

УДК 624.014, 621.039.58

ВПЛИВ ЗМІНИ УМОВ ЗАКРІПЛЕННЯ СТАЛЕВИХ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ І ТРУБОПРОВІДІВ ЕНЕРГОБЛОКІВ АТОМНИХ СТАНЦІЙ НА ЇХ СЕЙСМІЧНУ МІЦНІСТЬ

О. П. Шугайло, op_shugaylo@sstc.ua
ORCID: 0000-0003-1044-0299

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

Сейсмостійкість обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних електростанцій визначається, серед іншого, сейсмостійкістю їх сталевих опорних конструкцій. Для її оцінки широко застосовується лінійно-спектральний метод, який передбачає використання результатів модального аналізу конструкції, що розглядається. Під час його виконання досліджуються динамічні характеристики конструкції (зокрема, моди і значення частот власних коливань). Динамічні характеристики сталевих опорних конструкцій впливають на величину сейсмічних навантажень, які передаватимуться на них під час землетрусу. На значення динамічних характеристик, крім іншого, впливають умови закріплення сталевих опорних конструкцій. У зв'язку із викладеним актуальним є вивчення впливу зміни умов закріплення сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних електростанцій на їх сейсмічну міцність. У статті представлені результати дослідження динамічних характеристик, а також напружено-деформованого стану сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних електростанцій під час зміни умов їх закріплення.

Ключові слова: сталеві конструкції, скінчено-елемента модель, сейсмічні навантаження, динамічні характеристики, форма коливань, частота власних коливань, міцність.

Вступ

Сейсмостійкість обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних електростанцій (АЕС) визначається, серед іншого, сейсмостійкістю їх сталевих опорних конструкцій. Із прикладами цих конструкцій можна ознайомитися в [1–3]. Значна кількість сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоку АЕС знаходиться в будівлі реакторного відділення (РВ). У цілому ці сталеві опорні конструкції повинні виконувати свої функції під час і після максимального розрахункового землетрусу (МРЗ) та/або проектного землетрусу. Як відзначено у статті [4], виконані раніше аналіз й узагальнення низки проектів сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків АЕС України дозволили умовно виокремити такі їх основні типові конструктивні форми: 1) «стійка», 2) «консоль», 3) «стельовий каркас»; 4) «підлоговий каркас». При цьому типові конструктивні форми 1, 2 і 3 використовуються переважно для трубопроводів, 4 – для обладнання.

У теорії сейсмостійкості виокремлюють [1, 5–10] три основні методи визначення динамічної реакції конструкції при землетрусі залежно від динамічних характеристик (зокрема, форми і частоти власних коливань) об'єкта, що розглядається, а саме: метод еквівалентного статичного навантаження, лінійно-спектральний метод (ЛСМ) і метод динамічного аналізу.

Метод еквівалентного статичного навантаження полягає у статичному навантаженні досліджуваної конструкції інерційним навантаженням, розподіленим або зосередженим у вузлах розрахункової моделі. Цей метод прийнято використовувати для конструкцій, що мають першу частоту власних коливань вищу 20 Гц. У свою чергу, інерційне навантаження визначається як добуток вагового навантаження конструкції на сейсмічне прискорення землетрусу.

Метод динамічного аналізу застосовує інтегрування рівнянь руху за часом, як правило, із метою врахування нелінійних ефектів. При цьому як вихідний сейсмічний вплив використовуються акселерограми.

Для оцінки сейсмостійкості сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків АЕС широко використовується ЛСМ, який передбачає проведення модального аналізу конструкції, що розглядається. На цьому етапі визначаються форми й частоти власних коливань конструкції. Далі система навантажується інерційним навантаженням по кожній з обчислених форм коливань і для

кожного просторового напрямку сейсмічного впливу. При використанні ЛСМ як вихідний сейсмічний вплив приймаються поверхові спектри відгуку, обчислені на основі динамічного аналізу споруди.

