

УДК 624.014, 621.039.58

## ОСОБЛИВОСТІ СКЛАДАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ СПОЛУЧЕНЬ НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ ОЦІНЦІ СЕЙСМІЧНОЇ МІЦНОСТІ СТАЛЕВИХ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ І ТРУБОПРОВОДІВ АТОМНИХ СТАНЦІЙ

<sup>1</sup> О. П. Шугайло[op\\_shugaylo@sstc.ua](mailto:op_shugaylo@sstc.ua)

ORCID: 0000-0003-1044-0299

<sup>2</sup> С. І. Білик, д-р техн. наук[bilyk.si@knuba.edu.ua](mailto:bilyk.si@knuba.edu.ua)

ORCID: 0000-0001-8783-5892

<sup>1</sup> Державне підприємство

«Державний науково-технічний центр

з ядерної та радіаційної безпеки»

03142, Україна, м. Київ, вул. В. Стуса, 35–37

<sup>2</sup> Київський національний університет

будівництва і архітектури

03037, Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31

*Сейсмостійкість обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних станцій визначається в тому числі й сейсмостійкістю їх сталевих опорних конструкцій. При експлуатації енергоблока атомної станції на сталеві опорні конструкції обладнання і трубопроводів передаються механічні навантаження від елементів, які на них встановлені. При землетрусі до цих навантажень додаються також сейсмічні. Відповідно до державних будівельних норм під час розгляду сталевих конструкцій, що знаходяться в особливих умовах експлуатації (зокрема, піддані сейсмічним впливам), необхідно дотримуватися додаткових вимог, які відображають особливості їх роботи. З огляду на це актуальним є питання розробки підходів до складання розрахункових сполучень навантажень при оцінці сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних станцій з урахуванням специфічних умов їх експлуатації. Крім того, актуальність роботи зумовлена також тим, що згідно з чинним законодавством України вона належить до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки. Розробка підходів до складання розрахункових сполучень навантажень сприятиме покращенню та розвитку методів оцінки безпеки об'єктів атомної енергетики. У статті наведено результати огляду положень державних будівельних норм щодо розрахункових сполучень навантажень при оцінці міцності сталевих конструкцій. Розроблено підходи до складання розрахункових сполучень навантажень при оцінці сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних станцій, спираючись на специфічні умови їх експлуатації.*

**Ключові слова:** сталеві конструкції, сейсмічна міцність, розрахункові сполучення навантажень.

### Вступ

Сейсмостійкість обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних електростанцій (АЕС) визначається, в тому числі, сейсмостійкістю їх сталевих опорних конструкцій. Для виготовлення цих конструкцій загалом використовують балки двогаврові, швелери, кутики, профілі гнуті замкнені зварні квадратні та прямокутні для будівельних конструкцій (з прикладами опорних конструкцій елементів енергоблока АЕС можна ознайомитися в [1–2]). Дослідження роботи сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС при сейсмічних навантаженнях спрямовані на уточнення та вдосконалення підходів до оцінки їх сейсмічної міцності. Загалом результатом цієї діяльності є покращення та розвиток методів оцінки безпеки об'єктів атомної енергетики. Актуальність цього дослідження обумовлена також тим, що воно згідно:

– Закону України [3] відноситься до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки (а саме: «Енергетика та енергоефективність»);

– Постанови Кабінету Міністрів України [4] входить в перелік пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок (а саме: «Технології атомної енергетики та методи оцінки її безпеки»).

При експлуатації енергоблока АЕС в будь-якому проектному режимі на сталеві опорні конструкції обладнання і трубопроводів передаються механічні навантаження від елементів, які на них встановлені. При землетрусі на майданчику АЕС до цих навантажень додаються також сейсмічні. У статті [2] визначено, що оцінка сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.

© О. П. Шугайло, С. І. Білик, 2022

енергоблоків АЕС має виконуватися на підставі специфічних вимог, регламентованих нормами, правилами та стандартами з ядерної та радіаційної безпеки (зокрема, НП 306.2.208-2016 [5]), а також з урахуванням положень ДБН В 2.6-198:2014 [6], ДБН В.1.1-12:2014 [7], ДБН В.1.2-2:2006 [8], ДБН В.1.2-14:2018 [9]. Відповідно до ДБН В 2.6-198:2014 [6] під час розгляду сталевих конструкцій, що знаходяться в особливих умовах експлуатації (зокрема, піддані сейсмічним впливам), необхідно дотримуватися додаткових вимог, які відображають особливості роботи цих конструкцій.

