

# Окремі аспекти практичного використання нормативних вимог до сполучення експлуатаційних та сейсмічних навантажень для тепломеханічного обладнання та трубопроводів

- **Шугайло О-р П.**  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1044-0299>
- **Рижов Д. І.**  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0068-5009>
- **Мустафін М. А.**  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9340-6223>
- **Підгаєцький Т. В.**  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4125-4846>
- **Леткова Н. Г.**  
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6360-2963>

У статті детально проаналізовані переваги та недоліки запропонованого експлуатуючою організацією алгоритму дій щодо визначення необхідності (або її відсутності) врахування деяких сполучень навантажень під час оцінки сейсмостійкості трубопроводів та тепломеханічного обладнання. Розглянуто трубопроводи, а також тепломеханічне обладнання енергоблока № 3 Відокремленого підрозділу «Запорізька атомна електрична станція» (ВП ЗАЕС), для яких оцінка сейсмічної міцності виконувалась за допомогою розрахунку.

Виконано порівняльний аналіз поверхових спектрів відгуку для нижніх, середніх і високих позначок реакторного відділення енергоблока № 3 ВП ЗАЕС із відповідними поверховими спектрами відгуків інших енергоблоків атомних станцій.

Проаналізовано питання щодо можливості та обсягів поширення отриманих експлуатуючою організацією результатів для енергоблока № 3 ВП ЗАЕС на інші енергоблоки атомних станцій України.

**Ключові слова:** сполучення навантажень, сейсмостійкість, тепломеханічне обладнання, трубопроводи, розрахунок, проектний землетрус, максимальний розрахунковий землетрус.

© Шугайло О-р П., Рижов Д. І., Мустафін М. А., Підгаєцький Т. В., Леткова Н. Г., 2019

29 листопада 2016 року набув чинності НП 306.2.208-2016 [1], розроблений на заміну ПНАЭ Г-5-006-87 [2] з метою врахування сучасних підходів (рекомендації Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ), Western European Nuclear Regulators Association (WENRA) тощо) до оцінки сейсмічної небезпеки майданчиків та сейсмостійкості енергоблоків атомних станцій, а також уроків аварії на атомній станції «Фукусіма-1».

Опис окремих основних відмінностей в положеннях НП 306.2.208-2016 [1] та ПНАЭ Г-5-006-87 [2] наведено в [3]. Однією з найважливіших відмінностей НП 306.2.208-2016 [1] від ПНАЭ Г-5-006-87 [2] є розширення номенклатури обов'язкових сполучень навантажень, які мають бути розглянуті під час оцінки сейсмостійкості:

- будівельних конструкцій;
- технологічного обладнання та трубопроводів;
- електротехнічного обладнання;
- обладнання інформаційних і керуючих систем, а також засобів автоматизації та зв'язку.

З усього різноманіття елементів атомної станції в цій статті сфокусуємо увагу на аспектах практичного використання вимог НП 306.2.208-2016 [1] до сполучення експлуатаційних та сейсмічних навантажень для тепломеханічного обладнання та трубопроводів.

У таблиці 1 наведені результати порівняльного аналізу вимог НП 306.2.208-2016 [1] та ПНАЭ Г-5-006-87 [2] до сполучення експлуатаційних та сейсмічних навантажень для тепломеханічного обладнання та трубопроводів.

Сполучення навантажень НЕ + ПА + МРЗ введено вперше в НП 306.2.208-2016 [1] з урахуванням уроків аварії на атомній станції «Фукусіма-1», а також є гармонізацією з рекомендаціями МАГАТЕ [4].

Згідно з НП 306.2.208-2016 [1] для оцінки сейсмостійкості елементів енергоблоків атомних станцій використовуються такі методи (або їх комбінації):

- аналіз (розрахунок);
- випробування;
- досвід експлуатації (наприклад, методологія непрямої оцінки сейсмостійкості GIP-BBER).

У подальшому розглянемо трубопроводи, а також тепломеханічне обладнання, для яких оцінка сейсмічної міцності здійснювалась за допомогою виконання розрахунку.

