

УДК 621.039.58:004.94

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРАНИЧНОЇ СЕЙСМОСТІЙКОСТІ ПРИ ОЦІНЦІ КОНСТРУКЦІЙ, СИСТЕМ ТА ЕЛЕМЕНТІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРАХУНКОВИХ КОМПЛЕКСІВ

**М. А. Мустафін**[ma\\_mystafin@sstc.com.ua](mailto:ma_mystafin@sstc.com.ua)

ORCID: 0000-0002-9340-6223

**Д. І. Рижов**[di\\_ryzhov@sstc.com.ua](mailto:di_ryzhov@sstc.com.ua)

ORCID: 0000-0002-0068-5009

**О-р П. Шугайло**[op\\_shugaylo@sstc.com.ua](mailto:op_shugaylo@sstc.com.ua)

ORCID: 0000-0003-1044-0299

**О-й П. Шугайло**[ap\\_shugaylo@sstc.com.ua](mailto:ap_shugaylo@sstc.com.ua)

ORCID: 0000-0003-0997-7830

**Р. Я. Буряк**[ry\\_buryak@sstc.com.ua](mailto:ry_buryak@sstc.com.ua)

ORCID: 0000-0002-8104-7956

**Т. В. Підгаєцький**[tv\\_pidhaietskyi@sstc.com.ua](mailto:tv_pidhaietskyi@sstc.com.ua)

ORCID: 0000-0002-4125-4846

**Я. Д. Круглій**[ya\\_krugliiy@sstc.com.ua](mailto:ya_krugliiy@sstc.com.ua)

ORCID: 0000-0002-2267-6007

Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки,  
03142, Україна, м. Київ, вул. Василя Стуса, 35-37, а/с 124

**Вступ**

Параметр HCLPF являє собою характеристику граничної сейсмостійкості конструкції, трубопроводу або обладнання, віднесено до пікового значення прискорення землетрусу на рівні ґрунту. В імовірнісному сенсі величина HCLPF визначається як 95%-а достовірність того, що виникнення відмови елемента виникне менш ніж в 5%. Визначення інтегрального показника граничної сейсмостійкості HCLPF систем та елементів першочергово обумовлено необхідністю подальшого використання цього показника при виконанні сейсмічного імовірнісного аналізу безпеки (СІАБ) енергоблоків АЕС України.

У межах виконання заходу 18101 «Забезпечення сейсмостійкості систем та будівельних конструкцій» «Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій» для енергоблоків АЕС України ДП НАЕК «Енергоатом» було розроблено низку звітних документів з результатами розрахунків сейсмостійкості згідно з підходами НП 306.2.208-2016 «Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій», «ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» та граничної сейсмостійкості (HCLPF) згідно з підходами «Методики расчетного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости. МТ-Т.0.03.326-13» (надалі – Методика МГС). Відповідно до основних положень Методики МГС визначення показника граничної сейсмостійкості HCLPF (High Confidence Low Probability of Failure – висока достовірність низької імовірності відмови) прийнято виконувати на основі аналізу напружено-деформованого стану елемента для зони з максимальним значенням сейсмічної складової напружень ( $\sigma_s$ ). Проте в рамках виконання державних експертиз з ядерної та радіаційної безпеки звітних документів ДП НАЕК «Енергоатом» було виявлено низку розрахункових випадків, коли вищезазначений підхід Методики МГС давав недостатньо консервативні результати розрахунків HCLPF. На цей час актуальним є визначення репрезентативних перерізів розрахункової моделі елементів, для яких має бути встановлений показник HCLPF. В статті на відповідному прикладі розглянутий розрахунковий випадок, який продемонстрував недостатній консерватизм результатів розрахунків HCLPF в разі обрання нерепрезентативного перерізу. Також розглянуті аспекти проведення аналізу граничної сейсмостійкості систем та елементів АЕС з використанням спеціалізованих інструментів сучасних розрахункових комплексів для уникнення помилок при визначенні репрезентативних перерізів.