Наразі зупинимося на детальному розгляді питання щодо складання розрахункових сполучень навантажень (РСН) при оцінці сейсмічної міцності розглядуваних сталевих опорних конструкцій. По відношенню до опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС документ НП 306.2.208-2016 [5] загалом регламентує лише вимоги до сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів. При цьому, питання встановлення детальних вимог до складання РСН при оцінці сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій не розглядається. Ситуація, що склалася, обумовлена сучасною концепцією розвитку нормативно-правової бази України щодо забезпечення безпеки АЕС, яка передбачає розробку та впровадження нормативно-правових актів, що містять загальні регулюючі вимоги.

Сталеві опорні конструкції обладнання та трубопроводів АЕС проектуються такими, щоб вони витримували одночасну дію таких специфічних навантажень як [5]:

- високі температури, що виникають в реакторному відділенні під час максимальної проектно-аварійної аварії на енергоблоці АЕС;
- впливи від обладнання та трубопроводів з відповідними внутрішніми середовищами (пар, вода, пароводяна суміш) в різних технологічних умовах експлуатації енергоблоку АЕС;
- сейсмічні впливи.

Зазначені фактори є вихідними даними для визначення розрахункових навантажень на опорні конструкції. Втім, зустрічаються не поодинокі випадки коли під час розрахунків цих конструкцій використані при оцінці їх сейсмічної міцності РСН не є достатньо повними, наприклад [10, 11]: в РСН включаються сейсмічні навантаження, які передаються на опорні конструкції від будівель, до яких вони закріплені, але поза увагою залишаються додаткові сейсмічні навантаження, які діють на опорні конструкції при сейсмічному збуренні обладнання та трубопроводів. Така ситуація виникає внаслідок відсутності чітких правил складання РСН, які враховують специфічні умови експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС.

Як показав аналіз джерел [12–19], у літературних і наукових працях питання складання РСН для сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АЕС, з урахуванням специфічних умов їх експлуатації, також не розглядається. Водночас, у статтях [1, 2, 20–22] розглянуті загальні аспекти визначення вказаних вище специфічних навантажень на елементи енергоблоків АЕС (в тому числі на опорні конструкції обладнання та трубопроводів), як, зокрема, підготовчий етап до складання РСН.

З урахуванням результатів вже виконаних робіт [1, 2, 20–22] актуалізувалася необхідність розробки детальних підходів до складання РСН при оцінці сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків АЕС з урахуванням специфічних умов їх експлуатації. Отже, метою статті є:

- огляд положень державних будівельних норм щодо РСН при оцінці міцності сталевих конструкцій;
- розробка детальних підходів до складання РСН при оцінці сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС з урахуванням специфічних умов їх експлуатації.

### **Огляд положень державних будівельних норм щодо розрахункових сполучень навантажень при оцінці міцності сталевих конструкцій**

Величини навантажень, схеми їх прикладання та умови врахування регламентуються [8, 9]. Просторовий розподіл навантажень загалом має досить складний характер. Внаслідок цього в інженерній практиці опис таких навантажень прийнято спрощувати за рахунок введення простіших за структурою навантажень (наприклад: рівномірно розподілених по поверхні або зосереджених). Водночас, це спрощення має забезпечувати такий самий вплив навантаження на конструкцію, що й навантаження зі складною просторовою конструкцією [23].

Згідно з [8, 9] при розрахунку міцності сталевих конструкцій механічні навантаження розглядаються як сукупність сил (силових факторів і впливів) прикладених до конструкції, у тому числі вимушені переміщення та додаткові деформації елементів конструкції. Навантаження немеханічного походження (наприклад, вплив агресивного середовища), як правило, враховуються в розрахунку опосередковано, наприклад за допомогою відповідних коефіцієнтів надійності.

Залежно від причин виникнення навантаження та впливи прийнято розділяти на основні та епізодичні. При цьому, основні навантаження загалом обумовлюються технологічними процесами, а епізодичні – небажаним результатом людської діяльності, несприятливим збігом обставин, екстремальними природними явищами.