На цей час експлуатуючою організацією ще не виконані в повному обсязі вимоги НП 306.2.208-2016 [1] до сполучення експлуатаційних та сейсмічних навантажень для тепломеханічного обладнання та трубопроводів. На разі

Таблиця 1 — Результати порівняльного аналізу вимог нормативних документів до сполучення навантажень для тепломеханічного обладнання та трубопроводів

| Категорія сейсмостійкості | Сполучення навантажень згідно з НП 306.2.208-2016 [1] | Сполучення навантажень згідно з ПНАЭ Г-5-006-87 [2] |
|---------------------------|---|---|
| I                         | НЕ + МРЗ  | НЕ + МРЗ  |
|                           | ПНЕ + МРЗ   | ПНЕ + МРЗ*  |
|                           | НЕ + ПА + ПЗ  | НЕ + ПА + ПЗ*                                       |
|                           | НЕ + ПА + МРЗ**                                       | –   |
|                           | НЕ + ПЗ   | НЕ + ПЗ   |
|                           | ПНЕ + ПЗ  | ПНЕ + ПЗ*   |
| II                        | НЕ + ПЗ   | НЕ + ПЗ   |
|                           | ПНЕ + ПЗ  | ПНЕ + ПЗ*   |

Прийняті в таблиці позначення:

- НЕ – нормальна експлуатація;
- ПНЕ – порушення нормальної експлуатації;
- ПА – проектна аварія;
- ПЗ – проектний землетрус;
- МРЗ – максимальний розрахунковий землетрус.

\* – необхідність врахування сполучення визначається проектною організацією;

\*\* – сполучення застосовується для обладнання та трубопроводів, що забезпечують локалізуючу функцію безпеки герметичного огороження.

з метою виконання вимог НП 306.2.208-2016 [1] експлуатуючою організацією розроблені, погоджені Державною інспекцією ядерного регулювання України (Держатомрегулювання) та реалізуються організаційно-технічні заходи [5]. В рамках реалізації етапу 3 цих організаційно-технічних заходів [5] експлуатуючою організацією розроблено звіт [6], який розглянуто в рамках проведення державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки [7]. Метою звіту [6] є визначення необхідності (або її відсутності) врахування додаткових сполучень навантажень, регламентованих НП 306.2.208-2016 [1], під час оцінки сейсмостійкості систем та елементів, на підставі виконаних раніше розрахунків сейсмостійкості. Як «пілотний» обрано енергоблок № 3 ВП ЗАЕС. У звіті [6] експлуатуючою організацією запропоновано такий алгоритм дій щодо визначення необхідності (або її відсутності) врахування додаткових сполучень навантажень ПНЕ та/або ПА, регламентованих НП 306.2.208-2016 [1], під час оцінки сейсмостійкості тепломеханічного обладнання та трубопроводів:

Етап 1: збір документів, які містять результати раніше виконаних розрахунків на сейсмостійкість тепломеханічного обладнання та трубопроводів (заходи КзППБ [8] 10101 «Розроблення матеріалів і виконання кваліфікації елементів енергоблока» та 18101 «Забезпечення сейсмостійкості систем і будівельних конструкцій», роботи з оцінки технічного стану та перепризначення строку експлуатації);

Етап 2: на підставі переліку [9] формування номенклатури трубопроводів та тепломеханічного обладнання, які підлягають розгляду та аналізу;

Етап 3: обробка та систематизація результатів розрахунків, а також визначення номенклатури сполучень навантажень, врахованих у раніше виконаних розрахунках трубопроводів та тепломеханічного обладнання;

Етап 4: для кожного трубопроводу та тепломеханічного обладнання формування переліку додаткових сполучень навантажень, які мають бути враховані в розрахунках згідно з вимогами НП 306.2.208-2016 [1];

Етап 5: встановлення участі трубопроводу та тепломеханічного обладнання у можливих режимах ПНЕ та/або ПА;

Етап 6: визначення можливості зміни параметрів (тиск, температура) у відповідній системі під час ПНЕ та/або ПА;

Етап 7: визначення вкладу ПНЕ або ПА в різні сполучення навантажень за спрощеною аналітичною процедурою (докладніше див. нижче);

Етап 8: визначення переліку тепломеханічного обладнання та трубопроводів, для яких на Етапі 7 не дотримуються умови сейсмичної міцності згідно з НП 306.2.208-2016 [1];

Етап 9: виконання прямих розрахунків сейсмичної міцності представницьких позицій тепломеханічного обладнання та трубопроводів (визначених на Етапі 8) з урахуванням додаткових сполучень навантажень, регламентованих НП 306.2.208-2016 [1].