**Ключові слова:** сейсмостійкість, гранична сейсмостійкість, коефіцієнт сейсмічного запасу, напруження, репрезентативний переріз.

© М. А. Мустафін, Д. І. Рижов, О-р П. Шугайло, О-й П. Шугайло, Р. Я. Буряк, Т. В. Підгаєцький, Я. Д. Круглій, 2020

В загальному випадку роботи з оцінки граничної сейсмостійкості систем та елементів АЕС розрахунковими методами виконуються у такій послідовності:

- розробка скінченноелементної моделі;
- виконання модального аналізу;
- оцінка сейсмічної міцності згідно з вимогами НП 306.2.208-2016 [1];
- визначення значень показника граничної сейсмостійкості HCLPF згідно з вимогами Методики МГС [2].

Для розрахунку сейсмічного відгуку досліджуваного елемента, в залежності від результатів модального аналізу, Методика МГС [2] регламентує вибір розрахункового методу. При цьому переважна більшість розрахункових випадків для систем та елементів АЕС (перша власна частота коливань в діапазоні до 20 Гц) проаналізовано на основі лінійно-спектрального методу (ЛСМ), який базується на припущенні, що елементи, які є предметом аналізу, працюють в лінійно-пружній області. Для зниження певного консерватизму при вищезазначеному підході (неврахування пружно-пластичної моделі поведінки конструкцій) в методиці МГС [2] прийнято застосовувати додатковий безрозмірний коефіцієнт непружного поглинання енергії  $F_\mu$ .

В практичних розрахунках для визначення значення HCLPF використовують коефіцієнт сейсмічного запасу FS, який відображає, у скільки разів треба збільшити інтенсивність сейсмічного впливу на ґрунті, для того щоб досягти допустимого значення параметра, що оцінюється

$$FS = \frac{C - D_{NS}}{(D_S^2 + D_{SAM}^2)^{\frac{1}{2}} + \delta C_S}, \quad (1)$$

де  $C$  – значення допустимого параметра (наприклад, допустимі напруження  $\sigma$  для розрахункового випадку сейсмічних впливів за ПНАЭ Г-7-002-86 [3], які дорівнюють 1,8 МПа);  $D_{NS}$  – складова всіх несейсмічних навантажень, що входить до параметра, який оцінюється, для комбінації навантажень, що розглядається (наприклад, цим значенням може бути  $\sigma_2$  – наведене розрахункове напруження від режиму навантаження нормальної експлуатації (НЕ), МПа);  $D_S$  – складова сейсмічних інерційних навантажень (при розрахунках за підходами ПНАЭ Г-7-002-86 [3], цим значенням є  $\sigma_s$  – наведене розрахункове напруження від дії максимального розрахункового землетрусу (МРЗ), МПа);  $D_{SAM}$  – складова від сейсмічного зміщення опор (в більшості випадків не застосовується);  $\delta C_S$  – зниження величини допустимого параметра через дію сейсмічного навантаження (в більшості випадків не застосовується).

Беручи до уваги наведене вище, при використанні підходів ПНАЭ Г-7-002-86 [3], для розрахунку коефіцієнта сейсмічного запасу FS для обладнання та трубопроводів, які працюють під тиском, формула (1) Методики МГС [2] набуває вигляду

$$FS = \frac{(1,8 [\sigma] - \sigma_2)}{(\sigma_s)}. \quad (2)$$

Кінцевий результат значення показника граничної сейсмостійкості HCLPF визначається з урахуванням коефіцієнта непружного поглинання енергії ( $F_\mu$ ) за формулою

$$HCLPF = FS \cdot F_\mu \cdot PGA_{MP3}, \quad (3)$$

де  $PGA_{MP3}$  – пікове прискорення ґрунту, або як його ще називають – прискорення нульового періоду на ґрунті при МРЗ, g.