В основу ЛСМ покладено метод приведення, який дозволяє звести лінійну систему з N ступенями свободи до N еквівалентних систем з одним ступенем свободи, накладання коливань яких дає в сумі коливання вихідної системи [1, 5–9]. Сейсмічне навантаження S_{ij} (тобто сила, яка виникає в конструкції внаслідок сейсмічних впливів), що діє в напрямку i -ої узагальненої координати і відповідає j -ій формі власних коливань конструкції, визначають за формулою

$$S_{ij} = m_{ij} \ddot{\phi}_j \Phi_j x_{ij}, \quad (1)$$

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

$$\Phi_j = \frac{\sum_{i=1}^N m_{ii} x_{ij} \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^N m_{ii} x_{ij}^2}, \quad (2)$$

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

Як видно із співвідношення (1), на значення сейсмічного навантаження S_{ij} напряму впливає в тому числі й значення частоти власних коливань конструкції, оскільки до величини S_{ij} входить параметр $\ddot{\phi}_j$. Отже, зміна власної частоти коливань конструкції впливає на зміну сейсмічного навантаження S_{ij} . Як відзначено вище, ЛСМ передбачає використання результатів модального аналізу конструкції, що розглядається. Під час його виконання досліджуються динамічні характеристики конструкції, на які, серед іншого, впливають умови закріплення сталевих опорних конструкцій. Таким чином, актуальним є вивчення впливу зміни умов закріплення сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків АЕС на їх сейсмічну міцність. Отже, метою статті є дослідити динамічні характеристики і встановити закономірності напружено-деформованого стану (НДС) сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм під час зміни умов їх закріплення.

Методика проведення чисельного дослідження динамічних характеристик і напружено-деформованого стану, вихідні дані

Для чисельних досліджень динамічних характеристик і НДС сталевих опорних конструкцій застосовано розрахунковий комплекс ANSYS, в якому для вирішення основної системи рівнянь при скінчено-елементних розрахунках в цілому формуються глобальні матриці жорсткості, демпфування і матриця мас, а також вектор зовнішнього вузлового навантаження [11].

У свою чергу, державні будівельні норми з розрахунку сталевих конструкцій орієнтовані на використання четвертої теорії міцності (критерію питомої потенційної енергії формозміни) [12]. Отже, інтенсивність напружень σ_{int} при чисельних дослідженнях визначалася саме за четвертою теорією міцності.

Матеріалом сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм є сталь Ст3сп5, для якої прийняті такі фізико-механічні характеристики [13]: характеристичний опір за границею пластичності – 255 МПа, модуль пружності – $2,06 \times 10^5$ МПа, густина – 7850 кг/м³, коефіцієнт Пуассона – 0,3.

Параметри середовища у приміщеннях системи герметичного огороження енергоблока АЕС із реакторною установкою ВВЕР-1000 під час нормальної експлуатації приймаються згідно з виконаним аналізом в [14].

Під час землетрусу сейсмічним струшуванням безпосередньо піддані будівлі і споруди. На конструкції, які знаходяться всередині цих будівель, передаються сейсмічні прискорення від землетрусу, якими використовуватимемо поверхові спектри відгуку. Згідно з [15–19] для РВ енергоблоків Запорізької АЕС (ЗАЕС) і Південноукраїнської АЕС (ПАЕС) поверхові спектри відгуку визначені з урахуванням взаємодії «грунт-конструкція». За результатами сучасних додаткових сейсмологічних досліджень промислових майданчиків ЗАЕС і ПАЕС встановлені пікові значення прискорення горизонтальної складової руху ґрунту під час МРЗ [4], які становлять 0,17 g та 0,12 g відповідно. Отже,

дослідження НДС сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм проведено саме для цих майданчиків АЕС.

Як сейсмічні прискорення від землетрусу використані огинаючі поверхові спектри відгуку у трьох взаємно перпендикулярних напрямках сейсмічного впливу під час МРЗ на нижніх і верхніх відмітках РВ енергоблоків ЗАЕС і ПАЕС для 2% демпфування, побудовані на підставі даних [18–23]. Методика побудови огинаючих поверхових спектрів відгуку представлена у статті [4]. На підставі розроблених огинаючих поверхових спектрів відгуку визначені діапазони значень прискорень у трьох взаємно перпендикулярних напрямках сейсмічного впливу, які передаватимуться на сталеву опорну конструкцію (для випадків її розташування на різних висотних відмітках РВ) під час МРЗ на майданчиках ЗАЕС і ПАЕС. Нижче, на рис. 1 та 2, наведені приклади розрахованих огинаючих діапазонів (виділені затемненням) згаданих значень прискорень [4].

