Шугайло О. П., Білик С. І.

ОЦІНКА БЕЗПЕКИ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕНЕРГОБЛОКІВ АТОМНИХ СТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВИХ УМОВ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Особливі умови експлуатації сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій (підвищена температура оточуючого середовища, необхідність врахування одночасної дії декількох епізодичних впливів тощо) вимагають використання спеціальних підходів до оцінки їх безпеки. Серед широкого різноманіття сталевих конструкцій на енергоблоці атомної станції важливу роль в забезпеченні її безпеки відіграють опорні конструкції обладнання та трубопроводів. Водночас, державні будівельні норми орієнтовані на традиційні сталеві конструкції, які піддані

стандартним навантаженням і впливам, та не враховують вказані особливі умови експлуатації. Нормативно-правові акти з ядерної та радіаційної безпеки за цим аспектом містять загальні регулюючі вимоги, що обумовлено сучасною концепцією розвитку нормативно-правової бази України щодо забезпечення безпеки атомних станцій. Отже, існуюче нормативне та методичне забезпечення не достатньо охоплює аспекти оцінки безпеки опорних конструкцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації. У статті запропоновані підходи до оцінки безпеки опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних станцій, які враховують як особливі умови їх експлуатації, так і ступень відповідальності щодо забезпечення безпеки під час та після сейсмічних впливів.

Ключові слова: оцінка безпеки, динамічні навантаження, частота власних коливань, сталеві конструкції, епізодичні навантаження, міцність, раціональне проектування.

Shugaylo O. P., Bilyk S.I.

SAFETY ASSESSMENT OF THE STEEL STRUCTURES OF NUCLEAR POWER PLANTS UNITS CONSIDERING SPECIAL OPERATION CONDITIONS

Special operation conditions of steel structures nuclear power plants units (elevated temperature of the surrounding environment, the need to consider the simultaneous action of several episodic impacts etc.) require using of special approaches to their safety assessment. Among the wide variety of steel structures at nuclear power plants units, the supporting structures of equipment and pipelines play an essential role in ensuring its safety. At the same time, state building codes oriented towards traditional steel structures that are subjected to standard loads and impacts, and do not consider mentioned special operating conditions. Regulatory acts on nuclear and radiation safety in this aspect contain general regulatory requirements, which is due to the modern concept of the development of the regulatory-legal framework of Ukraine for ensuring the safety of nuclear plants. Therefore, the existing regulatory and methodological support does not sufficiently cover the aspects of safety assessment of supporting structures, taking into account the special operation conditions. The article proposes approaches to assessing the safety of equipment and pipelines supporting structures nuclear power plants units, which consider both the special operation conditions and the degree of responsibility for ensuring safety during and after seismic hazards.

Keywords: safety assessment, dynamic loads, frequencies of natural oscillations, steel structures, episodic loads, strength, rational design.

УДК 624.014, 621.039.58

Шугайло О.П., Білик С.І. Оцінка безпеки сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 111. – С. 113-124.

У статті запропоновані підходи до оцінки безпеки сталевих конструкцій атомних станцій, які враховують як особливі умови їх експлуатації, так і ступень відповідальності щодо забезпечення безпеки під час та після сейсмічних впливів.

Табл. 1. Іл. 2. Бібліогр. 18 назв.

UDC624.014, 621.039.58

Shugaylo O. P., Bilyk S.I. Safety assessment of the steel structures of nuclear power plants units considering special operation conditions // Strength of Materials and Theory of Structures. Scientific-and-technical collected articles. – К.: КНУБА, 2023. – Issue 111. – P. 113-124.

The article proposes approaches to assessing the safety steel structures of nuclear power plants units, which consider both the special operation conditions and the degree of responsibility for ensuring safety during and after seismic hazards.

Tabl. 1. Figs. 2. Refs. 18

Автор: доктор філософії, начальник відділу кваліфікації обладнання та сейсмостійкості ДП ДНТЦ ЯРБ ШУГАЙЛО Олександр Петрович

Адреса: 03142, Україна, м. Київ, вул. В. Стуса, 35-37, Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки»

Робочий тел.: +38 (044) 422-49-51

E-mail: op_shugaylo@sstc.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1044-0299>

Автор: доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металевих та дерев'яних конструкцій КНУБА БІЛИК Сергій Іванович

Адреса: 03037, Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Робочий тел.: +38 (044) 241-54-89

E-mail: bilyk.si@knuba.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8783-5892>