Розрахунки сейсмостійкості систем та елементів енергоблоків АЕС України, як правило, виконуються з використанням таких програмних засобів структурного аналізу: ANSYS; АСТРА-АЭС, ЛІРА, dPipe, APM WinMachine. Всі ці розрахункові комплекси включені до переліку [4] розрахункових кодів, дозволених ДП НАЕК «Енергоатом» для обґрунтування безпеки ядерних установок.

### Формулювання проблеми

Враховуючи принцип необхідності сталого та систематичного підвищення якості розрахунків в сфері ядерної та радіаційної безпеки, а також стрімкий розвиток потужностей розрахункових платформ структурного інженерного аналізу та геометричних редакторів 3D моделювання, переважна більшість наведених в рамках робіт з оцінки сейсмостійкості розрахункових моделей складної геометричної форми систем та елементів АЕС (трубопровідні системи, арматура, фільтри, теплообмінники,

повітроводи, кабельні конструкції тощо) змодельовані комбінаціями тривимірних, стрижневих, твердотільних або пластинчастих елементів.

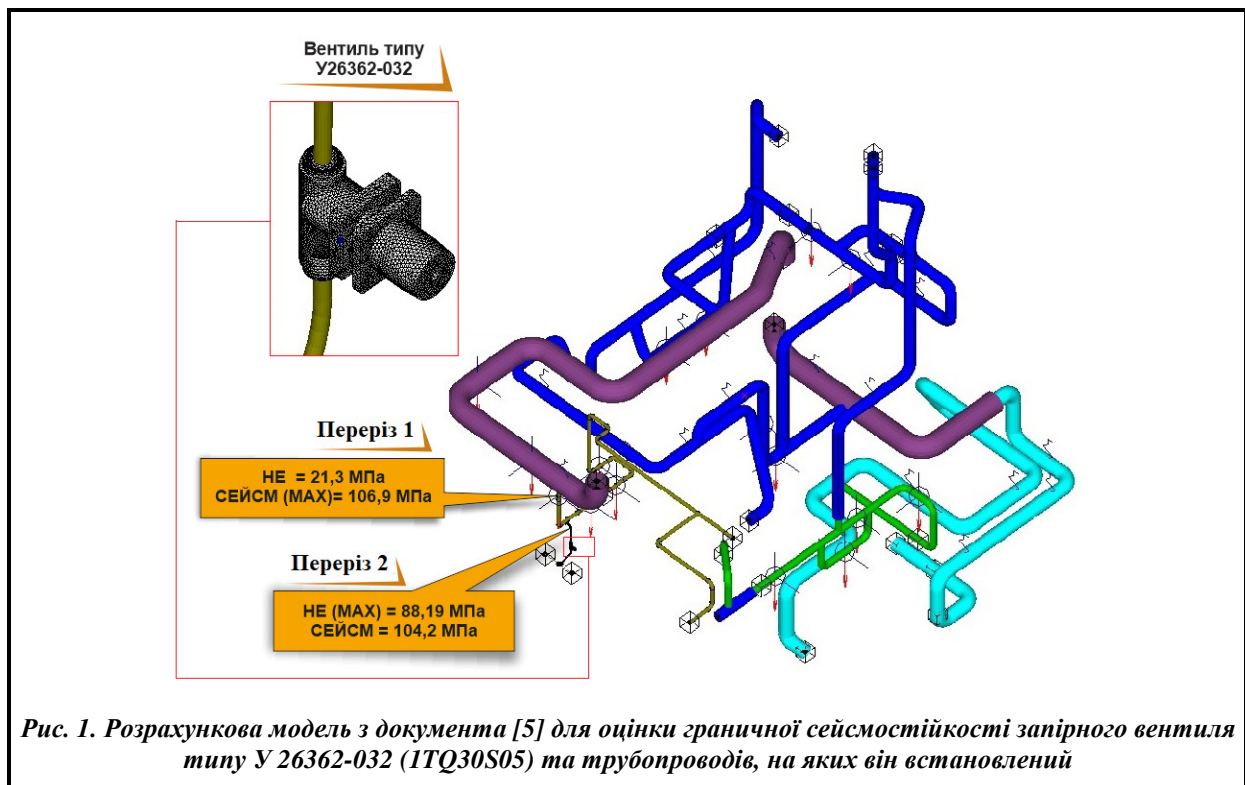
Відповідно до основних положень Методики МГС [2] визначення показника граничної сейсмостійкості HCLPF прийнято виконувати на основі аналізу напружено-деформованого стану (НДС) для зони з максимальним значенням внеску сейсмічної складової напружень ( $\sigma_s$ ). Проте на основі багаторічного досвіду проведення експертних перевірних розрахунків сейсмостійкості систем та елементів АЕС в рамках проведення державних експертиз ядерної радіаційної безпеки (ЯРБ) було виявлено низку розрахункових випадків, коли вищезазначений підхід методики МГС [2] до визначення коефіцієнта сейсмічного запасу FS (див. формулу (2)) не забезпечував достатнього рівня консерватизму.