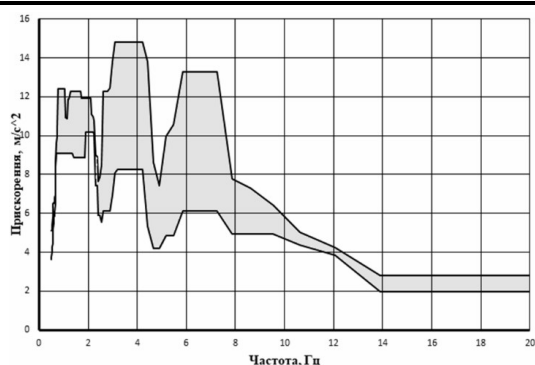


Рис. 1. Огинаючі діапазони значень прискорень РВ енергоблоків ЗАЕС для горизонтального напрямку X і 2% демпфування

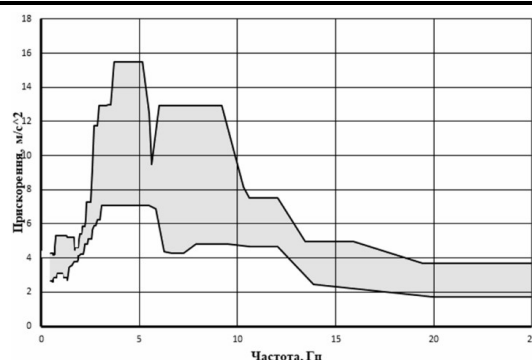


Рис. 2. Огинаючі діапазони значень прискорень РВ енергоблоків ПАЕС для горизонтального напрямку X і 2% демпфування

Під час досліджень використано ЛСМ і враховано одночасне навантаження за трьома просторовими взаємно перпендикулярними складовими сейсмічного впливу (двома горизонтальними й вертикальним).

Номенклатура навантажень, врахованих у дослідженні НДС сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм, а також розрахункові сполучення навантажень прийняті аналогічними тим, які наведені у статті [4], на підставі підходів, розроблених у статті [24].

Розробка скінчено-елементних моделей сталевих опорних конструкцій

Скінчено-елементні моделі сталевих опорних конструкцій складаються з 3-D 3-вузлового елемента ВЕАМ 189, який має шість ступенів свободи у кожному вузлі (три переміщення і три повороти), і рекомендується для аналізу складених конструкцій, тобто тих, що виготовлені з двох або більше елементів, з'єднаних між собою [25]. На рис. 3 представлені розроблені тривимірні моделі сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм.

Як граничні умови в місцях кріплення сталевих опорних конструкцій до конструктивної основи (підлога, стіна або стеля) прийняті такі:

– переміщення (U) і моменти (M) заборонені у всіх трьох напрямках, тобто $U_x=U_y=U_z=0$, $M_x=M_y=M_z=0$ (далі – ГУ 1);

– переміщення у всіх трьох напрямках заборонені, а моменти – дозволені, тобто $U_x=U_y=U_z=0$, $M_x \neq 0$, $M_y \neq 0$, $M_z \neq 0$ (далі – ГУ 2).

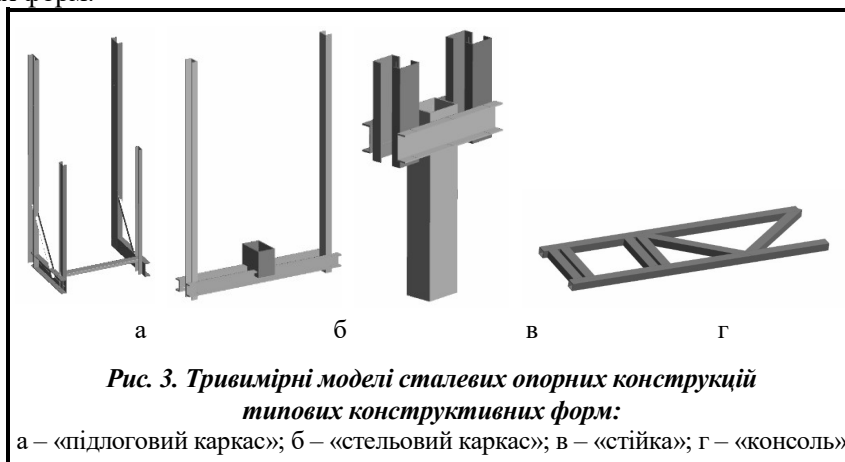


Рис. 3. Тривимірні моделі сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм:

а – «підлоговий каркас»; б – «стельовий каркас»; в – «стійка»; г – «консоль»

Із метою визначення оптимального розміру скінченого елемента під час дослідження НДС для кожної сталеві опорної конструкції проаналізовано результати розрахунків на трьох різних скінчено-елементних сітках. Встановлення розміру скінченого елемента здійснювалося під час навантаження кожної сталеві опорної конструкції сейсмічними впливами у вигляді поверхових спектрів відгуку. Остаточний вибір скінчено-елементної сітки проводився на підставі результатів розрахунку інтенсивності напружень за четвертою теорією міцності для різних сіток. Обрано ту скінчено-елементну сітку, яка забезпечує прийнятну збіжність результатів (див. наприклад [4]).