Під час врахування додаткових сполучень навантажень (ПНЕ та/або ПА) сейсмична складова напружень від ПЗ або МРЗ залишається незмінною. З урахуванням зазначеного, експлуатуючою організацією пропонується на Етапі 7 використовувати спрощений підхід, при якому збільшення розрахункових напружень  $(\sigma_s)_1$  та  $(\sigma_s)_2$  відбувається пропорційно збільшенню тиску в режимах ПНЕ та ПА. Запропонований підхід є консервативним з урахуванням того, що відповідно до ПНАЭ Г-7-002-86 [10]:

до розрахункової групи категорії напружень  $(\sigma_s)_1$  входять напруження від механічних навантажень і сейсмичних впливів, які визначаються за складовими загальних мембранних напружень;

до розрахункової групи категорії напружень  $(\sigma_s)_2$  входять напруження від механічних навантажень і сейсмичних впливів, які визначаються за складовими мембранних та загальних згинних напружень.

У звіті [6] для елементів I-ої категорії сейсмостійкості згідно з НП 306.2.208-2016 [1] під час розгляду сполучень навантажень, до яких входить ПЗ, запропоновано такий підхід: у разі відсутності результатів розрахунків на ПЗ допускається порівняння результатів розрахунків на МРЗ з допустимими напруженнями для сполучень навантажень з ПЗ. Запропонований підхід є консервативним, оскільки:

сейсмичні навантаження від МРЗ є більшими за ПЗ;

відповідно до НП 306.2.208-2016 [1] та ПНАЭ Г-7-002-86 [10] допустимі напруження для сполучень навантажень з ПЗ є меншими ніж для сполучень навантажень з МРЗ (для елементів I категорії сейсмостійкості).

На прикладі енергоблока № 3 ВП ЗАЕС в звіті [6] з'ясовано, що переважно для трубопроводів