Враховуючи все вищевикладене, актуальним предметом аналізу стає питання коректного вибору репрезентативних перерізів розрахункових моделей для визначення показника HCLPF з використанням формул (2)–(3).

### Розробка скінченноелементної моделі

Як приклад розглянемо розрахункове обґрунтування сейсмостійкості запірних вентилів типу У 26362-032 (див. рис. 1), яке наведено в документі ВП ХАЕС [5]. Звіт [5] проходив державну експертизу ЯРБ в ДНТЦ ЯРБ [6] та був доопрацьований ВП ХАЕС з урахуванням виявлених недоліків щодо коректного визначення величини HCLPF.

Досліджувані запірні вентиля типу У 26362-032 являють собою однотипне обладнання, виготовлене на одному заводі. Єдина відмінність – у трасуванні приєднаних трубопроводів. Тому за результатами аналізу розрахунків трубопровідних систем, на яких розташовується арматура типу У 26362-032, для подальшої оцінки сейсмостійкості був обраний типопредставник (оперативне маркування 1TQ30S05). Для коректного врахування роботи системи «трубопровід+привід» досліджувана модель побудована за принципом комбінованого підходу: трубопроводи змодельовані стрижневими елементами, арматури моделюються масами, а безпосередньо предмет аналізу – вентиль 1TQ30S05 – змодельований як об'ємна тривимірна модель. Досліджувана скінченноелементна модель змодельована з 58582 елементів та має 74109 вузлів з розмірами від 10 до 300 мм. Зазначена щільність скінченноелементної сітки для комбінованих тривимірних моделей, як засвідчила практика виконання експертних перевірних розрахунків трубопровідних систем АЕС України, дозволяє досить точно визначити екстремуми напружень для подальшого аналізу.



Граничні умови закріплення змодельовані відповідно до проектних креслень:

- моделювання нерухомих опор – жорстке защемлення кінців трубопроводу;
- моделювання направляючих опор – заборона переміщень у площині поперечного перерізу трубопроводу, дозвіл переміщень уздовж трубопроводу;
- моделювання ковзних опор – заборона переміщень вертикальною площиною, дозвіл переміщень в горизонтальній площині.

Граничні умови навантаження:

- внутрішній тиск;
- навантаження трубопроводу від ваги середовища, враховане через зведену питому вагу трубопроводу, яка включає в себе власну вагу трубопроводу + вагу внутрішнього середовища.

Розрахунки виконані ВП ХАЕС з використанням програмного засобу APM WinMachine.