Навантаження і впливи залежно від змінюваності у часі поділяються на постійні й змінні. Останні залежно від тривалості неперервної дії поділяються на тривалі, короткочасні та епізодичні. До тривалих навантажень і впливів належать такі, для яких тривалість порівняна зі строком експлуатації конструкції, до короткочасних – такі, для яких тривалість значно менша в порівнянні зі строком експлуатації. Встановлений строк експлуатації конструкції приймається згідно з проектною та експлуатаційною документацією на конструкцію.

До постійних навантажень відносять: вагу частин споруд, у тому числі вагу несучих й огорожувальних конструкцій; вагу і тиск ґрунтів (насіпів, засипок), гірничий тиск.

До змінних тривалих навантажень належать: вага стаціонарного обладнання, трубопроводів з арматурою, опорними частинами та ізоляцією, а також вага рідких та твердих речовин, що заповнюють обладнання; тиск газів, рідин та сипучих тіл у місткостях та трубопроводах, надлишковий тиск; температурні технологічні впливи від стаціонарного обладнання; вага шару води на водонаповнених плоских покриттях; вага відкладень промислового пилу, якщо його накопичення не виключене відповідними заходами.

До змінних короткочасних навантажень відносять такі, як: навантаження від обладнання, що виникають у пускозупинному, перехідному та випробувальному режимах, а також під час його перестановки чи заміни; корисні та технологічні навантаження; навантаження від рухомого підйомно-транспортного обладнання та мостових і підвісних кранів, а також навантаження, які виникають при виготовленні, зберіганні, транспортуванні та монтажі конструкцій.

До епізодичних навантажень належать: сейсмічні впливи; вибухові впливи; навантаження, викликані різкими порушеннями технологічного процесу, тимчасовою несправністю чи руйнуванням обладнання; впливи, обумовлені деформаціями основи, які супроводжуються докорінною зміною структури ґрунту (при замочуванні просадкових ґрунтів) або його осіданням у районах гірничих виробок і в карстових районах.

РСН формуються як набір їх розрахункових значень або відповідних їм зусиль та/або переміщень, що використовується для перевірки конструкції у певному граничному стані і в певній розрахунковій ситуації. До РСН включають навантаження, які фізично можуть діяти одночасно та найбільш несприятливо впливають на конструкцію з точки зору граничного стану, що розглядається. В розрахунках конструкцій використовуються сполучення двох типів: основні та аварійні. При цьому, до аварійного сполучення крім постійних і змінних навантажень може входити тільки один епізодичний вплив.

Мала імовірність одночасної реалізації розрахункових значень декількох навантажень враховується множенням розрахункових значень навантажень, що увійшли до РСН, на коефіцієнт сполучення  $\psi \leq 1$ . Значення коефіцієнтів сполучень для навантажень приведені в таблиці 1 [8, 23, 24].

В основних сполученнях навантажень при врахуванні трьох та більше короткочасних навантажень їхні розрахункові значення допускається множити на коефіцієнт сполучення навантажень, який приймається для першого (за ступенем впливу) короткочасного навантаження – 1,0, для другого – 0,8, для решти – 0,6.

При розрахунках використовують також коефіцієнт надійності за навантаженням  $\gamma_f$ , що встановлюється з урахуванням виду навантаження та залежить від терміну експлуатації конструкції. Розрахункові значення навантажень визначаються множенням характеристичних значень на коефіцієнт надійності за навантаженням.

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів сполучень для навантажень

Сполучення та навантаження, що входять до них	Коефіцієнт сполучень $\psi$ для навантажень			
	постійних	тривалих ( $\psi_1$ )	короткочасних ( $\psi_2$ )	епізодичних
1) Основні:				
1.1) постійні + 1 тривале	1,0	1,0	–	–
1.2) постійні ++ 1 короткочасне	1,0	–	1,0	–
1.3) постійні+ тривалі + короткочасні	1,0	0,95	0,9	–
2) Аварійне				
2.1) постійні+ тривалі + короткочасні+ епізодичні	1,0	0,95	0,8	1,0

### Розробка детальних підходів до складання розрахункових сполучень навантажень при оцінці сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС з урахуванням специфічних умов їх експлуатації