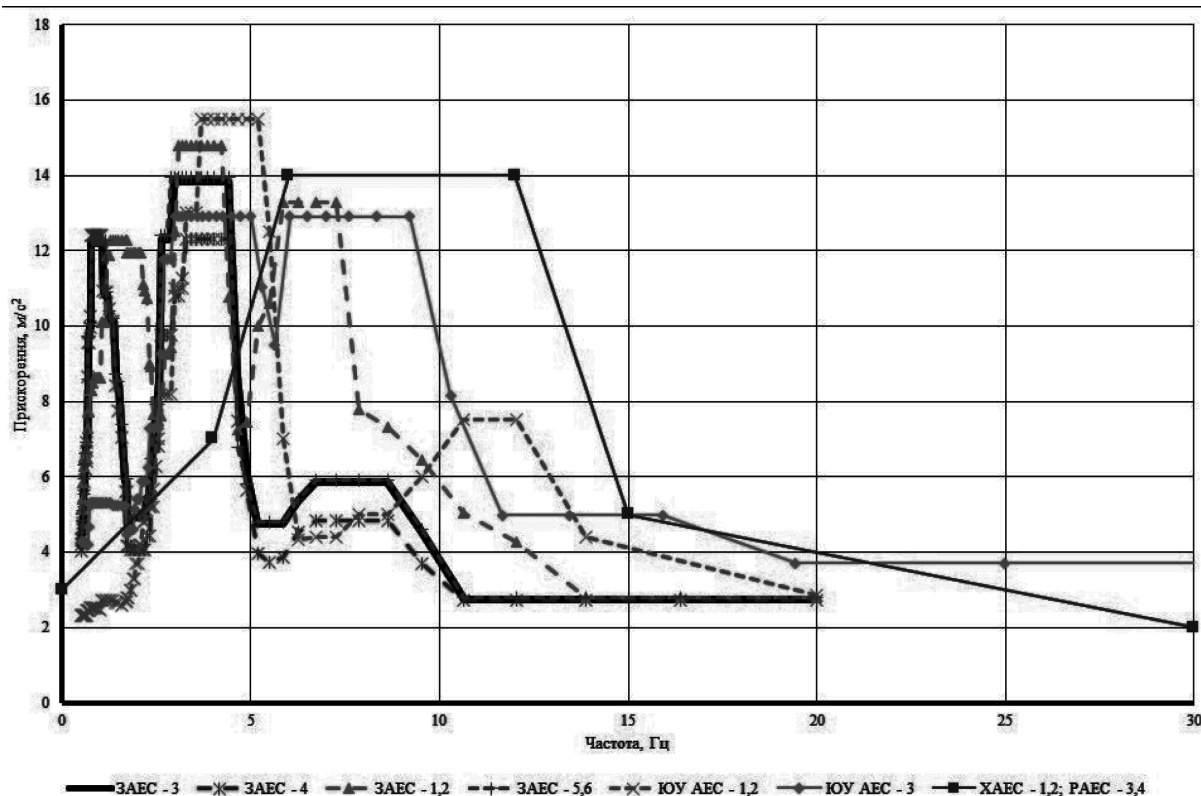


Рисунок 1 — Результати порівняння поверхових спектрів відгуку за напрямом Ах (горизонтальна складова) для позначки 36,6 м реакторних відділень енергоблоків атомних станцій України з РУ ВВЕР-1000

та тепломеханічного обладнання збільшення навантажень під час ПНЕ та/або ПА не перевищує наявні запаси міцності для сполучення навантаження HE + МРЗ. З урахуванням зазначеного можна зробити висновок, що запропонований алгоритм дозволяє на підставі аналітичних аналізів суттєво скоротити номенклатуру трубопроводів та обладнання, для яких необхідно виконувати додаткові розрахунки сейсмічної міцності для додаткових сполучень навантажень, регламентованих НП 306.2.208-2016 [1]. Завдяки дотриманню описаного алгоритму певним чином спрощується практичне використання нормативних вимог до сполучення експлуатаційних та сейсмічних навантажень для тепломеханічного обладнання та трубопроводів.

Недоліком алгоритму, запропонованого експлуатуючою організацією, можна назвати те, що, як зазначено вище, основою для визначення номенклатури трубопроводів та тепломеханічного обладнання, які підлягають аналізу, використовується перелік [9]. Втім зауважимо, що в НП 306.2.208-2016 [1] встановлено вимоги до номенклатури сполучень навантажень як елементів I-ої категорії, так і II-ої категорії

сейсмостійкості. Притому, найбільш повний перелік трубопроводів та тепломеханічного обладнання I та II категорій сейсмостійкості наведений у класифікаторах елементів в додаткових матеріалах з аналізу безпеки (ДМАБ) енергоблока. Отже, за основу для визначення номенклатури трубопроводів та тепломеханічного обладнання, які підлягають аналізу, коректніше використовувати переліки елементів відповідно до ДМАБ енергоблока.

За результатами виконаного аналізу постає вкрай актуальне питання щодо можливості та обсягів поширення отриманих результатів для енергоблока № 3 ВП ЗАЕС на інші енергоблоки атомних станцій України. Щодо цього питання необхідно зауважити таке:

1) Поверхові спектри відгуку для нижніх, середніх і високих позначок реакторного відділення енергоблока № 3 ВП ЗАЕС не є огиначаючими як за формою, так і за максимальними значеннями прискорень для поверхових спектрів відгуку реакторних відділень енергоблоків атомних станцій України з реакторною установкою (РУ) ВВЕР-1000. Як приклад на рисунку 1 наведено результати порівняння поверхових спектрів відгуку