Результати досліджень динамічних характеристик і напружено-деформованого стану сталевих опорних конструкцій для випадку ГУ 1

У табл. 1 представлені значення частот власних коливань сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм. При цьому кількість мод власних коливань обмежена значенням прискорення нульового періоду відповідних поверхових спектрів відгуку РВ ЗАЕС і ПАЕС. Під прискоренням нульового періоду розуміємо [5] діапазон частот, для якого при будь-якому демпфуванні сейсмічні прискорення на поверховому спектрі відгуку стають незмінними (див., наприклад, на рис. 2 незмінні значення сейсмічних прискорень у діапазоні частот від 20 Гц до 25 Гц).

На рис. 4 зображені перші моди власних коливань сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм.

Таблиця 1. Значення частот власних коливань сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм для випадку ГУ 1

Номер моди власних коливань	Значення частот власних коливань конструкцій, Гц			
	«підлоговий каркас»	«стельовий каркас»	«консоль»	«стійка»
1	6,9466	18,0073	17,2897	71,7016
2	20,9732	21,8154	80,1230	–
3	21,9799	30,3552	–	–
4	36,4633	–	–	–

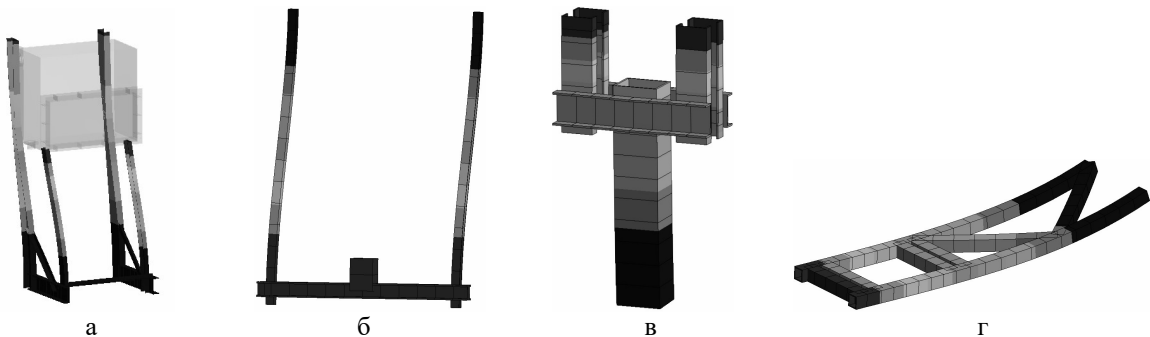


Рис. 4. Перші моди власних коливань сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм для випадку ГУ 1:

а – «підлоговий каркас»; б – «стельовий каркас»; в – «стійка»; г – «консоль»

В табл. 2 наведені результати дослідження НДС сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм. При цьому у цих таблицях прийняті такі умовні позначення: «ЗАЕС (низ)», «ЗАЕС (верх)» – відповідає сполученню навантажень «Огинаючі спектри відгуку на нижніх/верхніх відмітках РВ ЗАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання/трубопроводу». По відношенню до ПАЕС позначення прийняті аналогічними з урахуванням того, що розглядається РВ енергоблоків ПАЕС із власними сейсмічними навантаженнями (поверховими спектрами відгуку).

На рис. 5 як приклади представлені ізополі інтенсивності напружень σ_{int} при сейсмічних навантаженнях сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм у випадку їх розташування на верхніх відмітках РВ ЗАЕС і ПАЕС.