Проектні режими експлуатації енергоблоку АЕС встановлені типовим технологічним регламентом безпечної експлуатації енергоблоку [25]. В цьому документі визначені також допустимі кількості відповідних режимів експлуатації енергоблоку АЕС. Загалом експлуатація енергоблоку АЕС може бути здійснена в таких групах проектних режимів: нормальна експлуатація (НЕ), порушення нормальної експлуатації (ПНЕ), проектна аварія (ПА). По відношенню до АЕС вказані терміни використовуються у таких значеннях [26]:

– нормальна експлуатація – експлуатація АЕС у визначених проектом експлуатаційних межах і умовах (наприклад: плановий розігрів реакторної установки з «холодного» стану при значенні швидкості не більше 20°C/годину; хибне спрацювання аварійного захисту реактора; включення ГЦН на петлі головного циркуляційного контуру, яка раніше не працювала; опробування пасивного вузла системи аварійного охолодження активної зони реактора; планове розхолодження до «холодного» стану при значенні швидкості розхолодження не більше 30°C/годину тощо [25]);

– порушення нормальної експлуатації – порушення в роботі АЕС, за якого сталося відхилення від установлених експлуатаційних меж і умов, яке не призвело до аварійної ситуації (наприклад: знеструмлення ГЦН в стані реакторної установки «Робота на потужності»; припинення подачі живильної води в парогенератор; режим течі парогенератора: розрив теплообмінної трубки; раптовий перехід на підживлення першого контуру з температурою живильної води в діапазоні значень від 60 °C до 70 °C; повне знеструмлення АЕС; раптовий перехід на підживлення першого контуру з температурою живильної води в діапазоні значень від 60 °C до 70 °C тощо [25]);

– проектна аварія – аварія, для якої проектом визначені вихідні події і кінцеві стани та передбачені системи безпеки, що забезпечують з урахуванням принципу одиничного відмовлення системи (каналу системи) безпеки або однієї додаткової помилки персоналу, обмеження її наслідків установленими межами (наприклад: розрив трубопроводів першого контуру номінальним діаметром менше 100 мм; режим великої течі: розрив трубопроводу першого контуру номінальним діаметром більше 100 мм, включаючи діаметр 850 мм; розрив паропроводу парогенератора; розрив трубопроводу живильної води парогенератора; розрив колектора паропроводів «гострої» пари тощо [25]).

У таблиці 2 наведені вимоги [5] до сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів для тепломеханічного обладнання, трубопроводів та їх опорних конструкцій енергоблоку АЕС.

При цьому у сполученнях технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів НЕ + ПА + МРЗ та НЕ + ПА + ПЗ під навантаженнями НЕ йдеться про постійні навантаження (наприклад, від власної ваги).

Таблиця 2. Сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів для тепломеханічного обладнання, трубопроводів та їх опорних конструкцій енергоблоку АЕС

Категорія сейсмостійкості елементу АЕС	Сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів згідно з НП 306.2.208-2016 [5]
I	НЕ + МРЗ
	ПНЕ + МРЗ
	НЕ + ПА + МРЗ
	НЕ + ПА + ПЗ
	НЕ + ПЗ
II	ПНЕ + ПЗ
	НЕ + ПЗ

Прийняті в таблиці позначення:  
ПЗ – проектний землетрус; МРЗ – максимальний розрахунковий землетрус

Як відзначено вище, при експлуатації енергоблока АЕС в будь-якому проектному режимі на сталеві опорні конструкції обладнання та трубопроводів передаються механічні навантаження від елементів, які на них встановлені. Вивчення джерел [25, 27] дозволило дослідити та сформулювати номенклатуру розрахункових навантажень, яким піддані сталеві опорні конструкції обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС в групах режимів НЕ, ПНЕ та ПА. При цьому, вперше розроблена розгорнута система умовних позначень навантажень, яка враховує специфічні умови експлуатації саме сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС. Ця система умовних позначень однозначно характеризує вид навантаження для забезпечення коректного складання РСН. Отже, прийнято такі складові умовного позначення: L (Load) – навантаження; R (Regular) – постійне; W (Weight) – вага; VL (Variables Long) – змінне тривале; THI (Thermal Isolation) – теплова ізоляція; I (Internal) – внутрішнє середовище; VSH (Variables Short) – змінне короткочасне; T (Transient) – навантаження в перехідному режимі; E (Episodic) – епізодичне навантаження; SM (Seismic Maximum) – навантаження від МРЗ; SD (Seismic Design) – навантаження від ПЗ; А (Accident) – навантаження від ПА.