На основі рекомендацій ДНТЦ ЯРБ, з метою дотримання консервативного підходу, який полягає у визначенні мінімальної величини граничної сейсмостійкості конструкції в цілому (для найбільш навантаженої ділянки без врахування підходу диференціювання екстремумів напружень під час формування комбінацій навантажень від дії власної ваги, тиску та сейсмічних впливів), під час визначення параметра HCLPF, окрім стандартного підходу Методики МГС [2], ВП ХАЕС додатково було перевірено умову

$$FS = \min \left\{ \frac{(1,8 [\sigma] - \sigma_2^*)}{(\sigma_s^{\max})}; \frac{(1,8 [\sigma] - \sigma_2^{\max})}{(\sigma_s^{**})} \right\}, \quad (4)$$

де  $\sigma_2^*$  – напруження від режиму НЕ, визначене в тому самому перерізі, в якому локалізується екстремум напружень від сейсмічних навантажень МРЗ;  $\sigma_s^{**}$  – напруження від режиму МРЗ, визначене в тому самому перерізі, в якому локалізується екстремум напружень від режиму НЕ.

У випадку, коли аналізується сейсмостійкість арматури в системі «трубопровід+арматура», запас граничної сейсмостійкості згідно з підходами Методики МГС [2] для системи може бути призначений за принципом «слабкої ланки» як мінімальне отримане значення для всіх елементів системи.

#### Аналіз результатів числових розрахунків

Результати оцінки граничної сейсмостійкості наведено нижче в таблиці, а розташування репрезентативних перерізів – на рис. 1.

*Гранична сейсмостійкість запірного вентиля типу У 26362-032 з приєднаним трубопроводом згідно з документом [5]*

Досліджуваний переріз	$\sigma_2$ , МПа	$\sigma_s$ , МПа	Допустиме напруження $1,8[\sigma]$ , МПа	Коефіцієнт сейсмічного запасу, FS	$F_\mu$	HCLPF
Трубопровід. Переріз 1	21,30	106,9	235,26	2,00	1,5	0,30
Трубопровід. Переріз 2	88,19	104,2	235,26	1,41	1,5	0,21
Корпус арматури	5,70	6,2	223,20	35,08	2,0	7,01

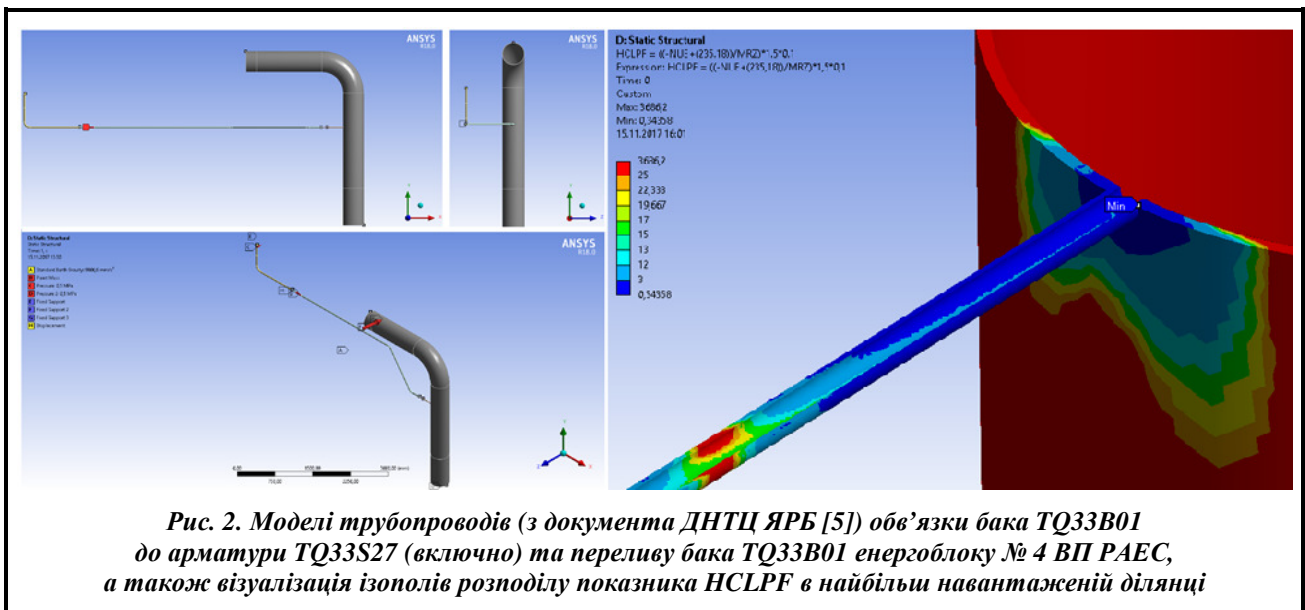
Розглянутий розрахунковий випадок демонструє 30 %-у різницю в значеннях HCLPF для випадків застосування формул (2) та (4) при визначенні коефіцієнта FS. Таким чином, в окремих випадках використання формули (2) призводить до отримання недостатньо консервативних результатів. В першу чергу це обумовлено тим, що суттєвий вплив на результат HCLPF має сейсмічна складова як знаменник формули (2).