Таблиця 2. Результати досліджень НДС сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм для випадку ГУ 1

Навантаження	Максимальні напруження, МПа			
	«підлоговий каркас»	«стельовий каркас»	«стійка»	«консоль»
ЗАЕС (низ)	44,35	3,73	0,53	1,50
ЗАЕС (верх)	96,16	5,48	0,86	2,56
ПАЕС (низ)	31,05	3,53	0,39	1,11
ПАЕС (верх)	93,50	9,24	1,09	3,35

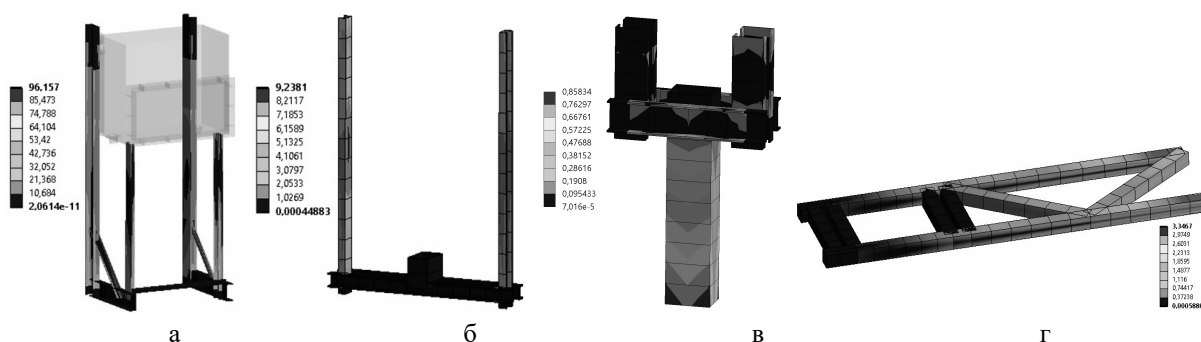


Рис. 5. Приклади ізополів інтенсивності напружень σ_{int} (МПа) у випадку розташування сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм на верхніх відмітках РВ ЗАЕС і ПАЕС для випадку ГУ 1: а – «підлоговий каркас» для випадку ЗАЕС (верх); б – «стельовий каркас» для випадку ПАЕС (верх); в – «стійка» для випадку ЗАЕС (верх); г– «консоль» для випадку ПАЕС (верх)

Результати досліджень динамічних характеристик і напружено-деформованого стану сталевих опорних конструкцій для випадку ГУ 2

На підставі отриманих результатів чисельних досліджень динамічних характеристик і НДС при сейсмічних навантаженнях сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм при ГУ 1 для подальших досліджень для випадку ГУ 2 обрані конструкції типових конструктивних форм «підлоговий каркас» і «стельовий каркас» за такими критеріями:

- найнижчі значення частот власних коливань;
- найбільша кількість перших частот власних коливань у діапазоні до значення прискорення нульового періоду;
- найбільші значення сейсмічних навантажень;
- найбільші значення напружень в конструкції від сейсмічних навантажень.

У табл. 3 представлені значення частот власних коливань сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм «підлоговий каркас» і «стельовий каркас». При цьому кількість мод власних коливань, як і для випадку ГУ 1, обмежена значенням прискорення нульового періоду відповідних поверхових спектрів відгуку РВ ЗАЕС і ПАЕС.

На рис. 6 зображені перші моди власних коливань сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм «підлоговий каркас» і «стельовий каркас».

В табл. 4 наведені результати досліджень НДС сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм «підлоговий каркас» і «стельовий каркас». При цьому умовні позначення в цій таблиці прийняті аналогічними випадку ГУ 1.

На рис. 7 як приклади представлені ізополя інтенсивності напружень σ_{int} при сейсмічних навантаженнях сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм «підлоговий каркас» і «стельовий каркас» у випадку їх розташування на верхніх відмітках РВ ЗАЕС та ПАЕС.

Таблиця 3. Значення частот власних коливань сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм «підлоговий каркас» і «стельовий каркас» для випадку ГУ 2

Номер моди власних коливань	Значення частот власних коливань конструкції, Гц	
	«підлоговий каркас»	«стельовий каркас»
1	6,5075	17,3399
2	20,1812	21,8154
3	20,9379	30,3551
4	36,4077	–

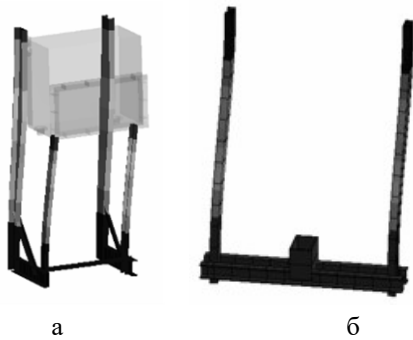


Рис. 6. Перші моди власних коливань сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм «підлоговий каркас» і «стельовий каркас» для випадку ГУ 2:
а – «підлоговий каркас»; б – «стельовий каркас»