Дія сейсмічного впливу за трьома компонентами (двома горизонтальними та вертикальним) розглядається як одне епізодичне навантаження. Розроблена номенклатура розрахункових навантажень, а також їх умовні позначення наведені в таблиці 3.

**Таблиця 3. Номенклатура розрахункових навантажень, яким піддані сталеві опорні конструкції обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС в групах режимів НЕ, ПНЕ та ПА**

№ з/п	Опис навантаження	Умовне позначення навантаження
<b>Основні навантаження</b>		
<u>Постійні:</u>		
1	Власна вага опорної конструкції	LR1W
<u>Змінні тривалі:</u>		
2	Вага обладнання/трубопроводу	LVL1W
3	Вага теплової ізоляції обладнання/трубопроводу	LVL2THIW
4	Навантаження від середовища обладнання/трубопроводу при НЕ	LVL3IW
<u>Змінні короткочасні:</u>		
5	Навантаження від обладнання/трубопроводу у пускозупинному та випробувальних режимах	LVSH1TW
6	Навантаження від середовища обладнання/трубопроводу у перехідному режимі (ПНЕ)	LVSH2TW
<b>Епізодичні навантаження</b>		
7	Сейсмічні навантаження, що передаються від будівельних конструкцій при МРЗ	LE1SM
8	Сейсмічні навантаження, що передаються від будівельних конструкцій при ПЗ	LE2SD
9	Сейсмічні навантаження, що передаються від обладнання/трубопроводу при МРЗ	LE3SM
10	Сейсмічні навантаження, що передаються від обладнання/трубопроводу при ПЗ	LE4SD
11	Навантаження від середовища обладнання/трубопроводу при ПА	LE5IAW

Згідно з [8] при визначенні навантаження від ваги конструкції коефіцієнт  $\gamma_f$  для металевих конструкцій приймається рівним 1,05, якщо зусилля від власної ваги менші 50% та 1,10, якщо дорівнюють або перевищують 50%. Водночас, для інших навантажень з таблиці 3 коефіцієнт  $\gamma_f$  повинен прийматися рівним одиниці, оскільки в [8] він не регламентований для цих специфічних видів навантажень сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС.

Встановлення числових значень зміни параметрів внутрішнього середовища (зокрема, тиску), а також його агрегатного стану (пар, вода, паро-водяна суміш) конкретних обладнання та трубопроводів при ПНЕ та ПА виконується та підставі розгляду проектно-конструкторської, технологічної та експлуатаційної документації (аналізів проектних аварій, карт уставок захистів та блокувань, інструкцій з експлуатації, паспортів елементів тощо) [21].

При складанні РСН прийняті такі передумови та підходи:

– припускається, що всі навантаження в обраному РСН одночасно впливають на опорні конструкції обладнання та трубопроводів;

– до РСН входять навантаження, які найбільш несприятливо впливають на опорні конструкції обладнання та трубопроводів;  
 – впливи, які взаємно виключають один одного, не входять до одного РСН;  
 – мала імовірність одночасної реалізації розрахункових значень декількох навантажень враховується коефіцієнтом сполучення  $\psi \leq 1$ , що визначається згідно [8].

Відповідно до [8] сейсмічні впливи та ПА відносяться до епізодичних впливів, тому для опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АЕС розглядається саме аварійне сполучення. При цьому, на виконання вимог [5] та на відміну від підходів [8] в аварійне сполучення включаються одночасно ці два епізодичні впливи.

Згідно з [5] до сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів не входять пускозупинні й випробувальні режими. Отже, до РСН не включається навантаження LVSH1TW. У таблиці 4 наведена номенклатура розроблених РСН для сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС з урахуванням специфічних умов їх експлуатації.