Додаткову перевірку за формулою (4) рекомендується проводити, якщо за результатами аналізу отриманого НДС спостерігаються такі ситуації:

- значна різниця числових значень отриманих екстремумів при режимах НЕ та МРЗ (наприклад,  $\sigma_{\max}^{\text{НЕ}}=170$  МПа,  $\sigma_{\max}^{\text{МРЗ}}=3$  МПа.);
- однорідність характеру розподілу ізополів напружень МРЗ на ділянках, де локалізуються екстремуми режимів НЕ та МРЗ (див. вищенаведений приклад).

Необхідно відзначити, що такі розрахункові випадки не є поширеними. Досвід виконання державних експертиз ЯРБ демонструє, що практично в усіх випадках положення Методики МГС [2] дають коректні та консервативні результати розрахунків HCLPF.

Слід зазначити, що інструментарій більшості сучасних розрахункових платформ налічує в собі також засоби графічної візуалізації ізополів будь-якої величини шляхом створення користувачем власних величин результатів. Отже, в модулі постпроцесінгу розрахункового комплексу користувачем генеруються змінні (оператори), для яких присвоюються відповідні значення результатів (в нашому випадку – матриці результатів напружень для кожного вузла скінченноелементної моделі за Мізесом для режимів HE та MP3). Далі створюється змінна, яка оперує цими результатами розрахунків за визначеною користувачем формулою (наприклад, в програмному комплексі ANSYS таким інструментом є функція «User defined result»). На рис. 2 наведений приклад візуалізації ізополів розподілу показника HCLPF.



Застосування описаних вище прийомів використання кастомних, створених користувачем величин при обробці отриманих результатів сейсмічної міцності, є важливим саме для принципу дотримання консервативного підходу. Найбільшою перевагою такого підходу є те, що величина HCLPF вираховується на апаратному рівні для кожного вузла досліджуваної скінченноелементної моделі, що в свою чергу унеможливує допущення помилок в виборі репрезентативних перерізів при визначенні величини HCLPF та позбавляє необхідності додаткової перевірки умови за формулою (4).

## Висновки

1. Багаторічний досвід проведення експертних перевірок розрахунків дозволяє стверджувати, що в окремих випадках положення Методики МГС [2] не забезпечують достатнього рівня консерватизму отриманих результатів розрахунків HCLPF. Водночас такі розрахункові випадки не є поширеними. Додаткову перевірку за формулою (4) в першу чергу рекомендується виконувати у разі досягнення таких умов:

- значна різниця числових значень отриманих екстремумів при режимах HE та MP3;
- однорідність характеру розподілу ізополів напружень MP3 на ділянках, де локалізуються екстремуми режимів HE та MP3.

Сучасні розрахункові комплекси дозволяють уникати помилок при виборі репрезентативних перерізів, що й реалізується ДНТЦ ЯРБ при виконанні експертних перевірок розрахунків граничної сейсмостійкості.

2. Використання описаних в цій статті підходів дозволить підвищити репрезентативність результатів сейсмічного ІАБ за рахунок більш точного визначення граничної сейсмостійкості елементів.