Таблиця 4. Результати досліджень НДС сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм «підлоговий каркас» і «стельовий каркас» для випадку ГУ 2

Навантаження	Максимальні напруження, МПа	
	«підлоговий каркас»	«стельовий каркас»
ЗАЕС (низ)	45,17	6,80
ЗАЕС (верх)	97,96	9,63
ПАЕС (низ)	31,96	6,97
ПАЕС (верх)	95,25	17,25

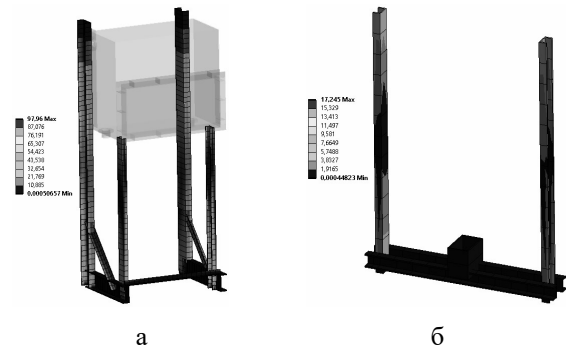


Рис. 7. Приклади ізополів інтенсивності напружень σ_{int} (МПа) у випадку розташування сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм «підлоговий каркас» і «стельовий каркас» на верхніх відмітках РВ ЗАЕС і ПАЕС для випадку ГУ 2:
а – «підлоговий каркас» для випадку ЗАЕС (верх);
б – «стельовий каркас» для випадку ПАЕС (верх)

Обговорення результатів

За результатами дослідження впливу зміни умов закріплення сталевих опорних конструкцій на їх сейсмічну міцність встановлено, що зміна ГУ 1 на ГУ 2 знижує значення частот власних коливань опорних конструкцій типових конструктивних форм, а саме: на 6,75% для «підлогового каркасу» і на 3,84% для «стельового каркасу». При цьому моди власних коливань сталевих опорних конструкцій також зазнають змін.

У абсолютних величинах зниження значень частот власних коливань сталевих опорних конструкцій (для різних мод власних коливань у діапазоні частот до значення прискорення нульового періоду) при заміні ГУ 1 на ГУ 2 знаходиться в межах від 0,4391 Гц до 1,042 Гц. Особливістю поверхових спектрів відгуку РВ ЗАЕС і ПАЕС є те, що, з одного боку, вони мають стрибкоподібні ділянки підвищення сейсмічних прискорень для певних значень частот (див. рис. 1 та 2). Для оцінки впливу цього ефекту на конструктивну безпеку сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм використаємо результуючі значення сейсмічних прискорень (a_i^{pec}), розраховані за правилом «Корінь квадратний з суми квадратів» (ККСК)

$$a_i^{pec} = \sqrt{a_x^2(f_i) + a_y^2(f_i) + a_z^2(f_i)} \quad (3)$$

де $a_x(f_i)$, $a_y(f_i)$, $a_z(f_i)$ – значення сейсмічних прискорень верхньої або нижньої огинаючої поверхового спектру відгуку ЗАЕС, ПАЕС для відповідної частоти, яка співпадає із значенням частоти власних коливань конструкції.

Отже, отримаємо, наприклад, що для РВ:

– ЗАЕС зниження значення власної частоти сталеві конструкції з 4,90 Гц до 4,22 Гц призводить до стрибкоподібного підвищення значення сейсмічного прискорення, розрахованого за правилом ККСК, з 12,4 м/с² до 20,97 м/с²;

– ПАЕС зниження значення власної частоти сталевій конструкції з 5,64 Гц до 5,18 Гц призводить до стрибкоподібного підвищення значення сейсмічного прискорення, розрахованого за правилом ККСК, з 20,09 м/с² до 25,59 м/с².

З іншого боку, на поверхових спектрах відгуку РВ ЗАЕС і ПАЕС присутні також ділянки стрибкоподібного зниження сейсмічних прискорень при зменшенні значень частот власних коливань конструкцій. Отже, зміна з ГУ 1 на ГУ 2 може як позитивно, так і вкрай негативно впливати на конструктивну безпеку сталевих опорних конструкцій.