**Таблиця 4. Номенклатура розроблених РСН для сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС з урахуванням специфічних умов їх експлуатації**

Сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів	РСН для опорних конструкцій обладнання та трубопроводів
Опорні конструкції I категорії сейсмостійкості	
HE + MP3	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THI + 0,95 \times LVL3IW + 1,0 \times LE1SM + 1,0 \times LE3SM$
ПНЕ + MP3	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THIW + 0,8 \times LVSH2TW + 1,0 \times LE1SM + 1,0 \times LE3SM$
HE + ПА + MP3	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THIW + 1,0 \times LE5IAW + 1,0 \times LE1SM + 1,0 \times LE3SM$
HE + ПА + ПЗ	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THIW + 1,0 \times LE5IAW + 1,0 \times LE2SD + 1,0 \times LE4SD$
HE + ПЗ	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THIW + 0,95 \times LVL3IW + 1,0 \times LE2SD + 1,0 \times LE4SD$
ПНЕ + ПЗ	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THIW + 0,8 \times LVSH2TW + 1,0 \times LE2SD + 1,0 \times LE4SD$
Опорні конструкції II категорії сейсмостійкості	
HE + ПЗ	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THIW + 0,95 \times LVL3IW + 1,0 \times LE2SD + 1,0 \times LE4SD$
ПНЕ + ПЗ	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THIW + 0,8 \times LVSH2TW + 1,0 \times LE2SD + 1,0 \times LE4SD$

Під час розробки підходів до складання РСН встановлено, що режими ПНЕ на АЕС за підходами [8, 9] можуть бути віднесені до змінних короткочасних навантажень по відношенню до опорних конструкцій обладнання та трубопроводів. В цьому випадку під час складання сполучень навантажень з урахуванням сейсмічних впливів коефіцієнт сполучення  $\psi \leq 1$  має прийматися мінімальним з усіх можливих значень для основних та аварійного сполучень (див. таблицю 1), що зменшує консервативність результатів оцінки міцності опорних конструкцій. Це зменшення викликає певне занепокоєння з огляду на те, що в окремих режимах ПНЕ відбувається спрацювання систем безпеки енергоблоку АЕС, тобто систем до яких мають висуватися підвищені вимоги з безпеки. Отже, у подальших дослідженнях доцільно розробити рекомендації щодо коригування цього коефіцієнту для сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів систем безпеки, спрацювання яких відбувається в режимах ПНЕ на АЕС.

## Висновки

1. При експлуатації енергоблоку АЕС на сталеві опорні конструкції обладнання та трубопроводів передаються механічні навантаження від елементів, які на них встановлені. При землетрусі до

цих навантажень додаються також сейсмічні. З урахуванням викладеного виконано огляд положень державних будівельних норм щодо РСН при оцінці міцності сталевих конструкцій.

2. Визначена номенклатура розрахункових навантажень, яким піддані сталеві опорні конструкції обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС в групах режимів НЕ, ПНЕ та ПА. Вперше розроблена розгорнута система умовних позначень розрахункових навантажень, яка враховує специфічні умови експлуатації саме сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС.

3. Відповідно до [8] сейсмічні впливи та ПА відносять до епізодичних впливів, тому для опорних конструкцій обладнання і трубопроводів АЕС розглядається саме аварійне сполучення. При цьому, на виконання вимог [5] та на відміну від підходів [8] в аварійне сполучення включаються одночасно ці два епізодичні впливи. Отже, за результатами виконаних робіт розроблені підходи до складання РСН при оцінці сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС. На підставі цих підходів розроблено вже конкретну номенклатуру РСН для сталевих опорних конструкцій з урахуванням специфічних умов їх експлуатації.

Розроблені підходи до складання РСН та конкретна номенклатура РСН в подальшому будуть використані нами під час:

– чисельних досліджень (з використанням розрахункового комплексу ANSYS) напружено-деформованого стану сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АЕС при сейсмічних навантаженнях;

– розробки методики оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій, яка враховує специфічні умови їх експлуатації та ступень відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів.

4. Під час розробки підходів до складання РСН встановлено, що режими ПНЕ на АЕС за підходами [8, 9] можуть бути віднесені до змінних короткочасних навантажень по відношенню до опорних конструкцій обладнання та трубопроводів. В цьому випадку під час складання сполучень навантажень з урахуванням сейсмічних впливів коефіцієнт сполучення  $\psi \leq 1$  має прийматися мінімальним з усіх можливих значень для основних та аварійного сполучень, що зменшує консервативність результатів оцінки міцності опорних конструкцій. Це зменшення викликає певне занепокоєння з огляду на те, що в окремих режимах ПНЕ відбувається спрацювання систем безпеки енергоблоку АЕС, тобто систем до яких мають висуватися підвищені вимоги з безпеки. Отже, в подальших дослідженнях доцільно розробити рекомендації щодо коригування цього коефіцієнту для сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів систем безпеки, спрацювання яких відбувається в режимах ПНЕ на АЕС.