3. Серед перспектив подальших досліджень у напрямку більш точного визначення величини HCLPF слід виділити такі актуальні питання:

- коректного спрощення значних за обсягом моделей трубопроводів при незначній кількості нерухомих опор (серед вимог Методики МГС [2] є необхідність побудови досліджуваної ділянки трубопроводу до найближчої нерухокої опори);
- зміщення центра мас приводів арматур залежно від його впливу на відгук загальної конструкції;
- дослідження залежності напружено-деформованого стану резервуарів від сейсмічних впливів.

### Література

- 1 Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій: НП 306.2.208-2016. *Офіційний вісн. України*. 2016. № 92. С. 3013.
- 2 МТ-Т.0.03.326-13. Методика расчетного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости: нормативна документація НАЕК «Енергоатом». К., 2018. 12 с.
- 3 ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 454 с.
- 4 Перечень разрешенных к использованию в ГП «НАЭК «Энергоатом» расчетных кодов для обоснования безопасности ядерных установок, введенный в дію розпорядженням ДП «НАЕК «Енергоатом» від 05.02.2018 № 137-р.
- 5 1.ОБ.1518.ОТ-18. Отчет по оценке сейсмостойкости промежуточной и граничной арматуры энергоблока № 1 ОП ХАЭС: звітна документація НАЕК «Енергоатом». К., 2018. 50 с.
- 6 Звіт про виконання державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки документа ВП «Хмельницька АЕС» «Отчет по оценке сейсмостойкости промежуточной и граничной арматуры энергоблока № 1 ОП ХАЭС 1.ОБ.1518.ОТ-18. Редакция 1» (реєстраційний № 18-09-10689/1): звітна документація ДНТЦ ЯРБ. К., 2018. 12 с.

*Надійшла до редакції 29.08.2019*

### Особенности применения метода граничной сейсмостойкости при оценке конструкций, систем и элементов АЭС с помощью расчетных комплексов

**М. А. Мустафин, Д. И. Рыжов, А-р П. Шугайло, А-й П. Шугайло, Р. Я. Буряк,  
Т. В. Подгаецкий, Я. Д. Круглий**

Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности,  
03142, Украина, г. Киев, ул. Василия Стуса, 35-37, а/я 124

*В рамках реализации мероприятия № 18101 «Обеспечение сейсмостойкости систем и строительных конструкций» «Комплексной (сводной) программы повышения уровня безопасности энергоблоков атомных электростанций» для энергоблоков АЭС Украины ДП НАЭК «Энергоатом» был разработан ряд отчетных документов с результатами расчетов сейсмостойкости согласно подходам НП 306.2.208-2016 «Требования по сейсмостойкому проектированию и оценке безопасности энергоблоков атомных станций», ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок" и граничной сейсмостойкости (HCLPF) согласно подходам "Методики расчетного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости. МТ-Т.0.03.326-13" (далее – Методика МГС). В соответствии с основными положениями Методики МГС определение величины граничной сейсмостойкости HCLPF (High Confidence Low Probability of Failure – высокая достоверность низкой вероятности отказа) принято производить на основе анализа напряженно-деформированного состояния для зоны с максимальным значением сейсмической составляющей напряжений ( $\sigma_s$ ). Однако в рамках проведения государственных экспертиз ядерной и радиационной безопасности отчетных документов ДП НАЭК «Энергоатом» был обнаружен ряд расчетных случаев, когда вышеуказанный подход методики МГС давал недостаточно консервативные результаты расчетов HCLPF. В настоящее время актуальным является определение представительных сечений расчетной модели элементов, для которых должно быть установлено значение HCLPF. В статье на соответствующем примере рассмотрен расчетный случай, который продемонстрировал недостаточный консерватизм результатов расчетов HCLPF при выборе непредставительного сечения. Также рассмотрены аспекты проведения анализа граничной сейсмостойкости систем и элементов АЭС с использованием специализированных инструментов современных расчетных комплексов для исключения ошибок при определении представительных сечений.*

**Ключевые слова:** сейсмостойкость, граничная сейсмостойкость, коэффициент сейсмического запаса, напряжения, представительное сечение.