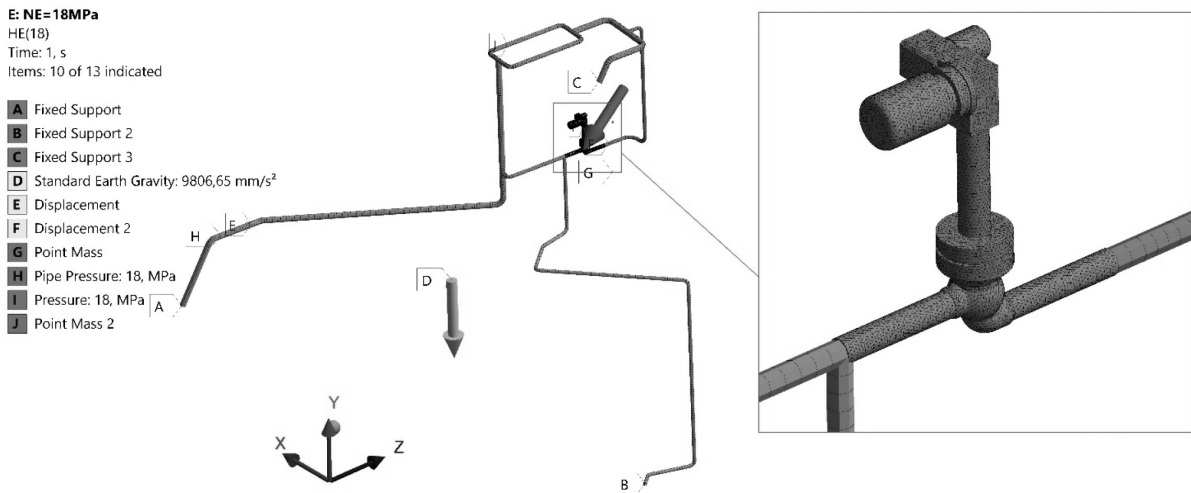


Рисунок 2 — Скінченно-елементна модель арматури YP13S02 з приєднаними трубопроводами



Рисунок 3 — Результати розрахунку напружень в корпусі арматури YP13S02 на енергоблоці № 3 ВП ЗАЕС

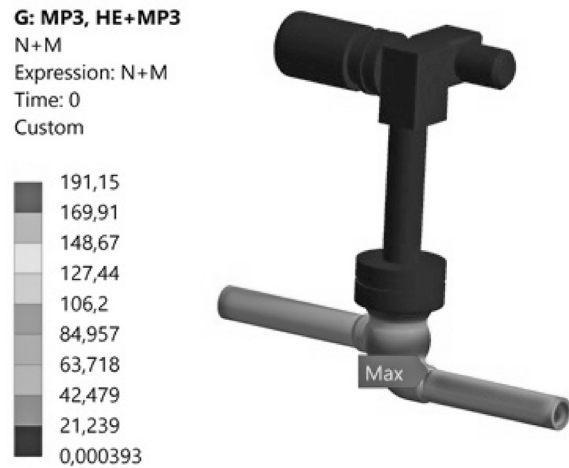


Рисунок 4 — Результати розрахунку напружень в корпусі арматури YP13S02 на енергоблоці № 1 ВП ЗАЕС

за напрямом Ax (горизонтальна складова) для позначки 36,6 м реакторних відділень енергоблоків атомних станцій України з РУ ВВЕР-1000.

2) Трасування трубопроводів одних й тих самих систем на різних енергоблоках атомних станцій України може бути різним, наприклад, трасування трубопроводів систем аварійного охолодження активної зони реактора низького тиску на енергоблоках №№ 1, 2, 3 ВП ЗАЕС відрізняється. Приклади ситуацій, коли трасування трубопроводів одних й тих самих систем на різних енергоблоках атомних станцій України є різними, можуть бути продовжені.

3) Навіть для сприятливих умов (а саме: обладнання та трасування приєднаних до нього трубопроводів на різних енергоблоках є ідентичним,

параметри режимів ПНЕ та АС ідентичні) результати розрахунків сейсмічної міцності різні.

Для демонстрації описаної ситуації Державним підприємством «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» (ДНТЦ ЯРБ) виконано повірочні розрахунки сейсмічної міцності. Як приклад обрано запірну арматуру YP13S02 на енергоблоках № 3 та № 1 ВП ЗАЕС. Розрахунки виконано для сполучення навантажень HE + MP3, HE + ПЗ, ПНЕ + MP3, ПНЕ + ПЗ, HE + ПА + ПЗ за допомогою програмного засобу ANSYS. На рисунку 2 зображена скінченно-елементна модель арматури YP13S02 з приєднаними трубопроводами.