Результати досліджень також свідчать, що зміна з ГУ 1 на ГУ 2, серед іншого, призводить до певного збільшення сейсмічних напружень внаслідок зменшення загальної жорсткості конструкції.

Отримані результати дають підставу рекомендувати при проектуванні сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків АЕС виконувати аналіз їх динамічних характеристик для випадків ГУ 1 ($U_x=U_y=U_z=0$, $M_x=M_y=M_z=0$) та ГУ 2 ($U_x=U_y=U_z=0$, $M_x\neq 0$, $M_y\neq 0$, $M_z\neq 0$). Остаточо рекомендується приймати ті умови закріплення, які забезпечують передачу найменших сейсмічних прискорень на сталеві опорні конструкції.

При розгляді існуючих сталевих опорних конструкцій заміну ГУ 1 на ГУ 2 або, навпаки, ГУ 2 на ГУ 1 можна розглядати як дієвий інструмент зміщення значень частот власних коливань від пікових значень сейсмічних прискорень на поверховому спектрі відгуку, що позитивно вплине на сейсмічну міцність сталевих опорних конструкцій.

Висновки

1. Досліджено динамічні характеристики, а також встановлено закономірності НДС сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків АЕС України під час зміни умов їх закріплення на конструктивній основі.

Встановлено, що зміна умов закріплення з ГУ 1 на ГУ 2:

– знижує значення частот власних коливань сталевих опорних конструкцій. При цьому моди власних коливань конструкцій також зазнають змін;

– призводить до певного збільшення сейсмічних напружень внаслідок зменшення загальної жорсткості конструкції.

2. Особливістю поверхових спектрів відгуку РВ ЗАЕС і ПАЕС є те, що вони мають стрибкоподібні ділянки зміни сейсмічних прискорень для певних значень частот. Отже, зміна динамічних характеристик сталевих опорних конструкцій, внаслідок зміни умов їх закріплення, може як позитивно, так і вкрай негативно впливати на конструктивну безпеку сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків АЕС під час сейсмічних навантажень.

3. Отримані результати досліджень дозволили розробити рекомендації стосовно підходів до оцінки міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків АЕС, дотримання яких дозволить підвищити їх конструктивну безпеку під час сейсмічних навантажень.

4. Напрацювання в подальшому будуть використані під час розробки методики оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків АЕС, яка враховує специфічні умови їх експлуатації та ступень відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час і після сейсмічних впливів.

Література

1. Рижов Д., Шугайло О-р, Сахно О., Павлів Є., Буряк Р., Шугайло О-й, Поночовний О., Мустафін М., Зелений О., Підгасцький Т. Оцінка сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій / під ред. Д. Рижова. Київ: ДНТЦ ЯРБ, 2022. 144 с.
2. 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*. 2020. № 1 (85). С. 56–61. [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.1\(85\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.1(85).06).
3. 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*. 2021. № 4 (92). С. 4–11. [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4\(92\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4(92).01).
4. Shugaylo O-r 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. No. 3 (95). P. 15–26. [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).02).

5. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. Санкт-Петербург: Наука, 1998. 255 с.
6. Немчинов Ю. И. Сейсмостойкость зданий и сооружений. Киев: ФОП Гудименко С.В., 2008. 480 с.
7. Немчинов Ю. И., Марьенков Н. Г., Хавкин А. К., Бабик К. Н. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости / под ред. Ю. И. Немчинова. Киев: ООО «Украинский центр полиграфии и рекламы», 2012. 384 с.
8. Гордеев В. Н., Лантух-Лященко А. И., Махинько А. В., Пашинский В. А., Перельмутер А. В., Пичугин С. Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / под общей ред. А. В. Перельмутера. Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 482 с.
9. Калиберда И. В. Оценка параметров внешних воздействий природного и техногенного происхождения. Москва: Логос, 2002. 544 с.
10. Методика расчетного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости. МТ-Т.0.03.326-13. Киев: ГП «НАЭК «Энергоатом», 2013. 51 с.
11. ANSYS Mechanical. Theory reference. ANSYS, Inc. Release 2022 R1, 2022. 938 p.
12. Нілов О. О., Пермяков В. О., Шимановський О. В., Білик С. І., Лавріненко Л. І., Белов І. Д., Володимирський В. О. Металеві конструкції. Видання друге, перероблене та доповнене. Київ: «Сталь», 2010. 869 с.
13. ДБН В 2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Державні будівельні норми України. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 199 с.
14. Шугайло О-р 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. [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1\(93\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(93).07).
15. Бауск Е. А., Бауск А. Е. Технический отчет. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Анализ динамического взаимодействия грунт-конструкция энергоблоков №1, 2 ОП «Запорожская АЭС». 75.120-00.01.01-10-14-ПР. Днепропетровск: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2014. 332 с.
16. Бауск Е. А., Переясловец С. А. Технический отчет. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Расчет сейсмических параметров (поэтажных акселерограмм и спектров ответа) и оценка сейсмостойкости зданий и сооружений, содержащих оборудование СВБ энергоблоков №№ 3, 4 Запорожской АЭС. Анализ динамического взаимодействия грунт-конструкция. 75.107-00.01.01-06-15-ПР. Днепропетровск: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2016. 216 с.
17. Бауск Е. А., Переясловец С. А. Технический отчет. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Расчет сейсмических параметров (поэтажных акселерограмм и спектров ответа) и оценка сейсмостойкости зданий и сооружений, содержащих оборудование СВБ энергоблоков №№ 5, 6 Запорожской АЭС. Анализ динамического взаимодействия грунт-конструкция. 75.111-00.01.01-09-17-ПР. Днепропетровск: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2017. 207 с.
18. Седин В. Л., Бауск Е. А., Бауск А. Е. Отчет о результатах работы по теме: «Получение расчетных обоснований поэтажных спектров ответа и максимальных ускорений от сейсмических воздействий для отметок установленного оборудования первой очереди, которое подлежит квалификации». 01.00-22.1965-01. Объекты первой очереди ЮУ АЭС. Расчетное обоснование поэтажных спектров ответа при квалификации оборудования на сейсмическое воздействие 0,12g. 01.00-22.1965-01. Днепропетровск: ОАО «Фундаментстроймакс», 2011. 85 с.
19. Седин В. Л., Бауск Е. А., Бауск А. Е. Отчет о результатах работы по теме: «Получение расчетных обоснований поэтажных спектров ответа и максимальных ускорений от сейсмических воздействий для отметок установленного оборудования второй очереди, которое подлежит квалификации». 02.00-22.1965-01. Объекты второй очереди ЮУ АЭС. Расчетное обоснование поэтажных спектров ответа при квалификации оборудования на сейсмическое воздействие 0,12g. 02.00-22.1965-01. Днепропетровск: ОАО «Фундаментстроймакс», 2012. 105 с.
20. Бауск Е. А., Бауск А. Е. Технический отчет. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Построение комплекса поэтажных спектров ответа и максимальных ускорений зданий и сооружений энергоблоков №№ 1, 2 ОП «Запорожская АЭС» от обобщенного сейсмического воздействия вероятностного и детерминистического методов. Книга 2.1. Результаты расчета поэтажных спектров реакции сооружений РО-1, РО-2. 75.120-10.03.02-05-14-ПР. Днепропетровск: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2014. 210 с.
21. Бауск Е. А., Переясловец С. А. Технический отчет. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Построение комплекса поэтажных акселерограмм и спектров от-

- вета для зданий и сооружений энергоблоков № 3 и № 4. Книга 2. Результаты расчета поэтажных спектров ответа здания РО-3. 75.107-00.03.02-10-15-ПР. Днепропетровск: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2016. 404 с.
22. Бауск Е. А., Переясловец С. А. Технический отчет. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Построение комплекса поэтажных акселерограмм и спектров ответа для зданий и сооружений энергоблоков № 3 и № 4. Книга 3. Результаты расчета поэтажных спектров ответа здания РО-4. 75.107-00.03.03-10-15-ПР. Днепропетровск: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2016. 403 с.
23. Бауск Е. А., Переясловец С. А. Технический отчет. Обеспечение сейсмостойкости элементов, систем и сооружений, важных для безопасности. Построение комплекса поэтажных акселерограмм и спектров ответа для зданий и сооружений энергоблоков № 5 и № 6. Книга 2. Результаты расчета поэтажных спектров ответа зданий РО-5, РО-6. 75.111-00.03.02-12-17-ПР. Днепро: Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, 2018. 405 с.
24. Shugaylo O-r P., Bilyk S. I. 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. No. 3. P. 6–15. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.006>.
25. ANSYS Mechanical. Element reference. ANSYS, Inc. Release 2022 R1, 2022. 1474 p.

Надійшла до редакції 23.10.2022