## Література

1. 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. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).01).
2. 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).
3. Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки : Закон України (із змін. від 01.02.2022 № 2031-ІХ).
4. Постанова Кабінету Міністрів України про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2021 року від 7 вересня 2011 р. за № 942 (із змін. від 21.04.2021 № 380).
5. 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.
6. 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.
7. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. Державні будівельні норми України. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 110 с.
8. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Державні будівельні норми України. Київ: Міністерство будівництва України, 2006. 75 с.
9. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Державні будівельні норми України.

- Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. 30 с.
10. Радько М. Розрахунок сейсмостійкості кріплення обладнання. ВП «Запорізька АЕС». 003/УАЕП-60-00-Р77. 2020 (проміжна редакція). Харків: ТОВ «УКРАТОМЕНЕРГОПРОЕКТ», 2020. 82 с.
  11. Радько М. Розрахунок сейсмостійкості кріплення обладнання. ВП «Южно-Українська АЕС». 025/УАЕП-60-00-Р323. 2021 (проміжна редакція). Харків: ТОВ «УКРАТОМЕНЕРГОПРОЕКТ», 2020. 43 с.
  12. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. Санкт-Петербург: Наука, 1998. 255 с.
  13. Калиберда И.В. Оценка параметров внешних воздействий природного и техногенного происхождения. Москва: Логос, 2002. 544 с.
  14. Барабаш М. С., Козлов С. В., Медведенко Д. В. Комп'ютерні технології проектування металевих конструкцій: навч. посібник. Київ: НАУ, 2010. 410 с.
  15. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. Киев: ФАКТ, 2007. 394 с.
  16. Nie J., Morante R., Miranda M. J., Braverman J. On the correct application of the 100-40-40 rule for combining responses due to three directions of earthquake loading. Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels & Piping Division / K-PVP Conference PVP2010, July 18–22, 2010, Bellevue, Washington, USA. Washington: ASME, 2010. P. 257–262. <https://doi.org/10.1115/PVP2010-25466>.
  17. Коньшин В. І., П'янков Т. О. Обґрунтування використання методології граничної сейсмостійкості при кваліфікації обладнання АЕС на сейсмостійкість. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 2 (44). С. 59–62.
  18. Гороп В. М., Перепичай А. А. Оценка граничной сейсмостойкости гермопроходок энергоблока № 2 Ровенской АЭС. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2015. № 4. С. 49–52. <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.04.07>.
  19. Бухта В.В., Крамар Г.М. Особливості проектування сейсмостійких сталевих конструкцій. *Актуальні задачі сучасних технологій: матеріали ІХ Міжнар. наук.-техніч. конф. молодих учених та студентів*. Тернопіль, 25–26 листопада 2020 р. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2020. С. 45.
  20. Буряк Р. Я., Рижов Д. І., Городніченко О. В., Шугайло О-р П., Шугайло О-й П., Мустафін М. А., Підгаєцький Т. В. Оцінка сейсмостійкості енергоблоків АЕС України із застосуванням положень НП 306.2.208-2016. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 2 (86). С. 13–19. [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.2\(86\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.2(86).02).
  21. 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*. 2021. № 3 (91). С. 5–10. [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3\(91\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3(91).01).
  22. 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).
  23. 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.
  24. Білик С.І., Шимановський О.В., Нілов О.О., Лавріненко Л.І., Володимирський В.О. Металеві конструкції: Том 2. Конструкції металевих каркасів промислових будівель: підруч. для вищ. навч. закладів. Кам'янець-Подільський: ТОВ «Друкарня «Рута», 2021. 448 с.
  25. РГ-Б.0.03.179-17 Типовой технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Киев: ГП «НАЭК «Энергоатом», 2017. 278 с.
  26. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. Затверджені наказом Держатомрегулювання від 19.11.2007 р. № 162, зареєстровані у Міністерстві юстиції України 25.01.2008 р. за № 56/14747 (зі змінами).
  27. Установка реакторная В-320. Техническое описание. 320.00.00.00.000ТО. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 1982. 149 с.

Надійшла до редакції 24.05.2022