На рисунках 3 та 4, як приклад, наведені результати розрахунків на сполучення навантажень

НЕ + МРЗ корпусу арматури YP13S02 на енергоблоках № 3 та № 1 ВП ЗАЕС відповідно.

Виконані ДНТЦ ЯРБ оцінки демонструють, що результати розрахунків арматури YP13S02 з використанням сейсмічних впливів для енергоблока № 1 ВП ЗАЕС відрізняються приблизно на +16 % від результатів розрахунків арматури YP13S02 з використанням сейсмічних впливів для енергоблока № 3 ВП ЗАЕС.

Виконаний аналіз засвідчив, що результати оцінок сейсмостійкості трубопроводів та тепломеханічного обладнання енергоблока № 3 ВП ЗАЕС не можуть бути напряму поширені на аналогічні трубопроводи та тепломеханічне обладнання інших енергоблоків атомних станцій України з РУ ВВЕР-1000.

## Висновки

1. Експлуатуючою організацією розроблено загалом прийнятний алгоритм дій щодо визначення необхідності (або її відсутності) врахування додаткових сполучень навантажень, регламентованих НП 306.2.208-2016 [1], під час оцінки сейсмостійкості трубопроводів та тепломеханічного обладнання, на підставі виконаних раніше розрахунків на сейсмічну міцність.

2. На прикладі енергоблока № 3 ВП ЗАЕС з'ясовано, що переважно для трубопроводів та тепломеханічного обладнання збільшення навантажень під час ПНЕ та/або ПА не перевищує наявні запаси міцності для сполучення навантаження НЕ + МРЗ.

3. Розроблений експлуатуючою організацією алгоритм дозволяє на підставі аналітичних аналізів суттєво скоротити номенклатуру трубопроводів та обладнання, для яких необхідно виконувати додаткові розрахунки сейсмічної міцності для додаткових обов'язкових сполучень навантажень, регламентованих НП 306.2.208-2016 [1]. Розроблений алгоритм спрощує практичне використання нормативних вимог до сполучення експлуатаційних та сейсмічних навантажень для тепломеханічного обладнання та трубопроводів.

4. Результати оцінок сейсмостійкості трубопроводів та тепломеханічного обладнання одного конкретного енергоблока атомної станції не можуть бути напряму поширені на аналогічні трубопроводи та тепломеханічне обладнання інших енергоблоків атомних станцій України з РУ ВВЕР-1000.

## Список використаної літератури

1. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій : затверджені наказом Державної інспекції ядерного регулювання України від 17 жовтня 2016 року № 175, зареєстровані у Міністерстві юстиції України 07 листопада 2016 року за № 1449/29579.
2. ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Москва : Энергоатомиздат, 1989. 29 с.
3. Рижов Д. І., Шугайло О-й П., Шугайло О-р. П., Кендзера О. В., Мар'єнков М. Г., Шендерович В. Я., Буряк Р. Я. Про сучасні вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій України. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2017. № 2(74). С. 9–13.
4. NS-G-1.6. Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants. Vienna, 2003. 59 p. (IAEA Safety Guide).
5. Организационно-технические мероприятия ГП «НАЭК «Энергоатом» по внедрению НП 306.2.208-2016 «Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій». Киев : ГП «НАЭК «Энергоатом», 2017.
6. Сравнительный анализ расчетных сочетаний нагрузок для зданий, сооружений, разных групп оборудования по требованиям ПНАЭ Г-5-006-87 и НП 306.2.208-2016. Киев : ГП «НАЭК «Энергоатом», 2018.
7. Звіт про виконання державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки документа ДП «НАЕК «Енергоатом» «Сравнительный анализ расчетных сочетаний нагрузок для зданий, сооружений, разных групп оборудования по требованиям ПНАЭ Г-5-006-87 и НП 306.2.208-2016» (реєстраційний № 19-09-11489). Київ : ДНТЦ ЯРБ, 2019.
8. Комплексна (зведена) програма підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій : затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 07.12.2011 № 1270. *Офіційний вісник України*. 2011. № 96.
9. Перечень оборудования, трубопроводов, зданий и сооружений, энергоблока № 3 ОП «Запорожская АЭС» для которых необходимо выполнить обоснование устойчивости к сейсмическим воздействиям : погоджений Державною інспекцією ядерного регулювання 02 грудня 2014.
10. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Москва : Энергоатомиздат, 1989. 454 с.

## References

1. NP 306.2.208-2016. *Requirements for seismic resistance design and for evaluation of seismic safety of Ukrainian NPPs*. Approved by SNRIU Order No. 175 dated 17 October 2016 registered in the Ministry of Justice on 11 July 2016 under No. 1449/29579 [in Ukrainian].
2. PNAE G-5-006-87. *Standards for design of seismic-resistant nuclear power plants*. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 29 [in Russian].
3. Ryzhov, D., Shugaio, O-i., Shugaylo, O-r., Kendzera, O., Maryenkov, M., Shenderovich, V., Buryak, R. (2017). *About modern requirements for seismic resistance design and for evaluation of seismic safety of Ukrainian NPP units*. Nuclear and Radiation Safety, 2(74), 9–13 [in Ukrainian].

4. NS-G-1.6. *Seismic design and qualification for nuclear power plants*. Vienna, 2003.
5. *Organizational and technical measures of Energoatom for implementation of NP 306.2.208-2016 «Requirements for seismic design and seismic safety assessment of NPPs»*. Kyiv, Energoatom, 2017 [in Russian].
6. *Comparative analysis of the calculated load combinations for building structures, several groups of equipment according to requirements of PNAE G-5-006-87 and NP 306.2.208-2016*. Kyiv, Energoatom, 2018 [in Russian].
7. *Report on the State review of nuclear and radiation safety of Energoatom document «Comparative analysis of the calculated load combinations for building structures, several groups of equipment according to requirements of PNAE G-5-006-87 and NP 306.2.208-2016» (registration No. 19-09-11489)*. SSTC NRS, 2019 [in Ukrainian].
8. *Comprehensive (Integrated) Safety Improvement Program for Ukrainian NPPs*. Approved by the Resolution of the Cabinet of Ministry of Ukraine No. 1270 dated 07 December 2011 [in Ukrainian].
9. *List of Zaporizhzhya NPP Unit 3 equipment, piping, building structures for which substantiation of seismic resistance should be performed*. Approved by SNRIU on 02 December 2014 [in Russian].
10. PNAE G-7-002-86. *Standards for strength calculations of equipment and piping of nuclear power installations*. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 454 [in Russian].

### Some Aspects of Practical Application of Regulatory Requirements Related to Operating and Seismic Load Combinations for Thermomechanical Equipment and Piping

**Shugaylo O.-r., Ryzhov D., Mustafin M.,  
Pidhaietskyi T., Letkova N.**

State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Kyiv, Ukraine

New state-of-the-art regulatory document has been developed and implemented in Ukraine to present requirements for seismic hazard assessment of nuclear power plant (NPP) sites and

seismic resistance of nuclear power units taking into account lessons learnt from the accident at Fukushima-1 NPP. One of the new important regulatory requirements in this document is the extension of the list of mandatory load combinations, which should be considered in assessing seismic resistance of unit components.

Advantages and disadvantages of the algorithm proposed by the operating organization to determine the necessity to consider some load combinations in assessing the seismic resistance of pipelines and thermomechanical equipment based on previously performed seismic strength calculations have been analyzed in the paper. The pipelines as well as the thermomechanical equipment of Zaporizhzhya NPP Unit 3, for which seismic strength evaluation was calculated, have been considered.

The results of expert seismic calculations of YP13S02 valve of ZNPP-1 and ZNPP-3 have been provided. The paper presents the comparative analysis of the floor response spectra for the lower, middle and high elevations of ZNPP-3 containment with the corresponding floor response spectra of other Ukrainian NPPs and conclusions.

The possibility for disseminating results obtained by the operating organization for ZNPP-3 to other units of the Ukrainian NPPs has been analyzed.

**Key words:** load combinations, seismic resistance, thermomechanical equipment, pipelines, calculation, operating basis earthquake, safe shutdown earthquake.

Отримано 20.10.2019